



Université Claude Bernard



Lyon 1

THÈSE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LYON
Opérée au sein de
l'Université Claude Bernard Lyon 1

École Doctorale ED52
École Doctorale de Physique et Astrophysique

Spécialité de doctorat : Physique
Discipline : Cosmologie Observationnelle

Soutenue publiquement le jj/mm/aaaa, par :

Jérémy LEZMY

Extraction de spectres de Supernovae
par modélisation HyperSpectrale des galaxies hôtes

Devant le jury composé de :

M./Mme. XXX XXX	Président-e
M./Mme. XXX XXX	Rapporteur-e
M./Mme. XXX XXX	Rapporteur
M./Mme. XXX XXX	Examinateur-ice
M./Mme. XXX XXX	Directeur de thèse
M./Mme. XXX XXX	Co-Directeur de thèse
M./Mme. XXX XXX	Invitæ

Remerciements

Résumé

Abstract

Table des matières

Introduction générale	15
I : Contexte Scientifique	19
1 Contexte cosmologique	21
1.1 Bases de relativité générale	23
1.1.1 Concepts initiaux	23
1.1.2 Métrique et équations de conservation	23
1.1.3 Définition de la constante cosmologique	23
1.2 Introduction du modèle standard de la cosmologie	23
1.2.1 Univers plat, homogène et isotrope	23
1.2.2 Métrique de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker	23
1.2.3 Le modèle Λ CDM	23
1.3 Mesures cosmologiques et distance	23
1.3.1 Âge de l'Univers	23
1.3.2 Distance de luminosité	23
1.3.3 De la télémétrie aux Supernovae : Calibration	23
1.4 Supernovae et Cosmologie	23
1.4.1 Chandelles Standards	23
1.4.2 Physique de l'explosion	23
1.4.3 Spectre et classification	23
2 Zwicky Transient Facility	25
2.1 Présentation de la collaboration	26
2.2 La caméra de ZTF	28
2.3 Le rôle de ZTF dans l'étude cosmologique moderne	28
2.4 ZTF en quelques chiffres	28
3 Un spectrograph 3D : The Spectral Energy Distribution machine	31
3.1 Présentation de l'instrument	32
3.2 Extraction des spectres du CCD et création des cubes de données	32
3.3 Actuelle méthode d'extraction de spectre	32
3.4 SEDm en quelques chiffres	32
II : Extraction de spectre de Supernovae	33
4 HyperGal : Une nouvelle méthode d'extraction de source ponctuelle	35
4.1 Idée générale	36

4.2	SED Fitting	36
4.3	Présentation du Pipeline	36
5	Modélisation Hyperspectrale	37
5.1	Source photométrique : PS1	38
5.1.1	Présentation du survey	38
5.1.2	Utilisation des images PS1	38
5.2	Cigale et SEDFitting	38
5.2.1	Présentation de Cigale	38
5.2.2	Utilisation	38
5.3	Construction du cube intrinsèque	38
5.3.1	Sampling des spectres dans l'espace SEDm	38
5.3.2	Construction du cube	38
6	Réponse impulsionale de la SEDm	39
6.1	LSF	40
6.1.1	Lampe à arc	40
6.1.2	Détermination de la LSF	40
6.2	PSF	40
6.2.1	Modèle de profil radial	40
6.2.2	Entrainement du modèle	40
6.2.3	Chromaticité et ADR	40
6.3	Validation	40
6.3.1	Calibration photométrique	40
6.3.2	Résultats	40
7	Modélisation de Scène et Extraction de Source	41
7.1	Projection du cube intrinsèque	42
7.1.1	Seeing relatif Panstarrs/SEDm	42
7.1.2	Projection spatiale dans l'espace SEDm	42
7.2	Modélisation de Scène	42
7.2.1	Composante du fond : ciel et artefacts	42
7.2.2	Composante du point source : Supernova	42
7.2.3	Fitting de la scene	42
7.3	Extraction du point source	42
7.3.1	Outputs de contrôle du pipeline	42
7.3.2	Isolation de la galaxie hôte	42
7.3.3	Isolation de la Supernova	42
7.4	Classification : SNID	42
III : Simulations et Résultats		43
8	Simulations de cubes de données et application d'HyperGal	45
8.1	Génération des simulations	46
8.1.1	Cube de galaxies isolées	46
8.1.2	Modèles de Supernovae	46

