

Zwicky Transient Facility

Sommaire

| | | |
|-------|---|---|
| 3.1 | Présentation de la générale | 2 |
| 3.1.1 | Histoire et collaboration | 2 |
| 3.1.2 | Organisation de la recherche scientifique | 3 |
| 3.2 | La caméra ZTF | 5 |
| 3.2.1 | Caractéristiques | 5 |
| 3.2.2 | Gestion des données | 7 |
| 3.3 | Observation des Supernovae Ia avec ZTF | 8 |

Nous avons vu dans le chapitre précédent les propriétés de sonde cosmologique dont sont dotées les Supernovae de type Ia. Par ailleurs, nous avons également mis en évidence l’importance de la classification de ces objets notamment par le biais d’une acquisition spectrale. Contraindre les paramètres cosmologiques nécessite la mise en place d’une stratégie d’observation, et donc de détecter ces événements transitoires. Dans ce chapitre nous présentons la collaboration Zwicky Transient Facility (ZTF par la suite), où la recherche et l’étude de tels objets font partie des objectifs majeurs. Nous nous focalisons particulièrement ici sur la section photométrique de ZTF, puis nous nous concentrerons sur la classification des SNe par spectroscopie dans le chapitre ??.

Nous introduisons dans un premier temps la collaboration et ses objectifs scientifiques, puis nous abordons les caractéristiques de la caméra principale de ZTF et ses capacités photométriques. Enfin nous présentons quelques statistiques et résultats de la DR1 vis à vis de la détection des SNeIa.

3.1 Présentation générale

3.1.1 Histoire et collaboration

ZTF¹ (??) est un grand relevé astronomique dont la première lumière fut obtenue en Novembre 2017, et réellement actif depuis mars 2018. Ayant achevé la phase 1 en novembre 2020, ZTF est actuellement à mi-chemin de sa phase 2 qui s'étend de décembre 2020 à décembre 2023.

Il succède au relevé Intermediate Palomar Transient Factory (IPTF, 2012-2017), lui-même successeur de Palomar Transient Facility (PTF, 2009-2012) (??). Ces trois relevés grand champ utilisent le télescope Samuel Oschin (48 pouces $\approx 1\text{m}22$) à l'Observatoire de Palomar en Californie (Fig. 3.1).

PTF utilisait une caméra avec un champ de vue de 7.9 deg^2 , alors que ZTF utilise à présent pleinement le plan focal du télescope et bénéficie d'une nouvelle caméra offrant un champ de vue de 47 deg^2 , équipée de 3 filtres g , r et i . La Figure 3.2 montre le champ de vue de la caméra ZTF, en comparaison avec celui d'autres relevés astronomiques. La collaboration est également doté d'un spectrographe 3D basse résolution ($R \approx 100$; ?) monté sur le P48 à Palomar, qui est notamment utilisé pour la classification des événements transitoires détectés par la caméra principale.

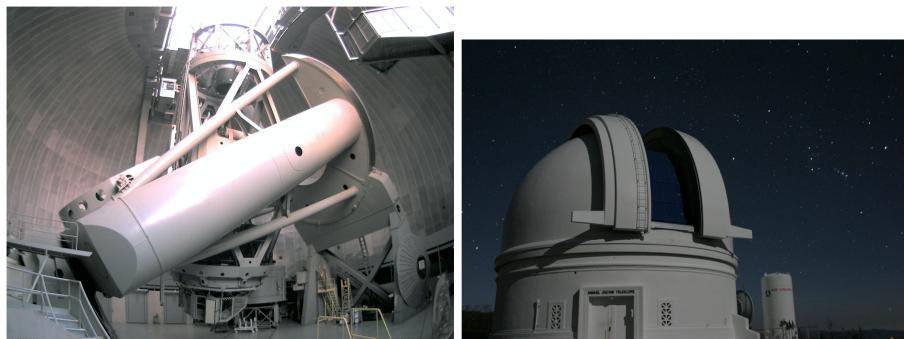


FIGURE 3.1 – Télescope Samuel Oshin P48 au Mont Palomar.

