

# Application d'HyperGal à la Data Release 2 de ZTF

## Sommaire

|       |   |           |
|-------|---|-----------|
| 9.1   | Présentation de la DR2 de ZTF . . . . .                       | <b>2</b>  |
| 9.2   | Statistiques sur les supernovae de type Ia . . . . .          | <b>3</b>  |
| 9.2.1 | Classification spectrale . . . . .                            | <b>3</b>  |
| 9.2.2 | <i>Golden sample</i> . . . . .                                | <b>4</b>  |
| 9.2.3 | Redshift et profondeur . . . . .                              | <b>5</b>  |
| 9.2.4 | Courbes de lumière . . . . .                                  | <b>8</b>  |
| 9.3   | Vers la cosmologie . . . . .                                  | <b>13</b> |
| 9.3.1 | Taux d'expansion ( $H_0$ ) . . . . .                          | <b>13</b> |
| 9.3.2 | Équation d'état de l'énergie sombre ( $w$ ) . . . . .         | <b>13</b> |
| 9.3.3 | Taux d'accroissement des structures ( $f\sigma_8$ ) . . . . . | <b>13</b> |

L'amélioration apportée par la modélisation hyperspectrale de la galaxie hôte avec **HYPERGAL** a convaincu la collaboration de son utilisation en surcouche du pipeline **PYSEDm**. Finalement, il a été convenu que toutes les SNe observées par la SEDm appartenant à la Data Release 2 du groupe *Type Ia Supernovae & Cosmology* soient ré-extraites par **HYPERGAL**.

Dans ce chapitre nous présentons cette seconde Data Release (DR2 par la suite) et la part apportée par **HYPERGAL** dans ce nouvel échantillon de supernovae. Nous commencerons par apporter une vue d'ensemble de la DR2, puis nous présenterons quelques statistiques faites sur les SNeIa. Enfin nous discuterons des possibilités sur la dérivation de paramètres cosmologiques.

## 9.1 Présentation de la DR2 de ZTF

La DR2 de ZTF est le premier jeu de données homogène constitué de plusieurs milliers de supernovae de type Ia, chacune d’entre elles ayant été classifiées spectralement, et possédant un redshift spectroscopique, soit par leur galaxie hôte, soit par leur caractéristiques spectrales.

Cette seconde data release consistera en une série d’articles qui paraîtront courant 2022. Nous nous concentrons ici sur une présentation générale des données qui seront utilisées pour ces papiers, en mettant en évidence le rôle d’HYPERGAL et de la SEDm.

Comme abordé dans le chapitre ?? de ce manuscrit dédié à la présentation de ZTF, la DR2 est basée sur la première phase d’observation, s’étalant de Mars 2018 à Décembre 2020.

Durant cette période, ZTF a pris 480,572 images, dont 89% (431,202) ne présentant aucun avertissement de mauvaise qualité. La Table 9.1 présente quelques statistiques médianes de ces expositions en distinguant les trois filtres de la caméra. Parmi ces images ayant franchies les critères de qualité, 57% sont obtenues avec le filtre  $ZTF_r$ , 38% avec  $ZTF_g$  et 5% avec  $ZTF_i$ .

TABLE 9.1 – Statistiques médianes effectuées à partir des 431k expositions prises par ZTF durant sa phase 1.

| Filtre | Nombre d’<br>Exposition | Seeing<br>[arcsec] | Masse d’<br>Air | Magnitude<br>Limite $[5\sigma]$ | Cadence |
|--------|-------------------------|--------------------|-----------------|---------------------------------|---------|
| ztf :g | 165k                    | 2.2                | 1.7             | 20.56                           | 2.05    |
| ztf :r | 247k                    | 2.0                | 1.2             | 20.39                           | 1.02    |
| ztf :i | 19k                     | 1.8                | 1.1             | 20.03                           | 5.03    |
| All    | 431k                    | 2.1                | 1.2             | 20.42                           | 2.96    |

**Note.** Seules les images ne présentant aucun avertissement de mauvaise qualité sont considérées.

Nous montrons également dans la Figure 9.1 le nombre total d’exposition et la cadence moyenne pour chaque filtre. En excluant la zone de la Voie Lactée, nous pouvons distinguer une partie du ciel dite "haute cadence", vers (RA=30deg, Dec=230deg), représentant  $\sim 1800\text{deg}^2$ . La limite du ciel Nord observable est également facilement discernable. Le champ de vue avec "haute cadence" sont conçus par le relevé dans le but d’avoir des expositions multiples de la même nuit, principalement dans les filtres  $r$ , et  $g$ , dans le but de détecter les supernovae dans les premières heures d’explosion (Bruch et al. 2021 ; Deckers et al. 2022), ou des événements transitoires très brefs.

Hormis ces cas particuliers, la cadence typique est de 2 à 3 jours dans les bandes  $r$  et  $g$ , en accord avec ce qui est convenu dans le programme public Mid-scale Innovations Program (MSIP). La cadence dans la bande  $i$  est de 5 jours. Cette consistance dans les expositions de chacune des 3 bandes permet d’une part de bien échantillonner les courbes de lumière des SNeIa, et d’autre part de ne rater aucune ou très peu de SNeIa que nous offre la nature. La seule limite de complétude de l’échantillon est donc la profondeur en magnitude des instruments. Nous discutons de cette limite de complétude dans la section suivante.