8.1.3	Marginalisations	46
8.1.4	Paramètres libres d'étude : Distance et contraste	46
8.2	Résultats et Précision	46
8.2.1	Précision spectrophotométrique	46
8.2.2	Précision avec correction de continuum	46
8.2.3	Efficacité de classification	46
9	Data Release 2 de ZTF	47
9.1	Présentation de la DR2 de ZTF	48
9.1.1	XXX	48
9.1.2	XXX	48
9.2	Production d' HYPERGAL et résultats	48
9.2.1	XXX	48
9.2.2	XXX	48
Conclusions & perspectives		48

Table des figures

2.1	Télescope Samuel Oshin P48 au Mont Palomar	26
2.2	Observatoire de Palomar, en Californie. Sur la gauche est située la caméra principale de ZTF, attachée au télescope P48 Samuel Oschi. 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 utiliser par de nombreuses collaborations, et est utilisé occasionnellement par ZTF.	28
2.3	My two big pictures	29
2.4	Plan focal de la caméra ZTF (Bellm et al. 2019)	29
2.5	Transmission des filtres g , r et i de la caméra de ZTF (Dekany et al. 2020).	30

Liste des tableaux

Introduction générale

Première partie

Contexte Scientifique

Contexte cosmologique

Et la scène disparaît pour devenir
l'actrice

Person NAME, *Doctor Who S13E08*

Bien que la cosmologie ne s'en tienne pas aux concepts récents tels qu'on les connaît et les vulgarise, c'est avec les travaux d'EINSTEIN au début du XX^e siècle que notre compréhension du monde cosmique prend son essor.

Sommaire

1.1	Bases de relativité générale	23
1.1.1	Concepts initiaux	23
1.1.2	Métrique et équations de conservation	23
1.1.3	Définition de la constante cosmologique	23
1.2	Introduction du modèle standard de la cosmologie	23
1.2.1	Univers plat, homogène et isotrope	23
1.2.2	Métrique de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker	23
1.2.3	Le modèle Λ CDM	23
1.3	Mesures cosmologiques et distance	23
1.3.1	Âge de l'Univers	23
1.3.2	Distance de luminosité	23
1.3.3	De la télémétrie aux Supernovae : Calibration	23
1.4	Supernovae et Cosmologie	23
1.4.1	Chandelles Standards	23
1.4.2	Physique de l'explosion	23
1.4.3	Spectre et classification	23

- 1) RG
- 2) Métrique
- 3) Constante cosmo
- 4) Univers Homogène et isotrope
- 5) Courbure
- 6) Expansion

- 7) Paramètres cosmologiques
- 8) Modèle standard
- 9) Distance de luminosité
- 10) Intérêt SNe

1.1 Bases de relativité générale

1.1.1 Concepts initiaux

1.1.2 Métrique et équations de conservation

1.1.3 Définition de la constante cosmologique

1.2 Introduction du modèle standard de la cosmologie

1.2.1 Univers plat, homogène et isotrope

Univers plat Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

1.2.2 Métrique de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker

1.2.3 Le modèle Λ CDM

1.3 Mesures cosmologiques et distance

1.3.1 Âge de l'Univers

1.3.2 Distance de luminosité

1.3.3 De la télémétrie aux Supernovae : Calibration

1.4 Supernovae et Cosmologie

1.4.1 Chandelles Standards

1.4.2 Physique de l'explosion

1.4.3 Spectre et classification

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a

nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Zwicky Transient Facility

Sommaire

2.1	Présentation de la collaboration	26
2.2	La caméra de ZTF	28
2.3	Le rôle de ZTF dans l'étude cosmologique moderne	28
2.4	ZTF en quelques chiffres	28

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. Afin d'arriver à cet objectif, la première étape est de détecter ces événements transitoires. Dans ce chapitre nous présenterons la collaboration Zwicky Transient Facility (ZTF par la suite), où la recherche et l'étude de tels objets sont au centre des activités. Nous nous focaliserons particulièrement ici sur la section photométrique de ZTF. Nous commencerons par présenter la collaboration et les raisons de sa mise en place, puis nous rentrerons dans plus de technicité en présentant la caméra principale de ZTF et ses capacités photométriques. Enfin nous parlerons des enjeux cosmologiques et finirons avec quelques résultats depuis la mise en place de ce grand relevé astronomique.