ZTF est une collaboration internationale financée entre la *US National Science Foundation* (NSF) à travers le programme *Mid-scale Innovations Program* (MSIP), et un grand nombre de consortium internationaux d'Universités et institutions :

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • IN2P3, France². • TANGO University System of Taiwan • Weizmann Institute of Science, Israel • Oskar Klein Center, University of Stockholm, Sweden • DESY/Humboldt University of Berlin, Germany • Ruhr University Bochum, Germany • University of Warwick, UK | <ul style="list-style-type: none"> • Trinity College Dublin, Ireland • University of Maryland, College Park, USA • Northwestern University, USA • University of Wisconsin, Milwaukee, USA • Lawrence Livermore National Laboratory, USA • Caltech/IPAC, USA, CA |
|--|---|

1. <https://www.ztf.caltech.edu>

2. Institut national de physique nucléaire et de physique des particules

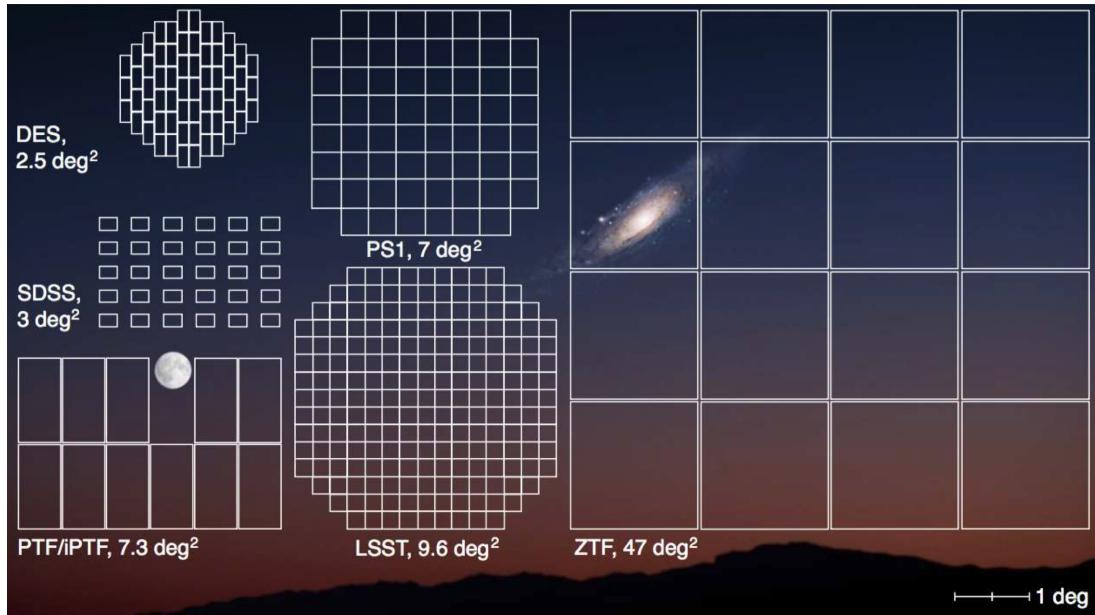


FIGURE 3.2 – Champ de vue de la caméra ZTF comparé à celui d’autres relevés astronomiques.

ZTF est ainsi un partenariat privé-public, dont le temps d’observation est divisé pour chaque phase du projet en trois parts :

Lors de la phase 1, le temps d’allocation public (NSF) était de 40%, pour les partenariats privés de 40% également, et les 20 derniers % dédiée aux programmes de Caltech qui possèdent l’Observatoire du Mont Palomar.

L’IN2P3 étant devenu un partenaire majeur de la collaboration, la phase 2 de ZTF a vu un rééquilibrage avec 50% du temps d’observation attribué au programme MSIP, et 30% aux partenaires privés.