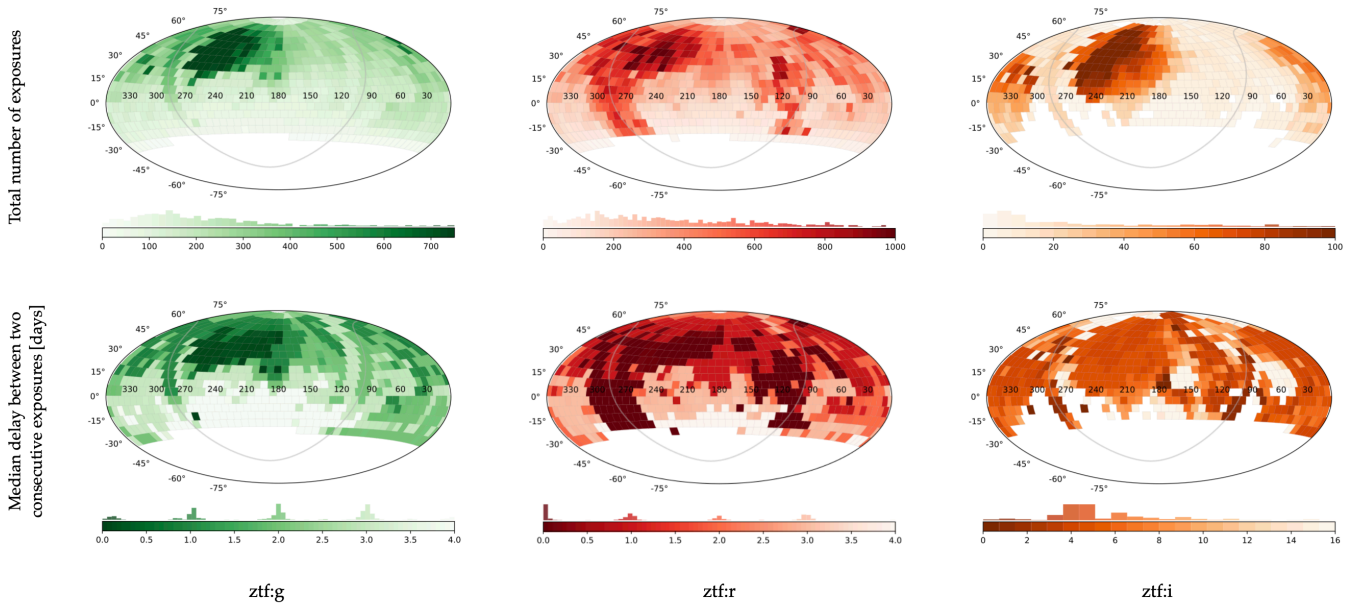


FIGURE 9.1 – Statistiques de la couverture du ciel de la phase 1 de ZTF, pour chaque bande et chaque champ. Seules les images remplissant les seuils de qualité (431, 202) sont considérées. La bande grise sur chaque image représente la Voie Lactée ( $b = 0$ ). *En haut* nous montrons le nombre total d’exposition par champ et par filtre. *En bas* est présenté le délai médian entre deux expositions successives.

## 9.2 Statistiques sur les supernovae de type Ia

### 9.2.1 Classification spectrale

Seules les SNeIa ayant été classifiées spectralement sont considérées dans la DR2. Nous montrons dans la Figure 9.2 la distribution de tous les spectres appartenant à la DR2, répartis par l’instrument de classification, et la quantité de SNeIa individuelles. La DR2 complète, sans restriction de qualité sur les courbes de lumières, est composé de 3742 supernovae de type Ia, pour lesquelles 5763 spectres ont été extraits et utilisés pour la classification. Environ 61.7% des spectres ont été obtenus avec la SEDm, et donc extraits par HYPERGAL, ainsi qu’une proportion similaire (61.5%) de SNIa unique.

Le reste des spectres proviennent d’autres relevés possédant un spectrographe de plus haute résolution que la SEDm, et utilisés occasionnellement par l’équipe du groupe *Bright Transient Survey* (BTS) ou via des requêtes de membres de la collaboration ZTF. D’autres spectres sont également rendus publique par certains programmes, comme par exemple ePESSTO utilisant le *New Technology Telescope* (NTT) (SMARTT et al., 2015).

Près de 80% de ces SNeIa font partie de l’échantillon BTS. Leur relevé est conçu pour fournir un échantillon de supernovae purement limité par leur magnitude ( $m < 19$  mag pour la détection, et  $m < 18.5$  mag pour la classification), comme expliqué dans FREMLING et al. (2020); PERLEY et al. (2020). Les SNeIa étant visibles plusieurs semaines, la haute cadence des filtres  $g$  et  $r$  dans tout le ciel Nord permet de n’en manquer que très rarement (caméra hors service, ou mauvais temps sur une longue période par exemple). PERLEY et al. (2020) ont montré en se basant sur 25.5 mois d’acquisition (ZTF MSIP de mars 2018

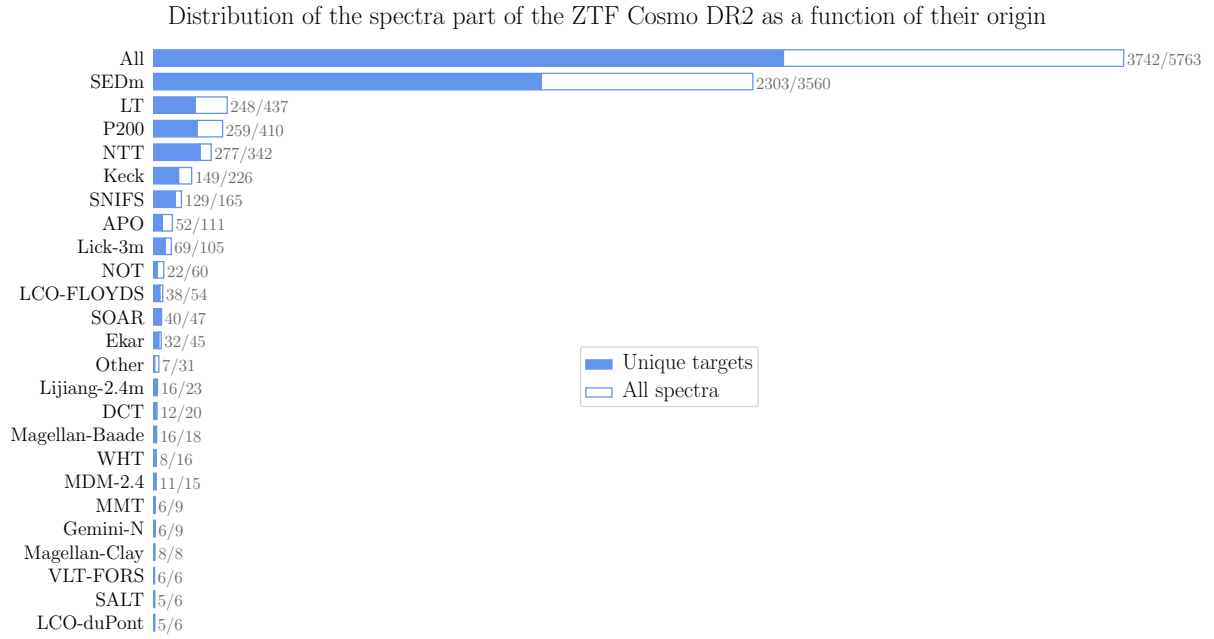


FIGURE 9.2 – Distribution des spectres appartenant à la DR2 de ZTF suivant leur origine. Les barres entières de la figure indique la quantité de spectres extrait par tel ou tel instrument, la partie en bleu pleine indique le nombre de SNeIa unique correspondant. Une large majorité de spectre et de SNeIa ( $\sim 62\%$ ) ont été obtenues avec le spectrographe dédié à ZTF, la SEDm, et extraites par HYPERGAL.

