

# Impact sur la cosmologie : simulations

*« The Answer to the Great Question... Of Life,  
the Universe and Everything... Is... Forty-two. »*

Douglas ADAMS, *H2G2*

Nous avons vu dans le chapitre précédent la manière dont **SNANA** permettait de traiter les biais et corrélations environnementales dans le calcul des paramètres cosmologiques, et ainsi pourquoi son utilisation dans notre thèse était pertinente.

Dans ce chapitre, nous présentons les simulations que nous avons effectuées avec le logiciel. Dans un premier lieu, nous discutons des différentes corrélations que nous avons testées *via* l'utilisation de **HOSTLIB** (Section I.1) et de la confection de nôtres (Section I.2). Par la suite, nous introduisons...

## Sommaire

|   |           |
|---|-----------|
| <b>I.1 Présentation des HOSTLIB</b> . . . . .                             | <b>2</b>  |
| I.1.1 Étirement et couleur globales : SK . . . . .                        | 2         |
| I.1.2 Étirement et couleur selon la masse : BP . . . . .                  | 3         |
| I.1.3 Étirement selon l'âge : NN . . . . .                                | 3         |
| I.1.4 Étirement et marche de magnitude selon l'âge : NR . . . . .         | 4         |
| <b>I.2 Confection des HOSTLIB NN et NR</b> . . . . .                      | <b>4</b>  |
| I.2.1 Modélisation du lien entre masse et redshift . . . . .              | 4         |
| I.2.2 Comparaison aux données . . . . .                                   | 5         |
| I.2.3 Sélection des modèles . . . . .                                     | 6         |
| I.2.4 Génération des HOSTLIB . . . . .                                    | 8         |
| I.2.5 Implémentation . . . . .  | 10        |
| Résumé . . . . .  | 11        |
| <b>I.3 Comparaison des données simulées aux données réelles</b> . . . . . | <b>11</b> |
| I.3.1 Accord entre les données : analyse uni-dimensionnelle . . . . .     | 13        |
| I.3.2 Accord entre les données : analyse bi-dimensionnelle . . . . .      | 15        |
| <b>I.4 Résultats</b> . . . . .  | <b>15</b> |
| <b>I.5 Discussion</b> . . . . .   | <b>15</b> |
| <b>I.6 Systématiques dues au choix du modèle de masse</b> . . . . .       | <b>16</b> |
| <b>I.7 Conclusion</b> . . . . .   | <b>16</b> |

## I.1 Présentation des HOSTLIB

Dans sa forme la plus générale, une HOSTLIB ne possède pas de valeurs liées à des paramètres de SNe Ia (comme l'étirement ou la couleur) ; en effet, elle sert originellement à utiliser le redshift photométrique de la galaxie hôte comme valeur antérieure dans l'ajustement du redshift de la SN et à ajouter du bruit à la SN simulée (voir Chapitre ??). Avant d'intégrer notre modèle à SNANA, il nous a fallu reproduire les approches d'autres groupes utilisant le logiciel. Nous avons choisi pour cela les études de [SCOLNIC et KESSLER \(2016\)](#), ci-après SK, et de [POPOVIC et al. \(2021\)](#), ci-après BP.

### I.1.1 Étirement et couleur globales : SK

Dans leurs travaux, SK n'incluent pas de lien d'étirement ou de couleur avec les propriétés de la galaxie hôte mais uniquement une marche de magnitude en fonction de sa masse  $M_*$ . Celle-ci est inclut dans les WEIGHTMAP des sondages, et est de 0,05 mag. Le tirage des paramètres  $x_1$  et  $c$  se font alors depuis des distributions asymétriques Gaussiennes, une par sondage simulé, décrites par :

$$P(p) = \begin{cases} e^{-\frac{|p - \mu|^2}{\sigma_-^2}} & \text{si } p \leq \mu \\ e^{-\frac{|p - \mu|^2}{\sigma_+^2}} & \text{si } p > \mu \end{cases} \quad (\text{I.1})$$

avec  $p = x_1$  ou  $c$ . Les valeurs des paramètres sont indiqués Tableau I.1.

**Tableau I.1** – Paramètres des distributions sous-jacentes d'étirement et de couleur desquelles sont générées les SNe Ia dans notre reproduction du travail de SK.

| Sondage | $x_1$ |            |            | $c$    |            |            |
|---------|-------|------------|------------|--------|------------|------------|
|         | $\mu$ | $\sigma_-$ | $\sigma_+$ | $\mu$  | $\sigma_-$ | $\sigma_+$ |
| PS1     | 0,604 | 1,029      | 0,363      | -0,077 | 0,029      | 0,12       |
| SDSS    | 1,141 | 1,653      | 0,100      | -0,038 | 0,048      | 0,079      |
| SNLS    | 0,964 | 1,232      | 0,282      | -0,065 | 0,044      | 0,12       |
| LOWZ    | –     | –          | –          | -0,055 | 0,023      | 0,015      |

**Notes.** Les valeurs viennent du Tableau 1 de SK, sauf pour LOWZ dont la distribution d'étirement est une double Gaussienne d'après [SCOLNIC et al. \(2018\)](#).

Nous avons cependant utilisé les valeurs de paramètres de [SCOLNIC et al. \(2018\)](#) pour la distribution d'étirement de LOWZ, qui est alors décrite par une combinaison de deux

Gaussiennes dont une asymétrique, telle que :

$$P(x_1) = A_1 \times \begin{cases} e^{-\frac{|x_1 - \mu_1|^2}{\sigma_{-,1}^2}} & \text{si } x_1 \leq \mu_1 \\ e^{-\frac{|x_1 - \mu_1|^2}{\sigma_{+,1}^2}} & \text{si } x_1 > \mu_1 \end{cases} + A_2 \times e^{-\frac{|x_1 - \mu_2|^2}{\sigma_2^2}} \quad (\text{I.2})$$

Les valeurs sont indiquées Tableau I.2 avec le rapport d'amplitude  $a = \frac{A_1}{A_2}$ .

**Tableau I.2** – Paramètres de la distribution sous-jacente d'étirement pour l'échantillon LOWZ dans notre reproduction de l'étude de SK.

| Sondage | $x_1$   |                |                |      |         |            |
|---------|---------|----------------|----------------|------|---------|------------|
|         | $\mu_1$ | $\sigma_{-,1}$ | $\sigma_{+,1}$ | $a$  | $\mu_2$ | $\sigma_2$ |
| LOWZ    | 0,55    | 1,0            | 0,45           | 0,55 | -1,5    | 0,5        |

**Notes.** Les caractéristiques sont celles reportées dans l'annexe C de SCOLNIC et al. (2018), mais les valeurs y étant erronées nous avons utilisé celles de l'équipe directement.

### I.1.2 Étirement et couleur selon la masse : BP

D'un autre côté, BP définissent des distributions mères Gaussiennes asymétriques pour  $x_1$  et  $c$  selon la masse de la galaxie hôte. Ceci est effectué en découplant les données des sondages en intervalles selon  $M_*$ ; dans chacun de ces intervalles sont déterminés les paramètres des Gaussiennes asymétriques, puis à chaque entrée de la HOSTLIB sont sélectionnés des paramètres d'étirement et de couleur selon la valeur de la masse de la galaxie hôte. Ainsi, par rapport à SK, ces HOSTLIB présentent 2 colonnes supplémentaires, une pour  $x_1$  et une pour  $c$ , attribuant à chaque entrée une valeur de ces paramètres à associer à la SN simulée.