Durant le temps d’observation public, ZTF effectue deux sondages distincts : le ciel Nord d’une part à haute cadence, qui est entièrement scanné tous les trois jours dans les filtres g et r , et le plan Galactique d’autre part (latitude $|b| < 7^\circ$), qui lui est entièrement observé chaque nuit également dans les filtres g et r .

Ces deux sondages combinés mènent à la détection et la génération d’alertes automatiques de plus d’un million d’événements par nuit. Ces événements sont des phénomènes astrophysiques transitoires ou variables, dont la magnitude de détection est inférieure à $r \approx 20.5$.

3.1.2 Organisation de la recherche scientifique

Les sections de recherches scientifiques au sein de ZTF sont nombreuses (?) :

- L’étude des AGN & TDEs :

Les AGN (*Active Galactic Nuclei*), correspondent à une région particulièrement lumineuse au coeur de certaines galaxies, où se situe un trou noir supermassif et leur disque d’accrétion. Les TDEs, ou *Tidal Disruption Events*, correspondent à des phénomènes extrêmement lumineux émanents de cette région.

- L'étude des supernovae comme sonde cosmologique

C'est l'utilisation de leur caractéristique de chandelle standardisable pour effectuer des mesures précises de distance dans l'Univers proche. Avant 2018, moins de 500 de ces événements ont été observés dans l'Univers proche à $z < 0.1$ (?). En 3 ans ZTF a déterminé près de 3000 distances de ces événements RIGAULT et al. (in prep.).

- Physique des supernovae

Indépendamment de leur type, de nombreuses interrogations demeurent sur la physique même de l'explosion des supernovae. ZTF permet de construire un échantillon unique de plusieurs milliers de supernovae tous types confondus, permettant au groupe *Bright Transient Survey* (BTS) d'obtenir des mesures de taux de supernovae, de fonctions de luminosité, de propriétés de galaxies hôtes etc.

- Voie Lactée et M31

Avec l'observation de plusieurs millions d'étoiles chaque nuit, tout un pôle d'étude s'est formé autour des objets internes à notre galaxie, mais également dans la galaxie voisine M31, plus connue sous le nom de galaxie d'Andromède. Cet échantillon gigantesque est utilisé pour étudier des naines blanches dont la luminosité varie périodiquement, d'autres avec des débris transitoires, les systèmes binaires avec émission de rayon-X, et de nombreux autres objets stellaires.

- L'astrophysique multi-messager

Cette toute nouvelle branche de la physique a vu le jour notamment grâce aux premières detections d'ondes gravitationnelles ou de neutrinos astrophysiques. De tels phénomènes sont habituellement grossièrement localisés lors de la détection de ce type de signal, ce qui rend difficile l'identification de la source. Dans le cas où une contrepartie électromagnétique existe, ZTF est alors capable de compléter la détection primaire avec une observation photométrique aux prémisses de l'événement, notamment grâce à son champ de vue extrêmement large et sa haute cadence. Par exemple ? ont identifié la contrepartie électromagnétique (ZTF19abanrhr) de la fusion d'un système binaire de trous noirs (GW190521). L'utilisation de cette sirène standard permet la dérivation de contraintes sur les paramètres cosmologiques.

- Corps au sein du système solaire

Ce groupe se concentre sur la découverte et la caractérisation des petits corps au sein de notre système solaire, à savoir des astéroïdes, des comètes etc.

La répartition du temps d'observation pour ces différents champs de recherches est adaptée de la façon suivante (?) :

- ◊ L'étude des corps au sein du système solaire se fait principalement durant l'aube et l'aurore ($\sim 3.5\%$ du ciel pour chaque et principalement en bande r) ;
- ◊ L'étude de la physique des Supernovae bénéficie d'une observation haute cadence (3 jours dans g et r) de $\approx 1800 \text{ deg}^2$, et qui correspond à une allocation de 15% du temps d'observation ;

- ◊ $\approx 8\%$ du temps pour la Cosmologie dans le ciel extra-galactique.
- ◊ Le groupe *Galaxy Science* observe la Voie Lactée principalement en été ($\approx 5\%$, toutes bandes confondus) ;
- ◊ Le groupe Astrophysique multi-messager peut observer et étudier de potentielles sources pour $\approx 5\%$ du temps (toutes bandes confondus).