à mi-2020), que l’échantillon BTS était spectroscopiquement complet à 97%, 93% et 75% aux magnitudes limites  $< 18$  mag,  $< 18.5$  mag et  $< 19$  mag respectivement.

Dans notre cas, notre échantillon DR2 contient près de 20% de SNeIa supplémentaires à celui de BTS.

Nous montrons dans la Figure 9.3 le pic en magnitude dans la bande  $g$  de ZTF, dérivée à partir de l’ajustement SALT2 des courbes de lumières sur les SNeIa (classifiées spectralement) de la DR2. Nous montrons également la part de SNeIa appartenant également à l’échantillon BTS par intervalle de magnitude. La fraction de SNeIa de notre échantillon appartenant également à celui de BTS décroît fortement aux magnitudes  $> 18.75$  mag, avant que les SNeIa uniques à la DR2 dominent clairement au delà de 19 mag. Cette observation nous laisse penser que notre échantillon de SNeIa est, à minima, spectroscopiquement aussi complet que celui de BTS, et peut potentiellement être complet à  $\sim 100\%$  jusqu’à 18.75 mag. On observe ensuite une décroissance brutale de cette complétude dans l’intervalle 18.75-19 mag.

### 9.2.2 Golden sample

Nous allons nous concentrer dans la suite de ce chapitre sur le *golden sample* de la DR2 de ZTF, sous-échantillon de la DR2 complète qui sera utilisé pour la cosmologie. Cet échantillon est contraint par les critères de qualité sur l’ajustement des courbes de lumière par SALT2 que nous avons détaillés au chapitre ?? (détections photométrique à  $5\sigma$ , 7 points avant et 7 points après le maximum dans au moins 2 bandes). D’autres critères

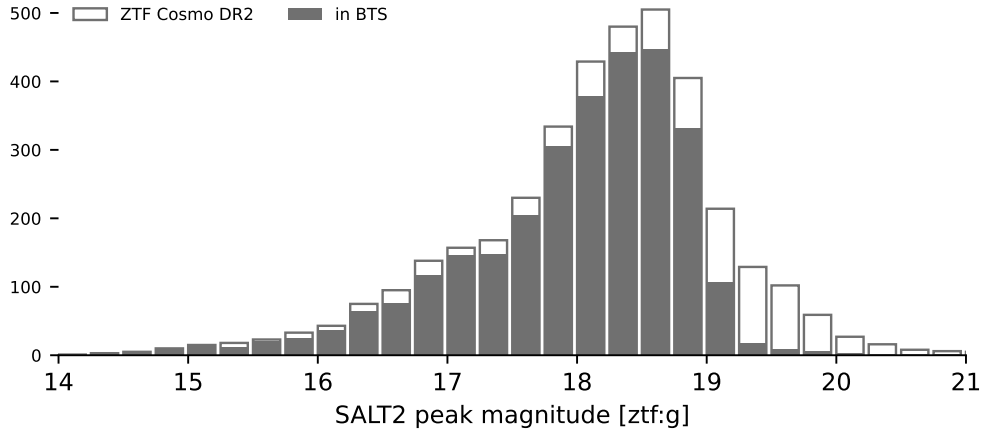


FIGURE 9.3 – Distribution du pic en magnitude dans la bande  $g$  de ZTF des SNeIa de la DR2, dérivées à partir de l’ajustement SALT2 des courbes de lumière. La partie noire de la distribution correspond à la proportion de supernovae également incluses dans l’échantillon BTS (FREMLING et al., 2020; PERLEY et al., 2020).

numériques sur la qualité d’ajustement des courbes de lumière sont également utilisés, que nous n’aborderons pas ici.

Nous montrons dans la Figure 9.4 la nouvelle distribution des spectres appartenant au *golden sample* de la DR2. Cet échantillon est composé de 2547 supernovae de type Ia, pour lesquelles 3903 spectres ont été extraits et utilisés pour la classification. Environ 65.1% des spectres ont été obtenus avec la SEDm, et donc extraits par HYPERGAL, ainsi qu’une proportion similaire (65.3%) de SNIa unique.

### 9.2.3 Redshift et profondeur

Comme expliqué au chapitre ?? présentant ZTF, seules  $\sim 40\%$  des SNeIa possèdent un redshift spectroscopique provenant de leur galaxie hôte (principalement du relevé spectroscopique SDSS). Les redshift manquant proviennent des caractéristiques spectrales des SNeIa à hauteur de  $\sim 50\%$ , ou de raies d’émission de contamination de la galaxie hôte ( $\sim 10\%$ ). Cependant, les redshifts obtenus par le spectre des SNe sont précis à environ 5‰, suffisant pour certaines études (hôte-corrélation, populations ...) mais insuffisant pour la cosmologie. Cependant, plus de 95% des galaxies hôtes ont une magnitude supérieur à 20 mag, ce qui signifie que d’autres relevés (comme par exemple DESI) pourraient à posteriori mesurer et fournir les redshift manquant.

Nous montrons dans la Figure 9.5 la corrélation redshift/pic de magnitude ( $ZTF_g$ ) ainsi que leur distribution pour le *golden sample* de la DR2. Afin de mettre en évidence le rôle de la SEDm, nous indiquons en bleu toutes les SNeIa dont le spectre a été extrait par HYPERGAL et en rouge toutes celles extraites avec un autre instrument.