Ce procédé est réalisé pour LOWZ d'une part, menant à une HOSTLIB que nous appelons « BP\_lowz », et pour la combinaison des sondages DES, SDSS, PS1 et SNLS d'autre part, menant à une HOSTLIB que nous nommons « BP\_highz ». Les valeurs des paramètres correspondants sont disponibles dans l'annexe A2 de BP.

Ce sont ces HOSTLIB qui constituent la base de notre étude ; en réalité, les HOSTLIB SK sont celles de BP où nous avons retiré le tirage des colonnes  $x_1$  et  $c$ .

### I.1.3 Étirement selon l'âge : NN

Notre approche des corrélations entre environnement et supernova est une variation forte par rapport aux précédentes implémentations, puisqu'elle résulte d'une modélisation prospective plutôt que purement phénoménologique. Pour notre étude, nous avons besoin de relier l'étirement attribué à la SN avec l'âge de son environnement, en correspondance

avec nos travaux précédents ([NICOLAS et al. 2021](#), ci-après NN). Nous augmentons donc les HOSTLIB en faisant correspondre un âge à chaque entrée des tables ; ainsi, par rapport aux HOSTLIB BP, nous avons donc une colonne indiquant si la SN est jeune ou vieille, et nommons ces HOSTLIB « NN ». La réalisation de cette HOSTLIB est présentée dans la Section [I.2](#).

### I.1.4 Étirement et marche de magnitude selon l'âge : NR

Comme nous l'avons vu précédemment, l'âge des SNe Ia a une double implication : celle de l'évolution de la distribution sous-jacente de l'étirement avec le redshift (Chapitre ??), mais aussi une marche de magnitude de  $\gamma_{\text{env}} = 0,13$  mag entre les SNe Ia jeunes et vieilles (Chapitre ??, [RIGAULT et al. 2020](#)). Nous avons implémenté cette valeur à la place de la marche de magnitude selon  $M_*$  incluse dans les WEIGHTMAP des sondages *via* l'ajout d'une colonne donnant une variation de magnitude de  $\pm 0,065$  mag aux HOSTLIB NN : ces nouvelles HOSTLIB se nomment « NR » pour « NICOLAS RIGAULT », et présentent l'exacte même colonne d'étirement que les NN.

## I.2 Confection des HOSTLIB NN et NR

Afin de simuler des SNe Ia avec notre modèle, que ce soit pour NN ou NR, nous avons besoin que les propriétés des galaxies hôtes suivent les distributions de ce qui a été observé par les différents sondages simulés. Bien que nous soutenions que le LsSFR est un meilleur traceur de l'environnement d'une SN ([BRIDAY et al. 2022](#)), la plupart des sondages caractérisent les galaxies avec leur masse stellaire. Étant donné que le LsSFR repose sur la masse de la galaxie hôte<sup>1</sup>, nous ne pouvons pas uniquement nous baser sur la valeur du redshift  $z$  d'une entrée des HOSTLIB BP pour y assigner un étirement. Nous attendons effectivement que les galaxies vers  $M_* \approx 12$  ne contiennent des SNe Ia vieilles alors que les galaxies de  $M \gtrsim 7$  n'en contiennent que des jeunes.

Par conséquent, afin de comparer les implications de notre modélisation basée sur le LsSFR avec ce que les autres sondages ont observé, nous avons dû modéliser les masses des galaxies hôtes par rapport au LsSFR ; nous avons pour cela utilisé le même échantillon du Chapitre ?? que pour la modélisation de l'étirement du Chapitre ???. Cependant, nous soulignons que cette étude n'a pas pour volonté de décrire l'évolution des masses des galaxies hôtes (qui sont des propriétés globales) avec le LsSFR d'une supernova (étant une propriété intrinsèque de celles-ci) : son utilité est d'associer de manière cohérente un âge à une SN caractérisée par un certain redshift et par une masse de galaxie hôte.

### I.2.1 Modélisation du lien entre masse et redshift

De la même manière que dans le Chapitre ??, nous utilisons le LsSFR comme traceur de l'âge d'une SN, mais cette fois sur les estimations de masse du sondage SNf. Ensuite nous modélisons les populations jeune et vieille par une série de paramétrisations différentes et choisissons celle qui a le plus faible AIC. Cependant, les masses SNf ont été calculées à l'aide de l'Équation 8 de [TAYLOR et al. \(2011\)](#) (voir [RIGAULT et al. \(2020\)](#)) alors que

---

1. pour rappel :  $\text{sSFR} = \frac{\text{SFR}}{M_*}$

d'autres études du catalogue Pantheon utilisent différentes techniques d'estimation de la masse qui pourraient donner des valeurs de sortie différentes pour une même galaxie.

L'estimation de TAYLOR utilise la magnitude AB absolue en bande  $i$  d'une galaxie,  $M_i$ . Elle est déduite de la magnitude apparente  $m_i$  connaissant le redshift de la galaxie mais suppose que la bande  $i$  observée est proche de celle du référentiel de repos, ce qui est vrai pour les redshift de SNf qui sont inférieurs à  $z \approx 0,05$ . Les relevés de l'échantillon Pantheon sont à des redshifts plus élevés et ont utilisé un ajustement des distributions spectrales d'énergie (en anglais SED pour *spectral energy distributions*) des galaxies pour éviter les corrections K dans cette procédure.

Nous avons appliqué la même analyse à l'échantillon SNf ; les données ainsi calculées sont nommées « SEDSNf » par la suite, et l'échantillon fiduciel utilisant SEDSNf est nommé « SED fiduciel ». À cause de l'absence de 4 galaxies hôtes dans les catalogues de données nécessaires à ce calcul, l'échantillon SEDSNf est réduit à 110 données, au lieu de 114 pour SNf. Nous indiquons également que nous nous limitons pour cette étude aux galaxies de  $M_* > 10^7 M_\odot$ , étant donné que les valeurs inférieures servent à indiquer qu'aucune galaxie hôte n'a été définie ; l'échantillon fiduciel tombe alors à 548 données, et SED Fiduciel à 544.

Nous avons donc réalisé cette étude de l'évolution des distributions sous-jacentes de masse avec le LsSFR en utilisant :