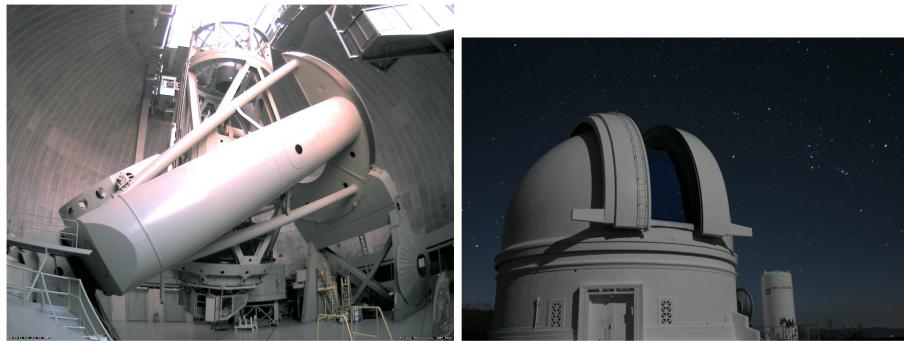


FIGURE 2.1 – Télescope Samuel Oshin P48 au Mont Palomar

2.1 Presentation de la collaboration

ZTF ([Graham et al. \(2019\)](#) and [Bellm et al. \(2019\)](#)) est un grand relevé astronomique dont la première lumière fut obtenue en Novembre 2017, et réellement actif depuis début 2018. Il succède au relevé Intermediate Palomar Transient Factory (IPTF, 2012-2017), lui-même précurseur de Palomar Transient Facility (PTF, 2009-2012) ([Rau et al. \(2009\)](#) et [Law et al. \(2009\)](#)). Ces trois relevés grand champs utilisent le télescope Samuel Oschin (48 pouces $\approx 1m22$) à l’Observatoire de Palomar en Californie (Fig. 2.1). D’une caméra avec un champ de vue de 7.9deg^2 pour PTF, ZTF utilise à présent pleinement le plan focal du télescope et bénéficie d’une nouvelle caméra offrant un champ de vue de 47deg^2 . La collaboration est également doté d’un spectrographe 3D basse résolution ($R \approx 100$) monté sur le P48 à Palomar, qui est utilisé pour suivre les transients détectés par la caméra principale.

ZTF est une collaboration internationale, financée à parts égales entre la US National Science Foundation et un grand nombre de consortium internationaux d’Universités et institutions :

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • IN2P3¹. • 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 | <ul style="list-style-type: none"> • University of Warwick, UK • Trinity College Dublin, Ireland • University of Maryland, College Park • Northwestern University • University of Wisconsin, Milwaukee • Lawrence Livermore National Laboratory • Caltech/IPAC |
|---|---|

ZTF est ainsi un partenariat privé-public, où son temps d’observation est divisé entre trois niveaux : le temps d’allocation public (40%), privé (interne à la collaboration, 40%) et une fraction dédiée aux programmes de Caltech (20%).

Durant le temps d’observation public, ZTF effectue deux relevés distincts : le ciel Nord d’une part qui est entièrement scanné tous les trois jours dans les filtres g et r , et le plan Galactique d’autre part, qui lui est entièrement observé chaque nuit également dans les filtres g et r .

¹. Institut national de physique nucléaire et de physique des particules

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

Les sections de recherches scientifiques au sein de ZTF sont nombreuses :

- L'étude des AGN & TDEs :

Les AGN sont les Active Galactic Nuclei, des trous noirs supermassifs qui accrètent de la matière du reste de la galaxie. Les TDEs, ou Tidal Disruption Events, correspondent à des phénomènes extrêmement lumineux résultants de cette accrétion de matière.

- L'étude des Supernovae comme sonde cosmologique

Utiliser leur caractéristique de chandelle standardisable pour effectuer des mesures précises de distance dans l'Univers proche. Avant 2018, seulement ≈ 500 de ces évènements ont été observés dans l'Univers proche. En 3 ans ZTF a déterminé près de 3000 distances de ces évènements.

- Physique des Supernovae

Indépendamment de leur type, de nombreux mystères demeurent sur la physique même de l'explosion des Supernovae. ZTF permet d'obtenir un échantillon unique de plusieurs milliers de Supernovae tout type confondu qui permet à l'équipe Bright Transient Survey (BTS) d'obtenir des mesures non-biaisées de taux de Supernovae, de fonctions de luminosité, de propriétés de galaxies hôte etc.

- Voie Lactée et M31

Avec l'observation de plusieurs 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, aka Andromède. Cet échantillon gigantesque est utilisé pour étudier les naines blanches dont la luminosité varie périodiquement, d'autres avec des débris transitoires, les systèmes binaires avec émission de rayons-X, et de nombreux autres objets stellaires.