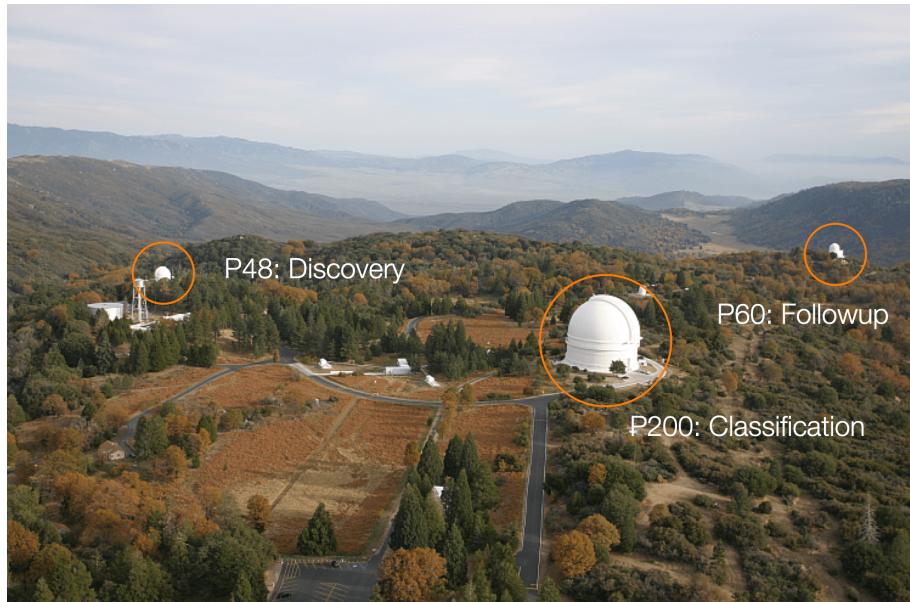


FIGURE 3.3 – Observatoire de Palomar, en Californie. Sur la gauche est située le télescope P48 Samuel Oschi, auquel est attachée la caméra principale de ZTF. En haut à droite nous avons le P60, sur lequel est monté le spectrographe 3D SEDm appartenant également à la collaboration ZTF. Le P200 est quant à lui utilisé par de nombreuses collaborations, et est utilisé occasionnellement pour de la spectroscopie par ZTF.

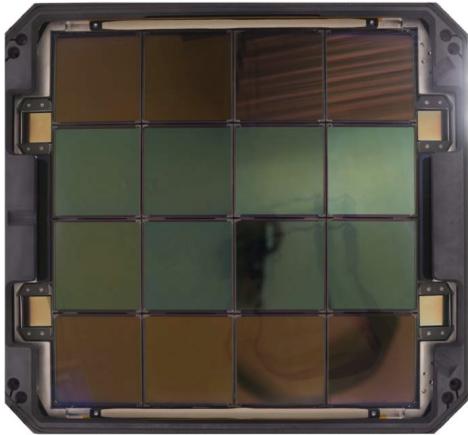
3.2 La caméra ZTF

3.2.1 Caractéristiques

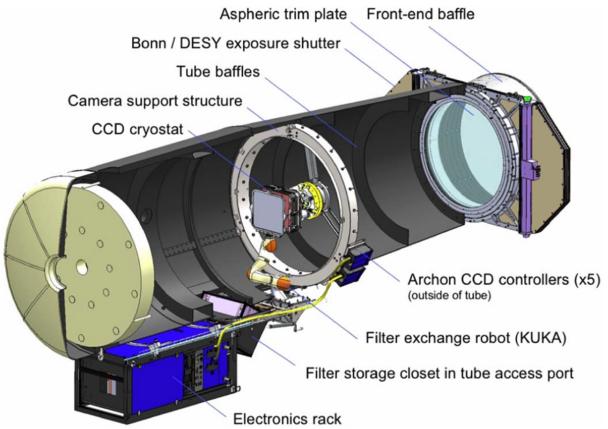
La nouvelle configuration de ZTF vis à vis de ses prédecesseurs PTF/iPTF est principalement due à sa nouvelle caméra de 47deg^2 , couvrant l'intégralité du plan focal du télescope Schmidt P48.