**SNf** Uniquement les données de SNf (masses issues d'un calcul par l'Équation de TAYLOR) ;

**SEDSNf** Uniquement les données de SNf avec les masses issues d'un ajustement par SED ;

**Fiduciel** Toutes les données de notre échantillon fiduciel ;

**SED fiduciel** Toutes les données de notre échantillon fiduciel avec les masses SEDSNf.

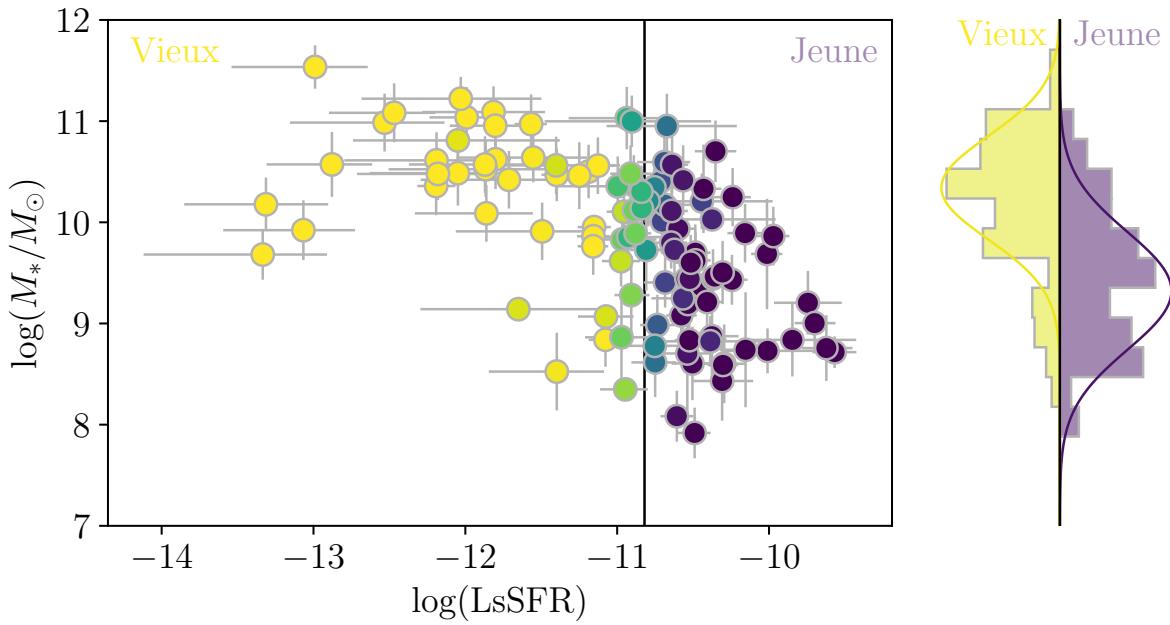
D'après la forme des histogrammes de la Figure I.1, nous avons implémentés différentes modélisations. Cette étude étant annexe à la simulation par SNANA, nous ne présentons que les plus pertinentes et omettons les modélisations n'ayant pas d'intérêt physique ou mathématique, c'est-à-dire les modélisations constantes avec le redshift (notamment les Gaussienne simple et Gaussienne asymétrique pure) et les modèles ne convergeant pas. Ainsi, nous présentons les modèles suivants :

- « Howell » d'après HOWELL et al. (2007), avec une Gaussienne simple pour chacune des populations jeune et âgée (voir Chapitre ??) ;
- « Howell+asym » où la population jeune est une simple Gaussienne et la population vieille est une Gaussienne asymétrique ;
- « Howell asym » où les deux populations jeune et âgée sont asymétriques.

## I.2.2 Comparaison aux données

Chacun de ces modèles a été ajusté aux différents échantillons, et nous en présentons maintenant les résultats. La procédure d'ajustement est celle de la Section 3 de NN, selon la présence de LsSFR dans chaque sous-échantillon. On définit de même que précédemment

$$-2 \ln(L) = -2 \sum_i \ln \mathcal{P}(x_1^i | \vec{\theta}; dx_1^i, y^i). \quad (\text{I.3})$$



**FIGURE I.1 – Principal :** masses des galaxies hôtes ( $M_*$ ) ajustées par SED en fonction du LsSFR pour les SNe de SNfactory. La couleur correspond à la probabilité  $p_y$  que la SN Ia soit jeune, c'est-à-dire qu'elle ait  $\log \text{LsSFR} \geq -10,82$  (voir RIGAULT et al. 2020, et Chapitre ??). À droite : histogramme pondéré par  $p_y$  des étirements des SNe, ainsi que le modèle sélectionné ajusté ; les contributions des populations jeune et âgée sont indiquées en violet et jaune, respectivement.

et nous utilisons le critère d’information d’AKAIKE (AIC, BURNHAM 2004) pour comparer la capacité de chaque modèle à décrire correctement les données en pénalisant l’ajout de paramètres libres tel que :

$$\text{AIC} = -2 \ln(L) + 2k, \quad (\text{I.4})$$

ce qui permet d’éviter le sur-ajustement. Les résultats sont présentés Tableau I.3.

Après calcul, le modèle Howell est celui qui se détache le plus, étant celui de plus petit AIC pour 6 modèles sur 8, et est celui représenté sur la Figure I.1 ; cependant tous les modèles sont considérés comme étant de bonnes représentations des données. Nous présentons Figure I.2 une illustration des résultats du tableau précédent, et Figure I.3 les représentations graphiques des modèles implémentés variant en redshift.

### I.2.3 Sélection des modèles

Avec la multitude de modèles possibles pour établir nos HOSTLIB, nous avons dû effectuer une sélection. Étant donné que notre but est d’associer de manière cohérente un âge de SN définie par un redshift et une masse de galaxie hôte, une caractéristique primordiale au modèle choisi est d’avoir une évolution de la fraction de jeunes SNe Ia physiquement cohérente avec les observations ; nous nous attendons notamment à ce que la fraction de jeunes étoiles soit  $\approx 1$  pour les  $M_* \gtrsim 10^7 M_\odot$ , diminue progressivement jusqu’à  $\approx 50\%$  pour  $M_* \approx 10^{10} M_\odot$  et continue sa progression vers 0 pour  $M_* > 10^{10} M_\odot$  ; en effet, la position de la marche de magnitude basée sur la masse est à  $M_* = 10^{10} M_\odot$  et cette limite constitue un bon indicateur de l’âge d’une SN Ia d’après BRIDAY et al. (2022).

**Tableau I.3** – Comparaison de la capacité relative de chaque modèle à décrire les données selon l'échantillon d'ajustement.

| Échantillon  | N <sub>SNe Ia</sub> | Howell ( $k = 4$ ) |        |      | Howell+asym ( $k = 5$ ) |        |      | Howell asym ( $k = 6$ ) |        |      |
|--------------|---------------------|--------------------|--------|------|-------------------------|--------|------|-------------------------|--------|------|
|              |                     | -2 ln( $L$ )       | AIC    | ΔAIC | -2 ln( $L$ )            | AIC    | ΔAIC | -2 ln( $L$ )            | AIC    | ΔAIC |
| SNf          | 114                 | 230,0              | 238,0  | –    | 229,8                   | 239,8  | -1,8 | 229,7                   | 241,7  | -3,7 |
| SEDSNf       | 110                 | 223,9              | 231,9  | –    | 221,4                   | 231,4  | 0,6  | 221,3                   | 233,3  | -1,4 |
| Fiduciel     | 544                 | 1534,3             | 1542,3 | –    | 1534,3                  | 1544,3 | -2,0 | 1531,0                  | 1543,0 | -0,7 |
| SED Fiduciel | 548                 | 1546,6             | 1554,6 | –    | 1546,5                  | 1556,5 | -1,9 | 1538,7                  | 1550,7 | 4,0  |

**Notes.** Pour chaque modèle considéré, nous indiquons son nombre de paramètres libres  $k$ , et pour chaque échantillon étudié son  $-2 \ln(L)$  (voir Équation I.3), son AIC et la différence d'AIC ( $\Delta\text{AIC}$ ) entre ce modèle et le modèle Howell, choisi comme référence car présentant l'AIC le plus faible pour 6 comparaisons sur 8.

Nous avons étudié cette évolution pour les différents modèles implémentés, dont les résultats sont présentés Figure I.4.

Nous trouvons alors que tous les modèles finissent par présenter une remontée de la fraction de jeunes étoiles quand la masse  $M_* > 10^{11}\text{M}_\odot$ , sauf le modèle Howell ajusté sur l'échantillon SEDSNf. Cela provient de l'incertitude des courbes Gaussiennes des sous-populations jeunes étant bien plus larges que celles des sous-populations vieilles, donnant pour les masses élevées un rapport de probabilité en faveur des jeunes SNe Ia. Ceci ne correspondant pas à une réalité physique, nous rejetons tous les modèles Howell+asym et Howell asym de notre étude à partir de ces résultats. Parmi les modèles Howell, seul celui ajusté sur SNf passe en effet par 50% à  $M_* = 10^{10}\text{M}_\odot$ .