La distribution des magnitudes au maximum n’est pas sans rappeler celle de l’échantillon complet, présenté précédemment dans la Figure 9.3. Les spectres obtenus avec la SEDm sont clairement dominant ( $\sim 80\%$ ) jusqu’à une magnitude de 19 mag. Nous voyons clairement sur la figure la coupure à cette luminosité, laissant place au delà à une dominance nette des

Distribution of the quality flag sample spectra part of the ZTF Cosmo DR2 as a function of their origin

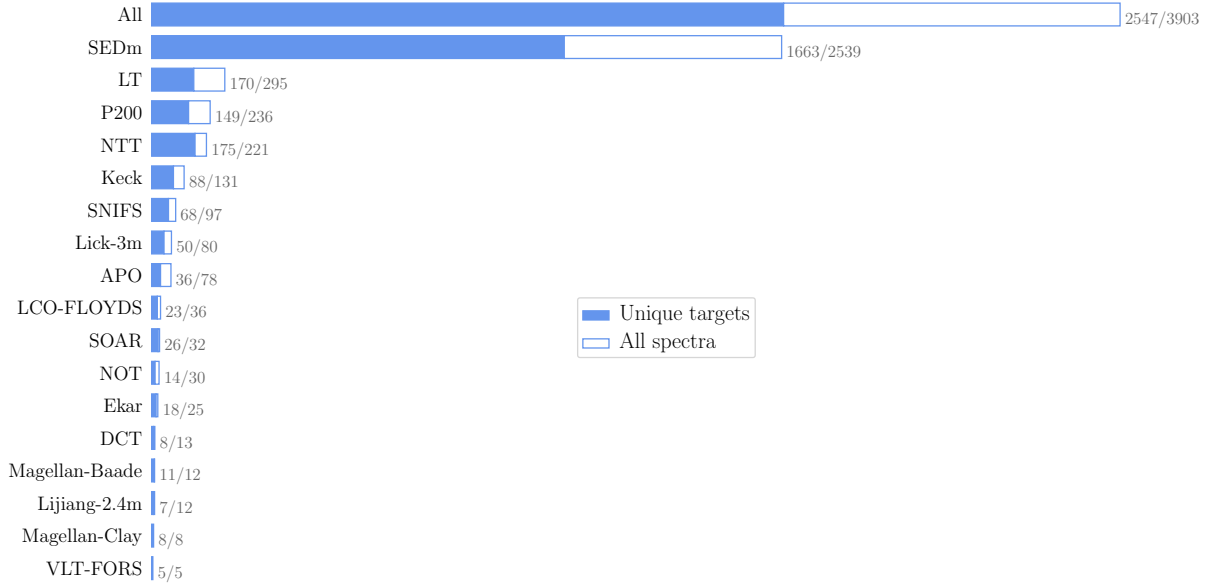


FIGURE 9.4 – Distribution des spectres appartenant au *golden sample* de la DR2 de ZTF suivant leur origine. Les barres entières de la figure indique la quantité de spectres extrait par tel ou tel instrument, la partie en bleue pleine indique le nombre de SNeIa unique correspondant. Une large majorité de spectre et de SNeIa ( $\sim 65\%$ ) ont été obtenues avec le spectrographe dédié à ZTF, la SEDm, et extraites par HYPERGAL.

spectres des autres instruments. La quantité de SNeIa dans l'échantillon tout instrument confondu croît continuellement jusqu'à 18.5 mag, pour ralentir à 18.75 mag et décroître brusquement de 50% au delà de 19 mag.

La distribution en redshift croît continuellement jusqu'à  $z < 0.07$ , avant de décroître progressivement. En suivant la méthode présentée par NICOLAS et al. (2021) pour obtenir un échantillon de SNeIa dans un volume limité mais complet, nous trouvons que l'échantillon cosmologique DR2 de ZTF devrait être libre de fonction de sélection jusqu'à un redshift de  $z = 0.06$ . La fonction de sélection sera activement discuté dans l'article de AMENOCHE et al. (in prep.).