Comme illustré dans la Figure 3.4a (?), la caméra est constituée d'une mosaïque de 16 CCD (Charge Coupled Device) composés de pixels carrés de $15\text{ }\mu\text{m}$ de côté, à une échelle de $1''.01\text{ pixel}^{-1}$. Chaque CCD est composé de 6144×6160 pixels, et la caméra dans son ensemble a donc 573 Mpx.

La FWHM médiane de la fonction d'étalement du point (PSF) atmosphérique résultant de cette configuration montre un seeing de $2''.1$ dans les bandes *g* et *i*, et de $2''.0$ dans la bande *r*. Leur transmission respective est présentée dans la Figure 3.5. En ce qui concerne la limite en magnitude, la bande *g* montre un seuil median à 5σ de 20.8 mag, la bande *r*



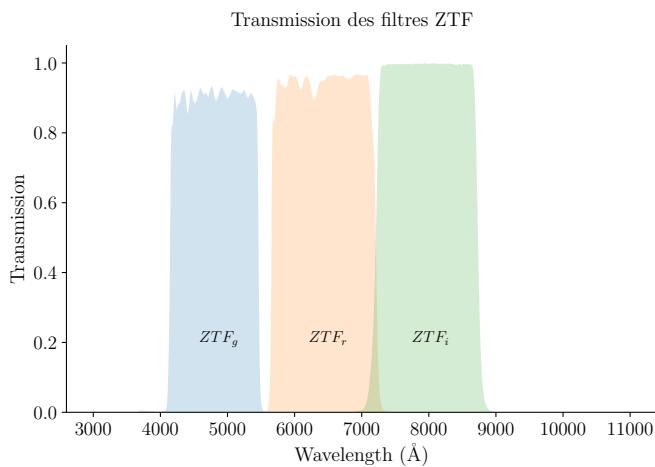
(a) Plan focal de la caméra ZTF (?).



(b) Vue en coupe du télescope Samuel Oschin avec le nouveau système ZTF (?).

FIGURE 3.4 – Description du système d'imagerie de ZTF (à droite) et présentation du plan focal de la caméra et ses 16 CCD (à gauche).

de 20.6 mag et la bande i 19.9 mag. Nous illustrons les distributions de la FWHM et du seuil en magnitude pour chaque filtre dans la Figure 3.6.

FIGURE 3.5 – Transmission des filtres g , r et i de ZTF (?).

Le temps de pose utilisé avec cette caméra est de 30s, et la vitesse de lecture de seulement 8 s. Entre le champ de vue de 47 deg^2 et cette haute cadence d'acquisition, ZTF est capable de scanner près de 3750 deg^2 par heure. Sachant que tout au long de l'année il y a en moyenne 6h de ciel noir par nuit au Mont Palomar, ZTF est ainsi capable d'observer l'entièreté du ciel visible ($\sim 23675 \text{ deg}^2$) chaque nuit. Pour donner un autre ordre d'idée, ZTF serait ainsi capable de reproduire le relevé POSS (? , 3 bandes B_J , R et I avec une profondeur respective de 22.5 mag, 20.8 mag et 19.5 mag) en seulement 2 nuits.