Nous conservons ainsi les modèles suivants :

- 1) Le modèle Howell ajusté sur SEDSNf;
- 2) Le modèle Howell ajusté sur SNf;

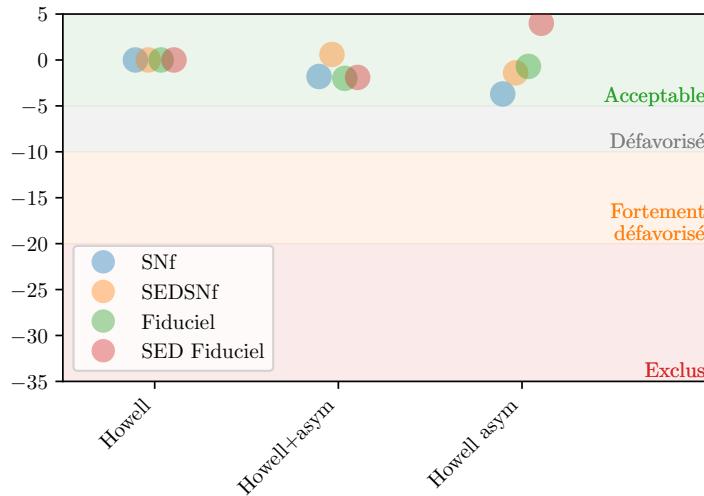
et pour reproduire artificiellement la descente de la fraction de jeunes étoiles en fonction de la masse attendue, nous avons également :

- 3) « SNfsupp » (« suppressed », « réprimé ») : le modèle Howell ajusté sur SNf, mais pour lequel les objets de  $M_* > 10^{11}\text{M}_\odot$  sont automatiquement associés à des SNe Ia âgées.

Nous prenons le modèle SNfsupp comme référence ; les implications du choix de modélisation de masse est discuté Section I.6. Les valeurs des paramètres des modèles SEDSNf et SNf sont indiquées Tableau I.4.

**Tableau I.4** – Valeurs des paramètres issus des meilleurs ajustement du modèle Howell sur les échantillons SNf et SEDSNf.

| Échantillon | $\mu_y$         | $\sigma_y$      | $\mu_o$          | $\sigma_o$      |
|-------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|
| SNf         | $9.36 \pm 0.06$ | $0.64 \pm 0.04$ | $10.58 \pm 0.04$ | $0.38 \pm 0.04$ |
| SEDSNf      | $9.32 \pm 0.07$ | $0.58 \pm 0.05$ | $10.34 \pm 0.07$ | $0.51 \pm 0.06$ |



**FIGURE I.2** –  $\Delta\text{AIC}$  entre le modèle Howell et les autres modèles (voir Tableau I.3). Tous les modèles sont dérivants. Les marqueurs bleus, orange, verts, rouges montrent les résultats lorsque l’analyse est effectuée sur l’échantillon SNf, SEDSNf, fiduciel, fiduciel avec SEDSNf, respectivement (voir légende). Les bandes de couleur illustrent la validité des modèles, d’acceptable ( $\Delta\text{AIC} > -5$ ) à exclu ( $\Delta\text{AIC} < -20$ ). En suivant ces valeurs d’AIC, tous les modèles sont compatibles entre eux.

#### I.2.4 Génération des HOSTLIB

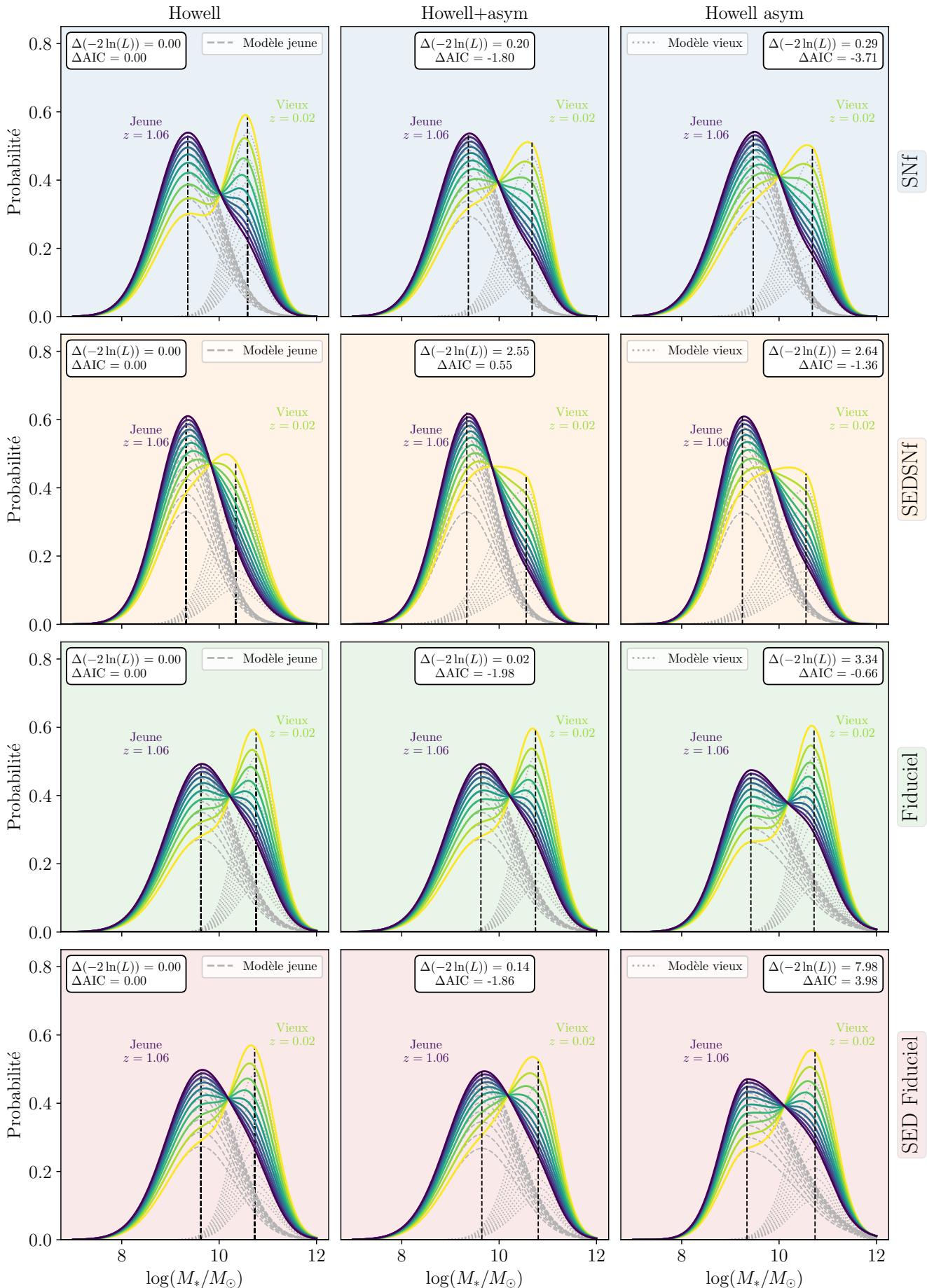
Avec les modélisations de la masse et de l’étirement en fonction du redshift, nous pouvons à présent lire les entrées des **HOSTLIB** BP, et à partir d’un redshift générer une liste de masses et d’étirements. Cela nous permettra ensuite de faire correspondre la masse de la **HOSTLIB** avec celles de la liste générée, et d’attribuer une valeur d’étirement qui remplacera celle de **BP**.