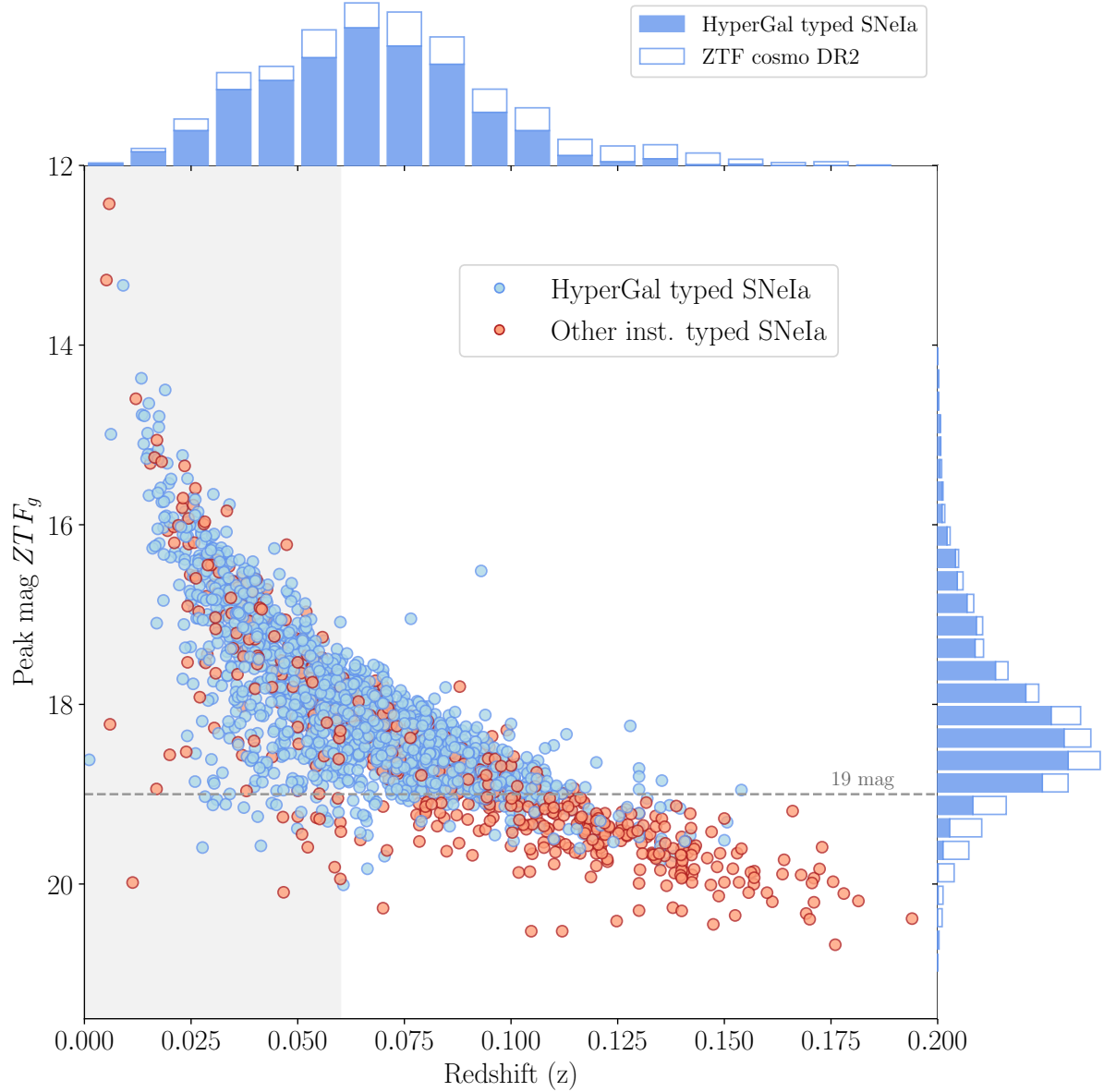


FIGURE 9.5 – Corrélation redshift/pic de magnitude dans la bande  $ZTF_g$  des SNeIa du *golden sample* de la DR2 de ZTF. Nous indiquons la limite à 19 mag, limite à laquelle la vaste majorité des classifications a été effectuée grâce à la SEDm, et a fortiori **HYPERGAL**. La bande grise indique le sous échantillon à volume limité au redshift  $z = 0.06$ , profondeur où l'échantillon est potentiellement libre de fonction de sélection.

## 9.2.4 Courbes de lumière

### 9.2.4.1 Phases

Nous présentons ici quelques résultats préliminaires obtenus à partir de l'ajustement des courbes de lumière avec SALT2, en restant focalisé sur le *golden sample* de la DR2. La Figure 9.6 illustre à titre d'exemple la courbe de lumière de trois SNeIa, avec l'ajustement SALT2 correspondant. La première correspond à une SNIa observée à très haute cadence, avec plus d'une centaine de points avant et après le maximum de luminosité. La seconde présente un cas typique des SNeIa de la DR2, avec un dizaine de points avant le pic, et une quinzaine après. Le troisième exemple illustre un cas limite du seuil de qualité pour appartenir au *golden sample* de la DR2.

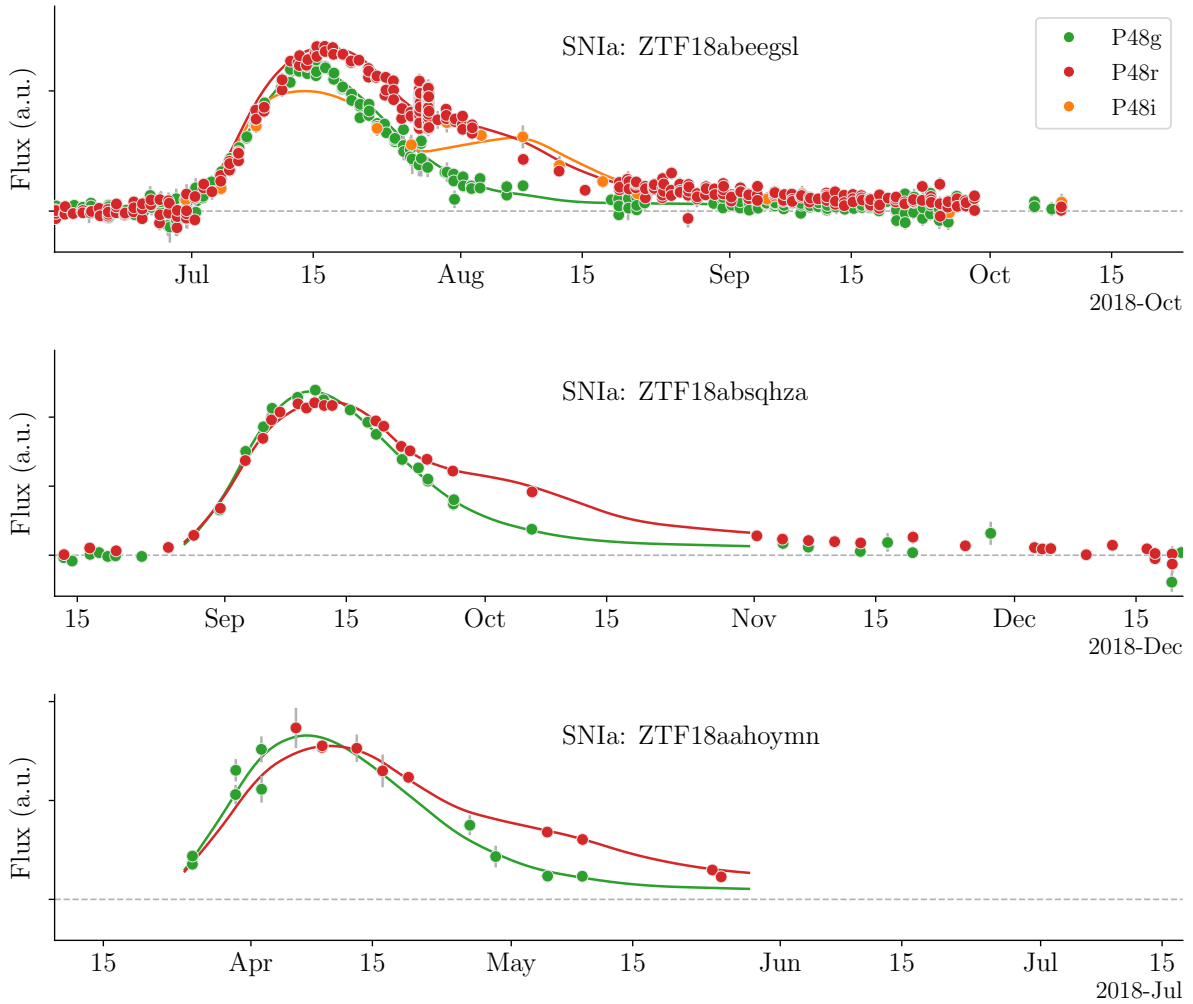


FIGURE 9.6 – Exemple de courbe de lumière de SNeIa du *golden sample* de la DR2. Nous montrons également l'ajustement SALT2 correspondant. Le code couleur réfère à la bande de ZTF considérée. De *haut en bas* : Un cas extrême de très haute cadence avec plusieurs centaines de points, un cas typique avec une dizaine (quinzaine) de points avant (après) le maximum, et un cas limite pour intégrer notre échantillon.