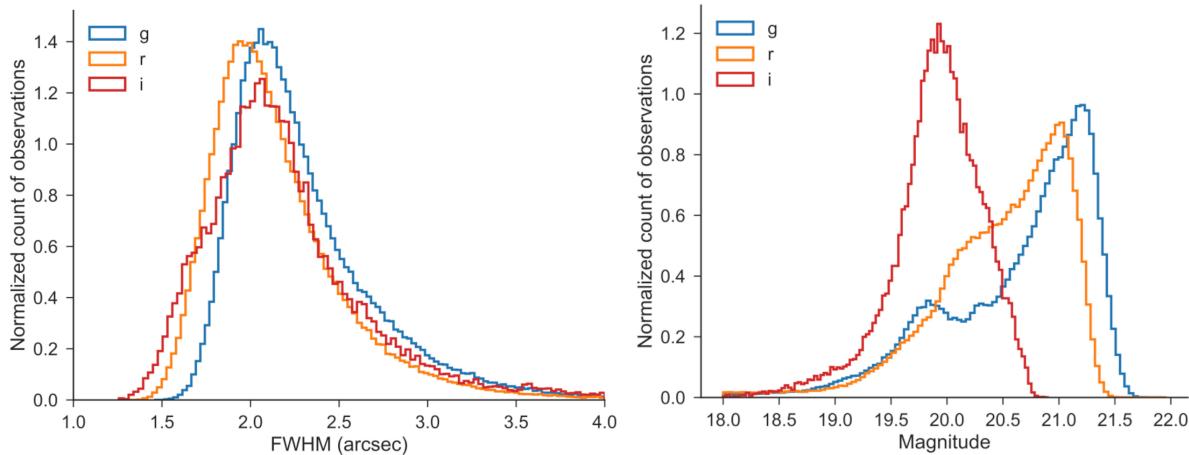


FIGURE 3.6 – *À gauche* l’histogramme normalisé de la largeur à mi-hauteur (FWHM) atmosphérique de la fonction d’étalement de point (PSF) pour chaque filtre durant le mois de juin 2018 (?). *À droite* est représenté l’histogramme à 5σ des magnitudes limites avec un temps de pose de 30s pour chaque filtre sur une période d’une lunaison.

3.2.2 Gestion des données

Bien évidemment, un tel flux de données nécessite une infrastructure de traitement adéquate. Appelée ZTF Science Data System (ZSDS), elle est hébergée à l’IPAC¹ (?). Ce système comprend le traitement des données, l’infrastructure d’émission d’alertes, le système d’interface utilisateur pour l’accès et l’analyse des résultats. Ce pipeline (exécuté en temps réel) utilise un algorithme de différentiation d’image, optimisé pour la détection de point source variable ou transitoire. Une fois l’évènement confirmé, une alerte est générée et en général émise dans le quart d’heure qui suit. La distribution de ce flux d’alertes utilise des technologies dont le code source est public et qui sont développées en industries : Apache Kafka² qui fourni un système unifié en temps réel à latence faible pour la manipulation de flux de données, et Avro³ qui est un framework de sérialisation de données. Les ordres de grandeurs de la quantité de données à manipuler sont impressionnantes : ce système gère avec succès un flux d’environ 1,2 millions d’alertes (~ 70 GB de données) par nuit. La vitesse de transfert est d’environ 80,000 alertes/minute. Plus de détails sur le système de distribution d’alertes sont apportés dans ?. On notera que le framework Avro sera celui utilisé pour le *Legacy Survey of Space and Time* (LSST; ?).

Seules les alertes provenant des observations liées au programme *Mid-scale Innovations Program* (MSIP) sont rendues public immédiatement. Les images en revanche (brutes, calibrées et produits de données associés) deviennent disponibles 6 à 12 mois après l’observation pour la Phase 1 de ZTF, et entre 3 et 6 mois pour la Phase 2. Les données d’observation ayant pour origine les programmes privés et de Caltech sont disponibles après environ 12 à 18 mois. Lors de l’écriture de ces lignes en avril 2022, la DataRelease⁴ 10 est publique, ce qui correspond à toutes les observations MSIP de Mars 2018 au 5 Novembre 2021, et celles privées et de Caltech jusqu’au 5 Juillet 2020.