Cette étape est réalisée avec le module Python **SNprop**<sup>2</sup>. Ce processus prend la fraction attendue de jeunes étoiles en utilisant  $\delta(z)$  donnée Équation ???. Il assigne une qualité « jeune » ( $\text{LsSFR} = 1$ ) ou « vieille » ( $\text{LsSFR} = 0$ ) au tirage qui va suivre en prenant un nombre aléatoire  $r$  entre 0 et 1 et en le comparant à la valeur de la fraction susmentionnée. Si  $r < \delta(z)$ , alors la SN simulée sera jeune et inversement. Plus  $z$  augmente et plus  $\delta(z)$  augmente, et donc plus la probabilité d’être assigné jeune augmente. Ceci est présenté Figure I.5.

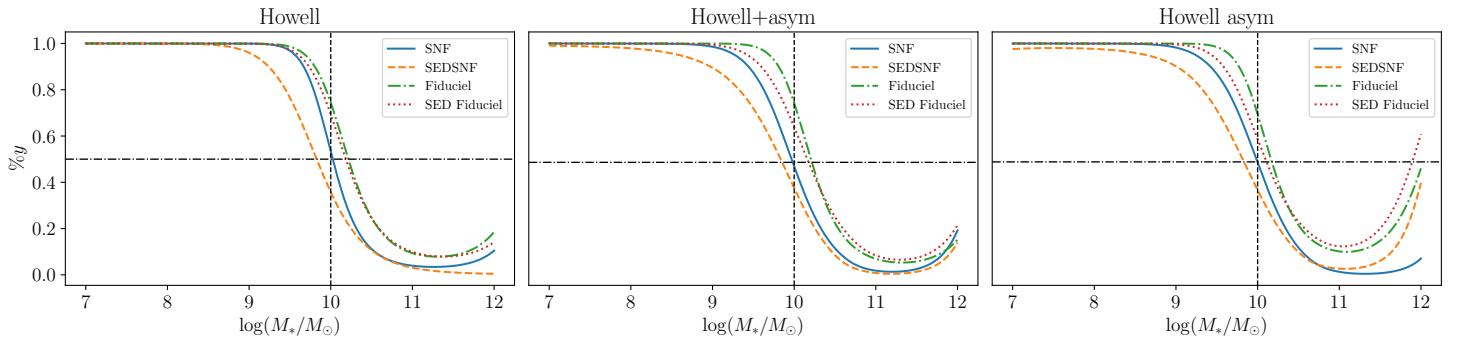
Cette étape est réalisée 1000 fois pour chaque redshift de la **HOSTLIB**, donnant une table de redshift, âge (0 ou 1), masse et étirement de 1000 entrées, puis une correspondance est effectuée entre toutes les masses tirées et la masse de la **HOSTLIB** pour trouver celle qui en est la plus proche. Nous prenons alors la valeur d’étirement associée et remplaçons celle de la **HOSTLIB**. Au même moment, nous entrons la valeur de l’âge (0 ou 1) dans une nouvelle colonne ; ceci conclut la confection des **HOSTLIB NN**.

Les **HOSTLIB NR** possèdent un autre colonne supplémentaire, où à chaque valeur d’âge est associée une valeur de variation de magnitude, de +0,065 mag pour les jeunes (moins lumineuses) et de -0,065 mag pour les vieilles (plus lumineuses), qui remplacent les valeurs de marche de magnitude basées sur la masse implémentées dans les autres approches et qui sont associées au **WEIGHTMAP**.

2. <https://github.com/MickaelRigault/snprop>



**FIGURE I.3** — Modèles implémentés et testés dans l'étude de l'évolution de la masse avec le redshift. Les modèles Howell, Howell+asym et Howell asym sont tracés dans la colonne de gauche, du milieu et de droite, respectivement. Les échantillons sur lesquels ils sont ajustés correspondent aux lignes et à la couleur de fond du graphique : SNf (bleu), SEDSNf (orange), fiduciel (vert), fiduciel avec SEDSNf (rouge); ce sont les mêmes couleurs que dans la Figure I.2. Les quantités  $\Delta(-2 \ln(L))$  et  $\Delta AIC$  par rapport au modèle Howell de chaque ligne sont indiquées pour chaque modèle figure. Nous avons tracé dix réalisations des modèles selon la valeur du redshift moyen considéré, de la valeur la plus basse de notre échantillon ( $z = 0.02$ ) à la valeur maximale des données totales (sans coupe en redshift) de SNLS ( $z = 1.06$ ) représentés en couleur allant du jaune (bas redshift, plus vieil environnement) au violet (haut redshift, environnement jeune) et les distributions des populations jeune et vieille constituant le modèle total sont en gris pointillé et fin pointillé, respectivement. Nous y retrouvons l'information que tous les modèles sont compatibles en tant que bonnes représentations des données par rapport au modèle de base.

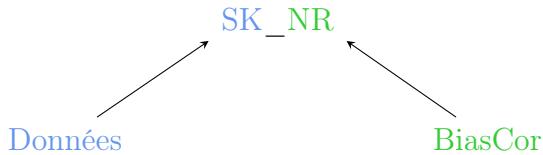


**FIGURE I.4** – Comparaison de la prédiction de l’évolution de la fraction de jeunes SNe Ia ( $\%y$ ) en fonction de la masse de la galaxie hôte ( $M_*$ ) pour chaque modèle et selon chaque échantillon utilisé pour l’ajustement. Alors que le sens de variation devrait être constant, pratiquement tous les modèles finissent par remonter après  $M_* \approx 10^{11} M_\odot$ , sauf le modèle Howell ajusté sur SEDSNf. Nous excluons les modèles Howell+asym et Howell asym par ce critère.

### I.2.5 Implémentation

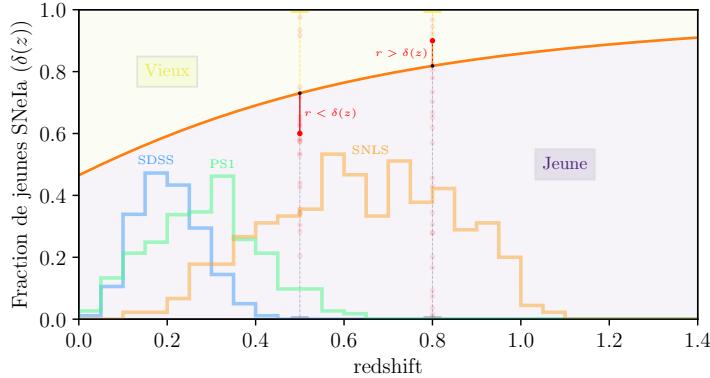
Nous pouvons implémenter différentes manières d’effectuer ces simulations, que nous appelons « types ». Une approche serait de simuler 100 fois des échantillons de la taille de l’échantillon de Pantheon ( $\approx 1000$ ) et de combiner les résultats, permettant ainsi d’avoir des incertitudes statistiques réalistes. Bien que nous ayons entamé la réalisation d’une telle approche, le plus simple et moins coûteux en temps a été de simuler un échantillon d’une taille conséquente ( $\approx 13\,000$ ) avec un BiasCor 50 fois plus grand, donnant une idée de l’incertitude systématique due aux différents modèles de corrélations (SK, BP, NN, NR).