La distribution du nombre de points de détection avant et après le maximum est



présentée dans la Figure 9.7, où nous restreignons la partie *early phase* à une phase comprise entre  $[-20\text{d}, 0\text{d}]$ , et la partie *late phase* entre  $[0\text{d}, +30\text{d}]$ . Nous voyons bien que, typiquement, nous avons  $\sim 10$  points avant le maximum de luminosité, et  $\sim 20$  points après. La première détection médiane survient à une phase médiane de  $-13.3$  jours toutes bandes confondues ( $-12.3$  pour  $g$ ,  $-12.5$  pour  $r$  et  $-8$  pour  $i$ ).

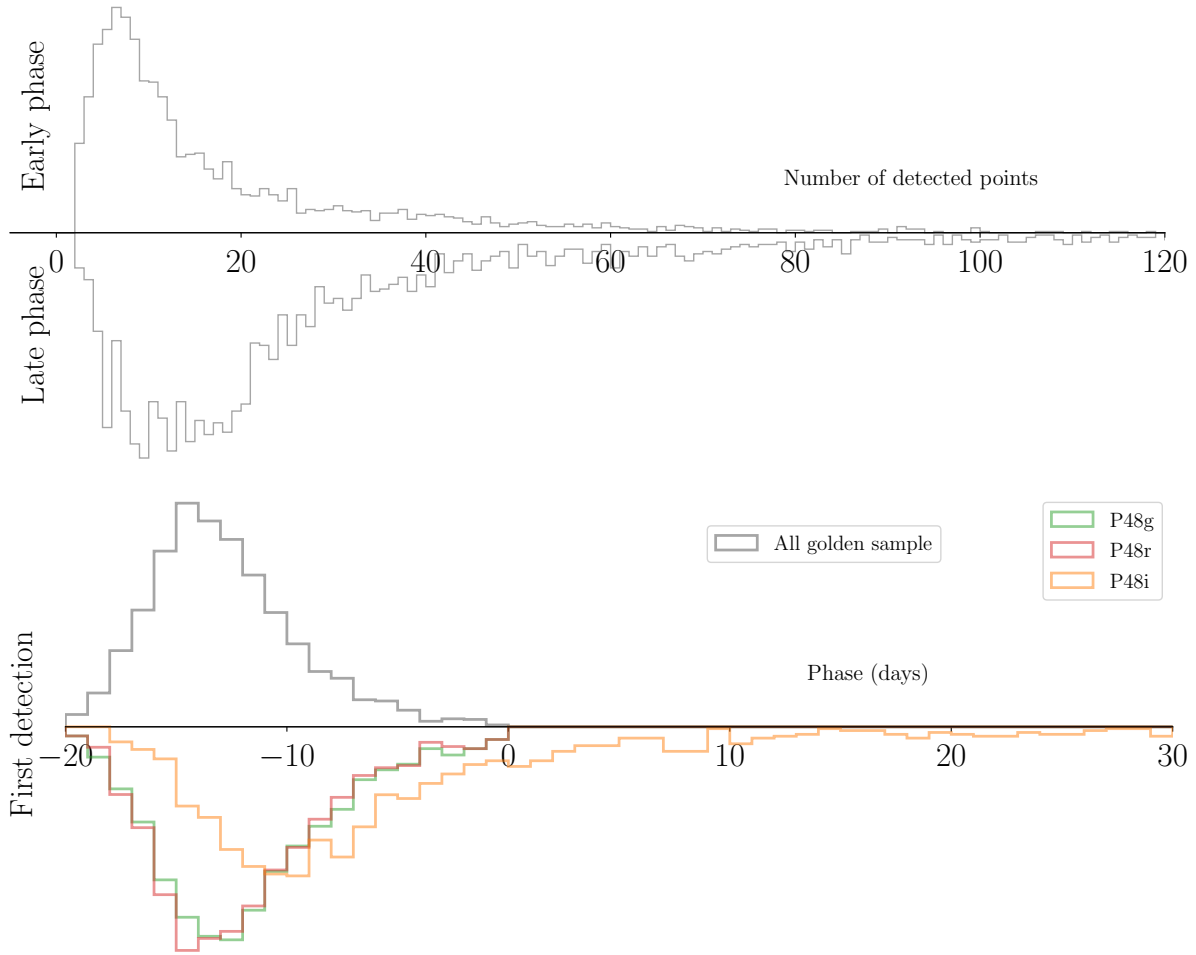


FIGURE 9.7

Nous montrons également la distribution de phase lors de la première acquisition spectrale dans la Figure 9.8, en distinguant la SEDm des autres instruments. La SEDm est l'instrument le plus réactif pour obtenir le premier spectre des SNeIa de notre échantillon, avec  $\sim 70\%$  de premières détections. Les spectres de première détection ont une phase médiane de  $-3$  jours, soit environ 10 jours après la première détection photométrique.

#### 9.2.4.2 *Stretch* ( $x_1$ ) et couleur ( $c$ )

L'utilisation de l'échantillon de SNeIa pour dériver les paramètres cosmologiques nécessite de considérer d'éventuels biais de sélection. En effet, une SNIa avec un paramètre de couleur élevé (donc plus rouge) ou un déclin rapide de luminosité (bas stretch) peuvent ne plus être détectées par ZTF et sa profondeur en magnitude limite. La Figure 9.9 met bien en évidence cet effet de sélection, où la corrélation entre les paramètres de la courbe