1. Infrared Processing & Analysis Center : <https://www.ipac.caltech.edu>

2. <https://kafka.apache.org>

3. <https://avro.apache.org>

4. <https://www.ztf.caltech.edu/ztf-public-releases.html>

3.3 Observation des Supernovae Ia avec ZTF

Nous allons à présent nous focaliser sur l'observation des Supernovae de type Ia avec ZTF.

Les événements transitoires nécessitant d'être filtrés parmi toutes les alertes reportées par ZTF, ? ont élaboré le système **AMPEL**¹ afin d'automatiquement filtrer les détections de ZTF et établir les courbes de luminosité associées aux événements retenus.

Sur les $\sim 10^5$ alertes par nuit (ce qui correspond environ à 10% de ce qui est attendu pour LSST), la majorité ($\sim 90\%$) d'entre elles sont filtrées comme étant des artefacts, des étoiles variables, des satellites ou encore des objets du système solaire. In fine, "seulement" $\mathcal{O}(10)$ sont de nouvelles Supernovae qui doivent être identifiées et classifiées. Entre 70 et 80% d'entre elles s'avèrent être de type Ia, dont la moitié atteignent le seuil de magnitude de ZTF permettant d'établir une courbe de lumière exploitable.

La 1^{re} *data release* dédiée au sondage des supernovae de type Ia avec ZTF a été publiée et décrite par ? très récemment. Au stade de cette DR1, ce qui correspond à un peu plus de 2 ans et 6 mois d'observations (mars 2018-novembre 2020), ZTF a déjà répertorié plus de 3000 SNeIa.

La profondeur en magnitude atteint 20.8, 20.6, 20.3 mag dans les bandes *g r i* respectivement, ce qui correspond à un redshift $z \lesssim 0.1$. L'échantillon est complet à 100% en terme de classification en deçà de $m_{peak} = 16.5$ mag, à 93.6% en deçà de $m_{peak} = 18.5$ mag et 88.8% à $m_{peak} = 19.0$ mag (?).

Cette classification est rendue possible grâce à la combinaison de la caméra de ZTF et du spectrographe 3D monté sur le P60, la Spectral Energy Distribution machine (SEDm), qui est optimisé pour la classification des SNe jusqu'à $m \approx 19$ mag. Nous détaillerons cet instrument dans le chapitre suivant. La DR1 présente ainsi un échantillon de 761 Supernovae classifiées spectralement avec un redshift median de $z = 0.057$, incluant 547 SNeIa, 155 SNeII, 40 SNeIb/c et 19 SLSNe. La Figure 3.7 (RIGAULT et al. (in prep.)) met en évidence la croissance de l'échantillon de SNeIa observées durant la phase 1 de ZTF, qui constituera la 2^e *data release* de ZTF-Cosmo consacrée aux Supernovae de type Ia.

Sur les ≈ 3700 SNeIa classifiées spectralement, près de 3000 entrent dans la catégorie *golden sample*, ce qui signifie qu'elles remplissent les critères dit de qualité cosmologiques pour leur courbe de luminosité vis à vis de l'algorithme SALT2 qui en dérive les paramètres de couleur et de stretch. Ces critères, basés sur l'intervalle de phase $[-15, 30]$ jours où SALT2 est le mieux entraîné, sont les suivants :

- ◊ seulement les détections photométriques à 5σ sont considérées ;
- ◊ au moins 7 points avant le maximum répartis dans au moins 2 bandes ;
- ◊ au moins 7 points après le maximum répartis dans au moins 2 bandes.

Environ 40% de ces supernovae possèdent un redshift spectral de leur galaxie hôte (majoritairement en provenance des relevés SDSS). Pour les 60% de SNeIa restantes, 50% ont un redshift provenant des caractéristiques de leur spectre, et 10% de raies d'émissions de la galaxie hôte ayant contaminées leur spectre. Il est à noter que pour les 2 derniers points, la précision n'est que de l'ordre de 5%, insuffisant pour la cosmologie. Cependant,

1. <https://github.com/AmpelProject/Ampel-contrib-sample>

plus de 95% des galaxies hôtes ont une magnitude supérieure à 20 mag, ce qui signifie que d'autres relevés (comme par exemple DESI) pourraient a posteriori mesurer et fournir les redshift manquant.