Pour quantifier cela, nous conservons les données simulées et les échantillons BiasCor associés de chaque modélisation, afin d’utiliser les données d’un modèle et de les corriger avec le BiasCor d’un autre : l’idée derrière cette pratique est de connaître le potentiel biais dû au fait de méconnaître la physique réelle qui régit les propriétés intrinsèques des SNe Ia. Pour les distinguer, nous les nommons de la manière suivante :



Ainsi, « SK\_NR » décrit un échantillon dont les données ont été générées en supposant les modèles de corrélations de SK et corrigées avec des données générées en supposant les modèles de corrélations dus à l’âge.

Pour comparer de manière cohérente les données simulées aux données réelles, il faut que le ratio des données de chaque sondage de l’échantillon simulé corresponde au ratio des données de chaque sondage de l’échantillon réel. Ceci s’effectue *via* un paramètre appelé NGEN, décrivant le nombre d’années de sondage simulé. Il permet de contrôler plus ou moins précisément le nombre de SNe Ia simulées, puisque chaque sondage a sa propre efficacité spectroscopique qui, à chaque simulation, opère une sélection des données conservées (voir Chapitre ??). Notamment, puisque l’efficacité spectroscopique de l’échantillon LOWZ est particulièrement faible, il nécessite un grand NGEN dans nos fichiers de configurations.



**FIGURE I.5** – Représentation du choix de l’âge d’une SN et de l’assignation de masse et d’étirement en fonction du redshift du module Python `SNprop`<sup>2</sup>. Orange : fraction estimée de jeunes SNe Ia en fonction du redshift. *Histogrammes* : nombres de SNe Ia des 3 sondages principaux de l’échantillon Pantheon (SCOLNICK et al. 2018) (pas à l’échelle). *Lignes verticales* : pour chaque  $z$  de la `HOSTLIB`, un nombre aléatoire  $r$  entre 0 et 1 est tiré : s’il est supérieur (inférieur) à  $\delta(z)$  à ce redshift, alors la SN sera assignée vieille (jeune) et les valeurs de masse et d’étirement générées seront tirées des distributions sous-jacentes vieilles (jeunes) des paramètres correspondants.

De plus, la correction par BBC réduit l’échantillon en ne conservant que les données qui sont dans un intervalle de BiasCor avec suffisamment de points pour avoir une valeur de correction. Nous indiquons dans le Tableau I.5 le nombre de données pour les données réelles et pour nos simulations, exprimées en pourcentages de l’échantillon Pantheon.

## Résumé

Ainsi, nous avons implémenté dans `SNANA` les différentes corrélations sous-jacentes et modélisations des propriétés des SNe Ia des études de SK, BP, ? et de cette thèse (NR) via le biais de `HOSTLIB`. Ces simulations nous permettent de générer un échantillon corrigé des biais reproduisant les observations des sondages LOWZ, SDSS, PS1 et SNLS comprenant  $\approx 13\,000$  données. Ces différentes modélisations peuvent être combinées entre elles pour tester la qualité des hypothèses sous-jacentes et le possible biais dû au fait de mal corriger les SNe Ia. Nous traitons maintenant de la qualité d’ajustement des données simulées aux données réelles.

## I.3 Comparaison des données simulées aux données réelles

Avant de comparer les résultats cosmologiques, nous nous sommes intéressés à la correspondance entre les données simulées et les données réelles afin d’apprécier les implications sur les distributions des différentes modélisations. Nous présentons dans cette section les différents diagnostics nous permettant de comparer à la fois graphiquement et numériquement l’accord entre les données simulées et données réelles. Pour avoir une comparaison efficace, nous effectuons une sélection aléatoire des données de chaque sondage pour reproduire les ratios attendus. Les quantités de données de ces mesures, exprimées

**Tableau I.5** – Nombre de données après l’ajustement par BBC et après l’échantillonnage nécessaire à la reproduction des ratio observés dans l’échantillon Pantheon ([SCOLNICK et al. 2018](#)).

| Données  | BiasCor | Après BBC     |       |      |       |       |
|----------|---------|---------------|-------|------|-------|-------|
|          |         | Total (%)     | LOWZ  | SDSS | PS1   | SNLS  |
| Pantheon |         | 1022          | 172   | 335  | 279   | 236   |
| SK       | SK      | 13333 (13.05) | 13.64 | 7.29 | 19.63 | 13.00 |
|          | BP      | 12847 (12.57) | 13.31 | 7.00 | 19.24 | 12.06 |
|          | NN      | 12898 (12.62) | 13.03 | 7.01 | 19.40 | 12.27 |
|          | NR      | 12898 (12.62) | 13.03 | 7.01 | 19.40 | 12.27 |
| NN       | SK      | 12316 (12.05) | 10.50 | 6.71 | 18.10 | 13.61 |
|          | BP      | 12462 (12.19) | 10.59 | 6.77 | 18.66 | 13.42 |
|          | NN      | 12397 (12.13) | 10.02 | 6.76 | 18.68 | 13.55 |
|          | NR      | 12397 (12.13) | 10.02 | 6.76 | 18.68 | 13.55 |
| BP       | SK      | 12439 (12.17) | 12.59 | 6.54 | 17.87 | 13.12 |
|          | BP      | 12478 (12.21) | 12.51 | 6.57 | 18.33 | 12.75 |
|          | NN      | 12787 (12.51) | 13.09 | 6.61 | 18.73 | 13.11 |
|          | NR      | 12787 (12.51) | 13.09 | 6.61 | 18.73 | 13.11 |
| NR       | SK      | 12461 (12.19) | 13.01 | 6.60 | 17.89 | 12.81 |
|          | BP      | 12475 (12.21) | 12.88 | 6.62 | 18.32 | 12.41 |
|          | NN      | 12798 (12.52) | 13.49 | 6.70 | 18.72 | 12.76 |
|          | NR      | 12798 (12.52) | 13.49 | 6.70 | 18.72 | 12.76 |

**Notes.** Les pourcentages sont indiqués par rapport à la taille de l’échantillon Pantheon, voir première ligne. Les sous-échantillons simulés sont indiqués en pourcentages directement.

en pourcentages de l'échantillon Pantheon, sont égales aux ratios du plus petit sondage simulé des données non échantillonnées : ceux de la colonne « SDSS » du Tableau I.5.

Nous rappelons que les modèles BP et SK utilisent des distributions des paramètres spécifiquement ajustés aux données ; BP utilisent des distributions gaussiennes asymétriques, avec 3 paramètres libres, dans des intervalles de  $0.2 \times 10^{10} M_\odot$  (10 pour LOWZ, 20 pour HIGHZ) pour reproduire l'étirement des SNe Ia ; SK incluent également des distributions gaussiennes asymétriques, une pour chacun des sondages SDSS, PS1 et SNLS, et la distribution donnée Équation I.2 avec 6 paramètres libres, pour un total de  $k = 15$ . À l'inverse, les modélisations NN et NR reposent sur une modélisation prospective, basée sur une modélisation de l'étirement avec 5 paramètres libres, une modélisation de la masse avec 4 paramètres libres, et l'évolution de la fraction de jeunes étoiles de 2 paramètres libres ( $K, \Phi$ ).

Nous nous intéressons dans un premier temps à l'ajustement en 1 dimension des paramètres (Section I.3.1) avant de traiter l'aspect bi-dimensionnel (Section I.3.2).