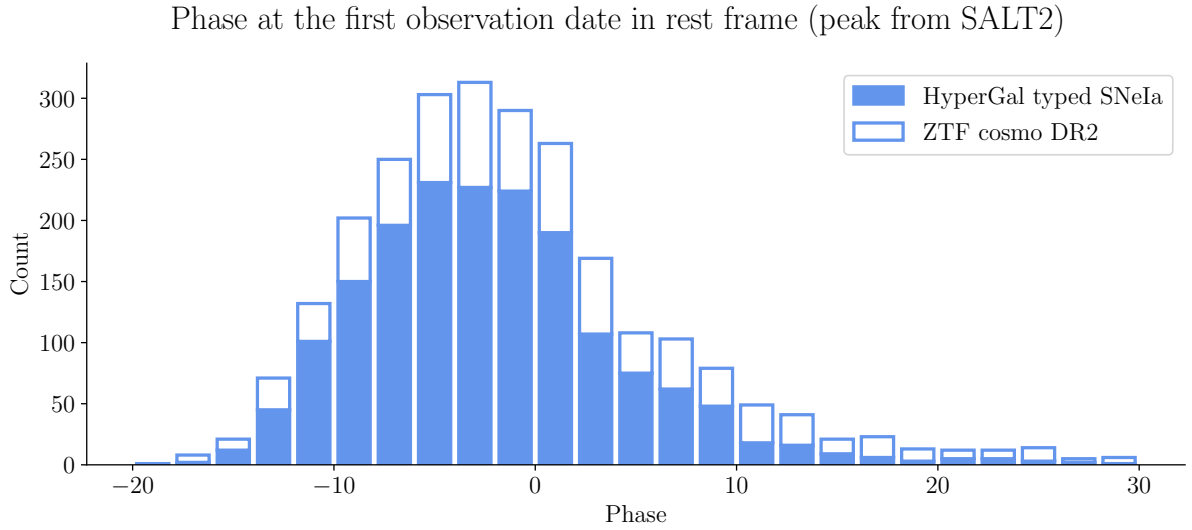


FIGURE 9.8 – Distribution de phase de la première acquisition spectrale des SNeIa de la DR2. La partie bleue pleine de la distribution indique la proportion de spectre extraite par la SEDm, et a fortiori HYPERGAL, comme toute première extraction spectrale.

de lumière et le redshift est clairement visible. C'est pourquoi un sous-échantillon à volume limité ( $z < 0.06$ ) est considéré, comme indiqué par **Amenouche et al (in prep)**.

Le volume limité étant défini, il est à présent possible d'étudier les paramètres de distributions des courbes de lumières, ainsi que leurs corrélations. La première raison de cette analyse est la nécessité d'estimer la fonction de sélection sous-jacente pour éviter d'induire des biais dans la dérivation des paramètres cosmologiques (**SCOLNIC et KESSLER, 2016**). La seconde raison est que cela permet d'étudier la nature de la population (jeune/vieille) des SNIa, et de mettre en évidence des potentiels évolution en redshift (**NICOLAS et al., 2021**). Les corrélations stretch/couleur sont montrées dans la Figure 9.10, où la caractéristique bi-modale de la distribution en stretch est clairement visible. Le mode à bas stretch compte pour  $\approx 25\%$  de la distribution, comme prédit par **NICOLAS et al. (2021)**.

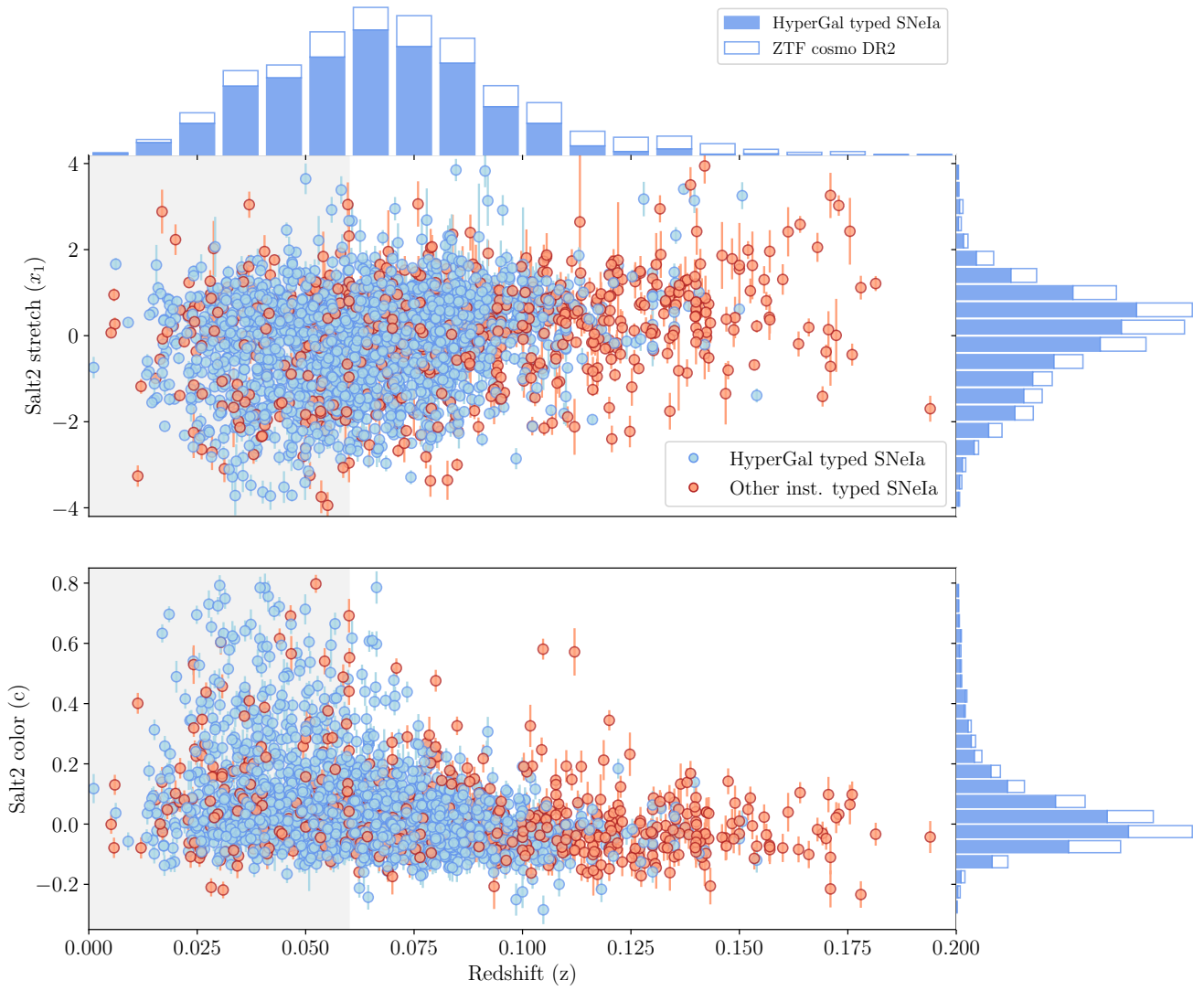


FIGURE 9.9 – Paramètres SALT2 de stretch (*en bas*) et couleur (*en haut*) pour la DR2 de ZTF (**Rigault et al DR2 (in prep)**). Ici seules les Supernovae de l'échantillon doré sont considérées. La bande grise indique le volume limité à  $z < 0.06$ . Les histogrammes sur la droites représentent l'échantillon entier (en bleu) et volume limité (en gris).