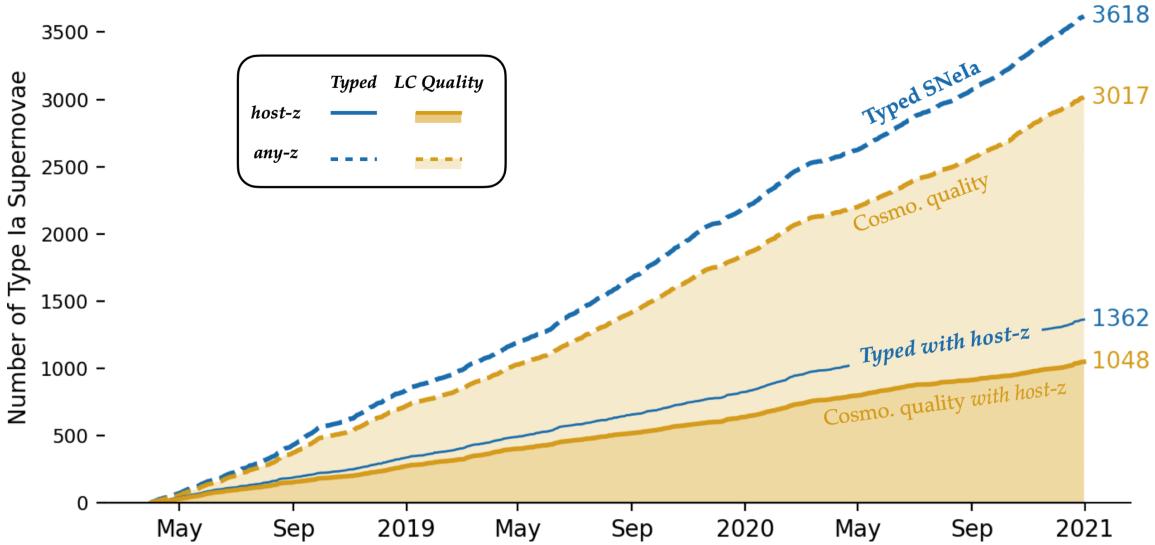


FIGURE 3.7 – Nombre cumulé de SNeIa observées par ZTF (phase 1). Les contours dorés correspondent à l'échantillon passant les critères de coupure pour une qualité cosmologique. Le trait plein montre les SN avec un redshift spectroscopique de leur galaxie hôte. À titre de comparaison, le set de données le plus récent dans la littérature comptabilise moins de 500 SNeIa à un redshift de $z < 0.1$

ZTF a donc montré sa capacité à débusquer et classifier pas moins de 1000 Supernovae de type Ia par an, très loin devant l'actuelle (ancienne) plus grande compilation à bas redshift Pantheon (?) comptabilisant 1048 SNeIa sur les 20 dernières années, dont seulement 210 à un redshift $z < 0.1$. Leur plus récente publication (Pantheon+, ?) fait état de 1550 SNeIa, dont 389 à $z < 0.1$.

Nous parlerons dans le dernier chapitre de ce manuscrit de la nouvelle *data release 2* actuellement en préparation ainsi que des premiers résultats obtenus sur les courbes de lumière.

Rappelons que la cosmologie avec les SNeIa se base sur la capacité, certes, à détecter les supernovae grâce à la caméra ZTF, mais également à leur classification. Cette étape a été peu détaillée dans ce chapitre, mais est cruciale pour éviter toute contamination des échantillons de SNeIa, induisant des biais dans la dérivation des paramètres cosmologiques (?).

Comme nous l'avons mentionné au tout début de la Section 3.1, cette classification se fait grâce à un spectrographe 3D monté sur le télescope P60. Le chapitre suivant est tout naturellement dédié à la présentation de cet instrument, l'extraction de spectre et sa classification.