### I.3.1 Accord entre les données : analyse uni-dimensionnelle

Nous présentons ici les résultats des simulations de paramètres de redshift, étirement et masse des différentes modélisations dont les représentations graphiques sont données Figure I.6.

Pour chacune des comparaison, nous calculons une valeur de  $\chi^2$ . Pour cela, nous normalisons les histogrammes des données simulées au nombre de données de Pantheon, puis calculons :

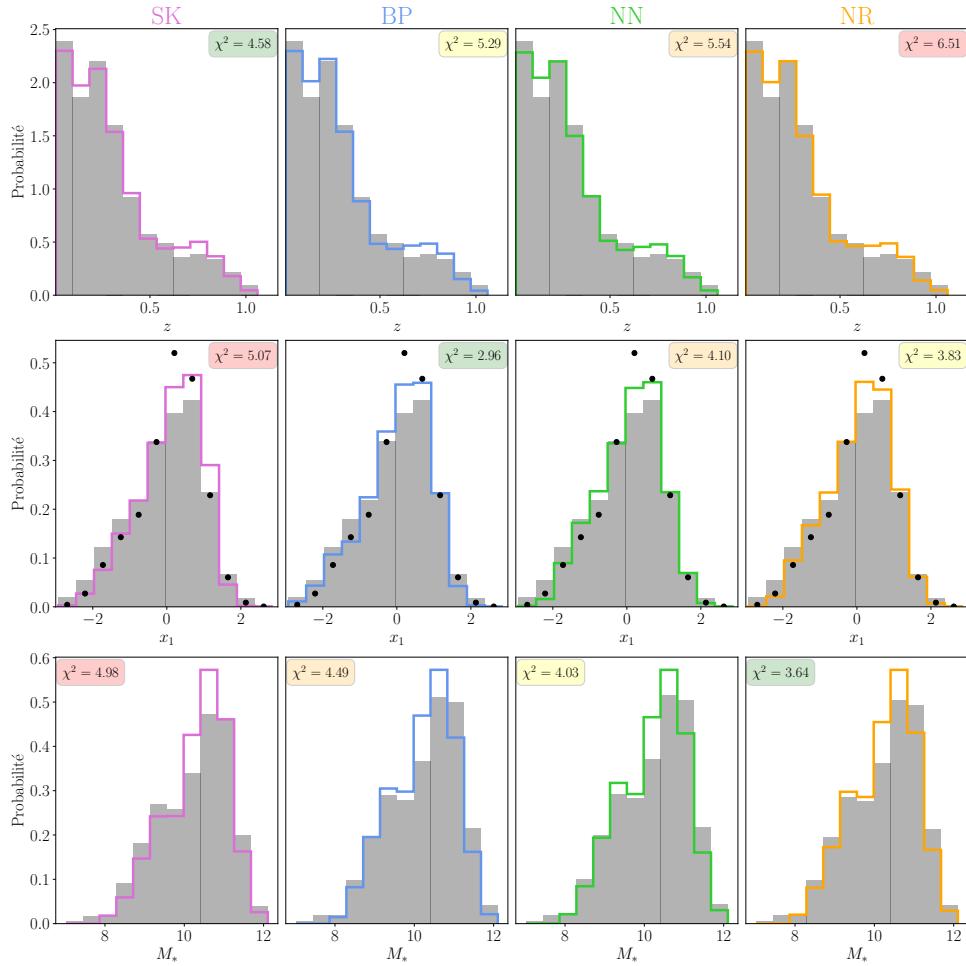
$$\chi^2 = \frac{1}{N} \times \sum_{i=0}^{N-1} \frac{(d_i - s_i)^2}{d_i + s_i} \quad (\text{I.5})$$

avec  $N$  le nombre d'intervalle des histogrammes et  $d_i$  ( $s_i$ ) le nombre de données réelles (simulées) dans l'intervalle  $i$ . Le meilleur accord est décrit par le  $\chi^2$  le plus petit. Les valeurs sont indiquées Tableau I.6.

**Tableau I.6** – Comparaison de la capacité de chaque simulation à représenter les données de redshift, d'étirement et de masse.

| Paramètre   | Modèle |       |       |       |
|-------------|--------|-------|-------|-------|
|             | SK     | BP    | NN    | NR    |
| Redshift    | 4.58   | 5.29  | 5.54  | 6.51  |
| Étirement   | 5.07   | 2.96  | 4.10  | 3.83  |
| Masse       | 4.98   | 4.49  | 4.03  | 3.64  |
| Somme       | 14.63  | 12.74 | 13.67 | 13.98 |
| Probabilité | 0.39   | 1.00  | 0.63  | 0.54  |

**Notes.** Pour chaque simulation, une sélection des données est réalisée pour correspondre aux ratios des données de Pantheon, et le calcul du  $\chi^2$  est la moyenne sur 100 de ces tirages à chaque fois.



**FIGURE I.6** – Histogrammes normés des données simulées (en lignes pleines colorées) et des données réelles (en gris) selon le modèle et le paramètre. *De gauche à droite* : résultats pour les modèles SK, BP, NN et NR, respectivement. *De haut en bas* : nombre de données simulées en fonction du redshift, de l'étirement et de la masse, respectivement. Les valeurs de  $\chi^2$  entre les données simulées et réelles sont indiquées dans le coin supérieur droit de chaque figure, et de vert à rouge du plus petit au plus grand. Nous indiquons en points noirs le modèle d'étirement de NN au redshift moyen de l'échantillon Pantheon.

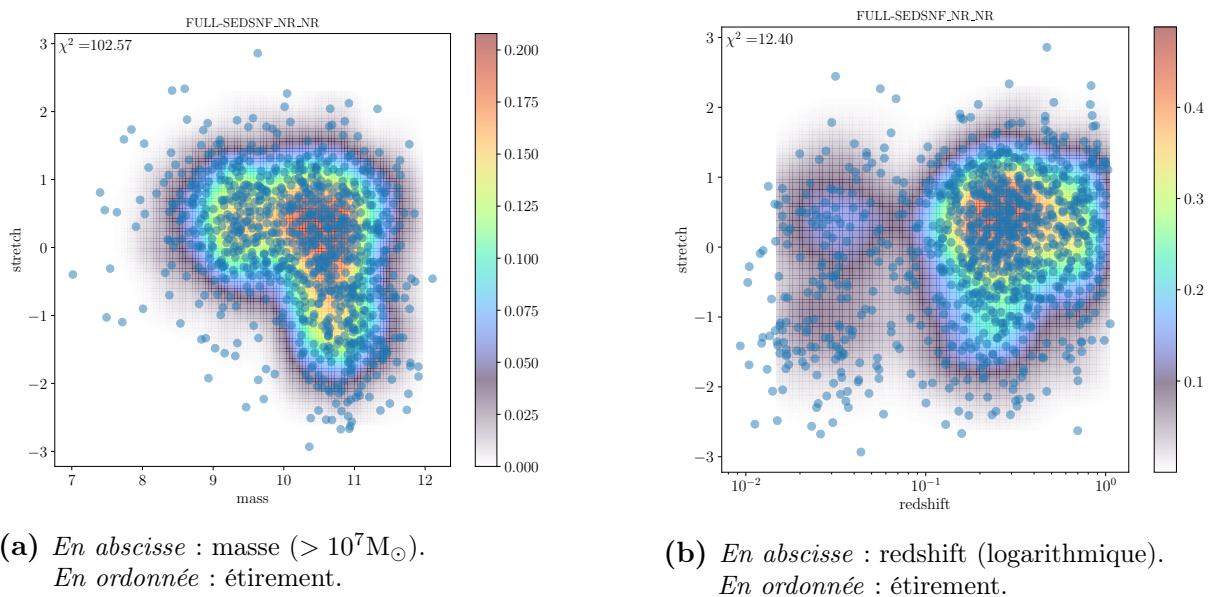
D'une manière globale, le modèle BP apparaît comme la meilleure description des données, NN et NR donnent des résultats similaires et SK a le moins bon accord. Pour le redshift cependant, c'est le modèle SK qui est le mieux ajusté aux données ; ceci correspond à nos attentes puisque leurs distributions d'étirements se divisent par redshift. Les modèles NN et NR ont par contre une certaine difficulté à reproduire la distribution de LOWZ, voir Figure ??, ce qui mène à leurs valeurs de  $\chi^2$ . Pour l'étirement, c'est BP qui décrit le mieux les données ; ceci correspond également à nos attentes puisque leurs distributions d'étirement sont nombreuses. Nous notons que cette fois NN et NR sont bien représentatives des données. Quant à la masse,