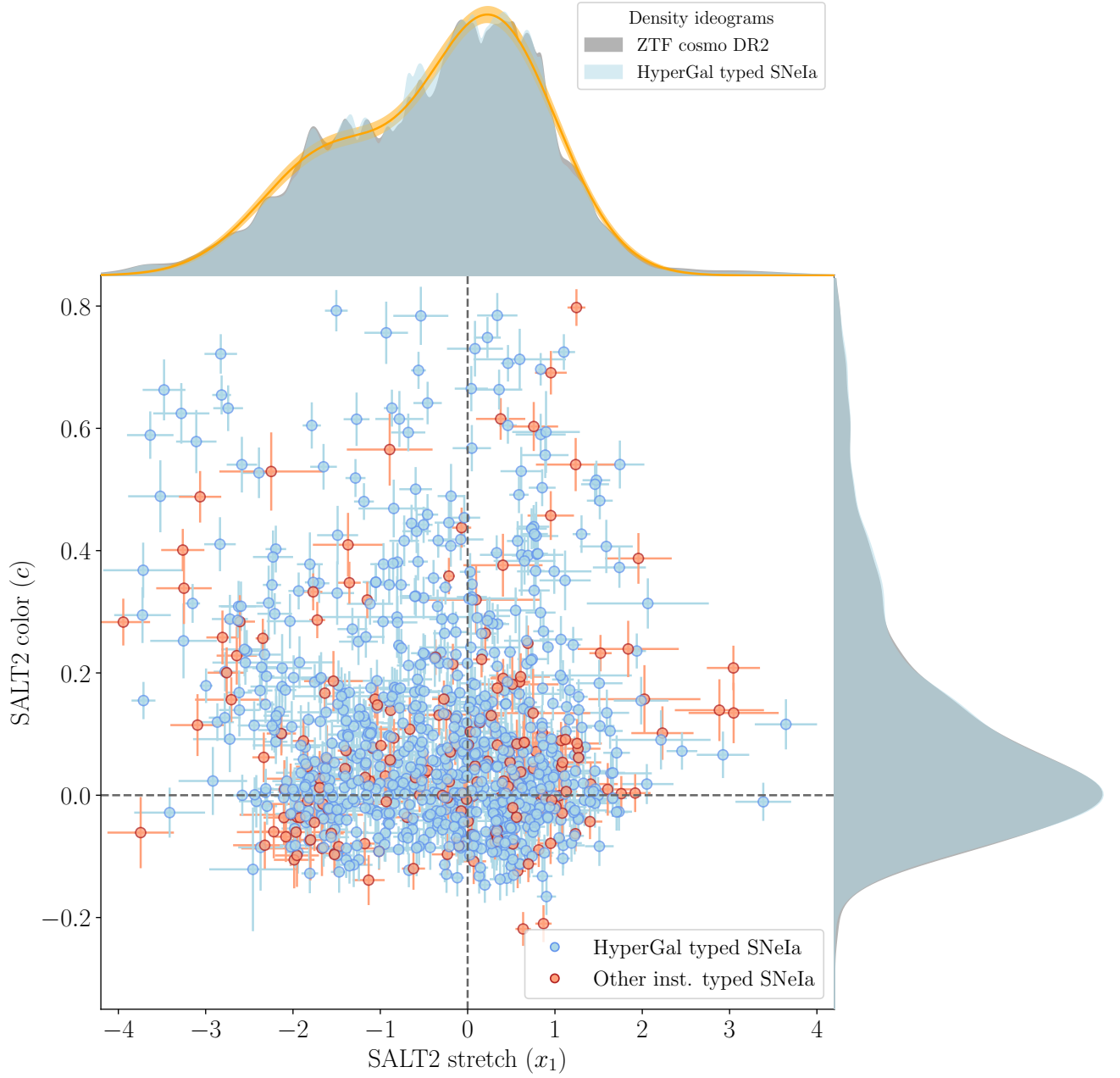


FIGURE 9.10 – Correlation entre les paramètres SALT2 de stretch et couleur pour la DR2 de ZTF. Ici seules les Supernovae du volume limité à  $z < 0.06$  sont considérées. Les distributions en orange correspondent aux prédictions du model de double population de SNeIa de [NICOLAS et al. \(2021\)](#).

## 9.3 Vers la cosmologie

À ce rythme, ZTF aura observé et classifié près de 5000 SNeIa de qualité cosmologique d'ici la fin de la phase 2, mi-2024.

### 9.3.1 Taux d'expansion ( $H_0$ )

### 9.3.2 Équation d'état de l'énergie sombre ( $w$ )

### 9.3.3 Taux d'accroissement des structures ( $f\sigma_8$ )



## Bibliographie

- FREMLING C., MILLER A. A., SHARMA Y. et al. 2020, « The Zwicky Transient Facility Bright Transient Survey. I. Spectroscopic Classification and the Redshift Completeness of Local Galaxy Catalogs », *The Astrophysical Journal*, 895, 32 ↑ [Section 9.2.1](#), ↑ [Section 9.3](#)
- NICOLAS N., RIGAULT M., COPIN Y. et al. 2021, « Redshift evolution of the underlying type Ia supernova stretch distribution », *Astronomy and Astrophysics*, 649, A74 ↑ [Section 9.2.3](#), ↑ [Section 9.2.4.2](#), ↑ [Section 9.10](#)
- PERLEY D. A., FREMLING C., SOLLERMAN J. et al. 2020, « The Zwicky Transient Facility Bright Transient Survey. II. A Public Statistical Sample for Exploring Supernova Demographics », *The Astrophysical Journal*, 904, 35 ↑ [Section 9.2.1](#), ↑ [Section 9.3](#)
- SCOLNIC D. et KESSLER R. 2016, « Measuring Type Ia Supernova Populations of Stretch and Color and Predicting Distance Biases », *The Astrophysical Journal, Letters*, 822, L35 ↑ [Section 9.2.4.2](#)
- SMARTT S. J., VALENTI S., FRASER M. et al. 2015, « PESSTO : survey description and products from the first data release by the Public ESO Spectroscopic Survey of Transient Objects », *Astronomy and Astrophysics*, 579, A40 ↑ [Section 9.2.1](#)