Les résultats sont cependant compatibles entre eux, et nous pouvons considérer tous ces modèles comme donnant de bonnes représentations des données.

### I.3.2 Accord entre les données : analyse bi-dimensionnelle

Nous étudions pour cela les distributions d'étirement en fonction du redshift et les distributions d'étirement en fonction de la masse de la galaxie hôte.

Nous représentons les distributions en histogrammes 2D en couleurs pour les données simulées, et en points dispersés pour les données réelles. Pour déterminer l'accord entre ces deux échantillons de manière quantitative, nous avons utilisé une estimation par noyau pour convertir les données simulées en densité de probabilité bi-dimensionnelle, permettant de calculer une probabilité totale traduisant l'accord entre les données réelles et le noyau. Deux exemples sont donnés Figure I.7, et les résultats sont indiqués I.7 : une plus grande probabilité représente un meilleur accord.



**FIGURE I.7** – Accord entre les données réelles et simulées avec le modèle SEDSNf pour les saveurs NR\_NR. L'estimation par noyau donnant la densité de probabilité est indiquée en couleur (voir la barre de couleur). L'accord est indiqué sous la forme d'un  $\chi^2$  en haut à gauche.

Pour discuter de ces résultats,

Nous notons que Nous observons que la modélisation **SK** est la meilleure des 4 sur la combinaison de ces des distributions ; la modélisation **BP** est deuxième, et les modélisations **NN** et **NR** on un score similaire les plaçant comme les modélisations les moins bien ajustées aux données.

## I.4 Résultats

What we want is not so much  $w$  than  $\Delta w$  wrt. best current work. We find x% and here are the contours.

## I.5 Discussion

We expected to have a higher/lower, and we got that.

**Tableau I.7** – Comparaison de la capacité de chaque simulation à représenter les données d'étirement et de masse d'une part, et d'étirement et de redshift d'autre part.

| Modèles | Probabilité  |                |        |
|---------|--------------|----------------|--------|
|         | $x_1$ vs $z$ | $x_1$ vs $M_*$ | Somme  |
| SK_SK   | 102,76       | 252,71         | 355,47 |
| BP_BP   | 103,16       | 246,34         | 349,50 |
| NN_NN   | 102,51       | 235,88         | 338,39 |
| NR_NR   | 102,35       | 235,88         | 338,23 |

**Notes.** Pour chaque simulation, une estimation par noyau bi-dimensionnelle est calculée sur les données simulées et utilisée pour déterminer chaque probabilité.

## I.6 Systématiques dues au choix du modèle de masse

## I.7 Conclusion

Should be nice.

## Figures

---

|     |  |    |
|-----|--|----|
| I.1 | $M_*$ en fonction du LsSFR des SNe Ia de SNfactory et modèle de masse sélectionné ajusté . . . . .                               | 6  |
| I.2 | $\Delta\text{AIC}$ entre le modèle Howell et les autres modèles . . . . .  | 8  |
| I.3 | Modèles implémentés et testés dans l'étude de l'évolution de l'étirement avec le redshift . . . . .                              | 9  |
| I.4 | Comparaison de la prédiction de l'évolution de la fraction de jeunes SNe Ia en fonction de la masse de la galaxie hôte . . . . . | 10 |
| I.5 | Représentation du choix de l'âge d'une SN et de l'assignation de masse et d'étirement en fonction du redshift . . . . .          | 11 |
| I.6 | Histogrammes uni-dimensionnels des données simulées et réelles . . . . .   | 14 |
| I.7 | Accord entre les données réelles et simulées avec le modèle SEDSNf pour les saveurs NR_NR . . . . .                              | 15 |

---

## Tableaux

---

|     |   |    |
|-----|---|----|
| I.1 | Paramètres des distributions d'étirement et de couleur pour les simulations SK . . . . .                              | 2  |
| I.2 | Paramètres de la distribution d'étirement pour l'échantillon LOWZ des simulations SK . . . . .                        | 3  |
| I.3 | Comparaison de la capacité relative de chaque modèle à décrire les données selon l'échantillon d'ajustement . . . . . | 7  |
| I.4 | Valeurs des paramètres issus des meilleurs ajustement du modèle Howell sur les échantillons SNf et SEDSNf . . . . .   | 7  |
| I.5 | Nombre de données de nos différentes simulations . . . . .  | 12 |
| I.6 | Comparaison de la capacité de chaque simulation à représenter les données en une dimension . . . . .                  | 13 |
| I.7 | Comparaison de la capacité de chaque simulation à représenter les données en deux dimensions . . . . .                | 16 |

---



## Bibliographie

- 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, ↑ Section I.2.3
- BURNHAM, KENNETH & ANDERSON D. R. 2004, « Multimodel Inference: Understanding AIC and BIC in Model Selection », *Sociological Methods & Research*, 33, 261 ↑ Section I.2.2
- HOWELL D. A., SULLIVAN M., CONLEY A. et CARLBERG R. 2007, « Predicted and Observed Evolution in the Mean Properties of Type Ia Supernovae with Redshift », *ApJ*, 667, L37 ↑ Section I.2.1
- NICOLAS N., RIGAULT M., COPIN Y. et al. 2021, « Redshift evolution of the underlying type Ia supernova stretch distribution », *A&A*, 649, A74 ↑ Section I.1.3, ↑ Section I.2.2, ↑ Section I.6, ↑ Section I.3.2
- POPOVIC B., BROUT D., KESSLER R., SCOLNIC D. et LU L. 2021, « Improved Treatment of Host-galaxy Correlations in Cosmological Analyses with Type Ia Supernovae », *ApJ*, 913, 49 ↑ Section I.1, ↑ Section I.1.2, ↑ Section I.2.4, ↑ Section I.2.5, ↑ Section I.3, ↑ Section I.3.2
- 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.1.4, ↑ Section I.2.1, ↑ Section I.1
- SCOLNIC D. et KESSLER R. 2016, « Measuring Type Ia Supernova Populations of Stretch and Color and Predicting Distance Biases », *ApJ*, 822, L35 ↑ Section I.1, ↑ Section I.1.1, ↑ Section I.2, ↑ Section I.2.5, ↑ Section I.2.5, ↑ Section I.3, ↑ Section I.3.2
- 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.1, ↑ Section I.1.1, ↑ Section I.2, ↑ Section I.5, ↑ Section I.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.2.1