- L'Astrophysique Multimessager

Cette toute nouvelle branche a vu le jour notamment grâce aux premières détections d'ondes gravitationnelles ou de neutrinos. De tels phénomènes sont habituellement grossièrement localisés avec la détection de ce type de signal, ce qui rend difficile l'identification de la source. Avec son champ de vue extrêmement large et sa haute cadence, ZTF est capable de compléter la détection primaire avec une observation photométrique aux prémisses de l'évènement, si une contrepartie électromagnétique existe.

- 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.

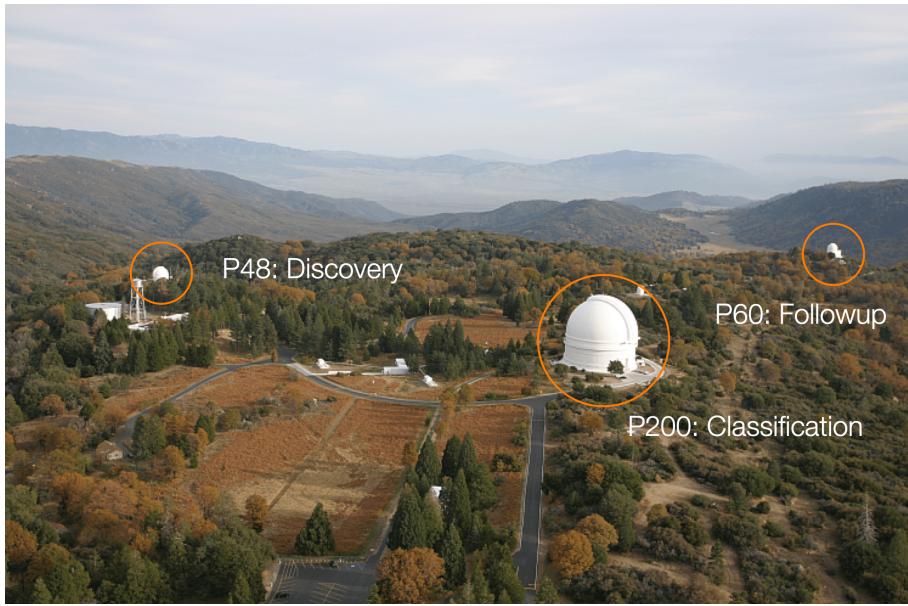


FIGURE 2.2 – Observatoire de Palomar, en Californie. Sur la gauche est située la caméra principale de ZTF, attachée au télescope P48 Samuel Oschi. En haut à droite nous avons le P60, sur lequel est monté le spectrographe 3D SEDm appartenant également à la collaboration ZTF. Le P200 est quant à lui utiliser par de nombreuses collaborations, et est utilisé occasionnellement par ZTF.

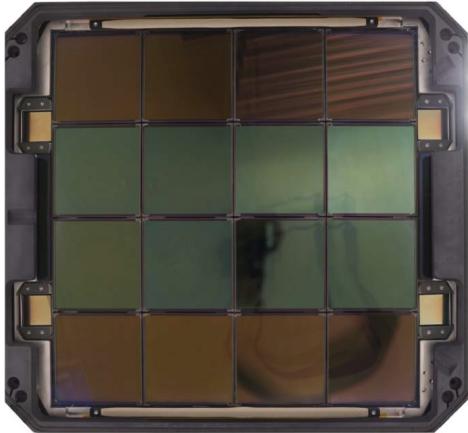
2.2 La caméra de ZTF

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

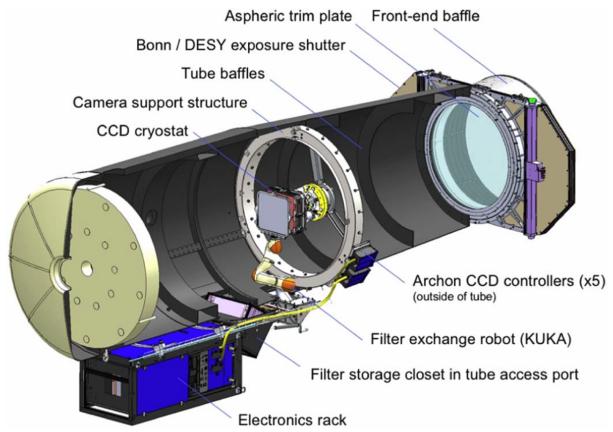
Comme illustré dans la Fig. 2.4 de [Bellm et al. \(2019\)](#), la caméra est constituée d'une mosaïque de 16 CCD (Charge Coupled Device) avec des pixels carrés de $15\mu\text{m}$, à une échelle de $1''.01\text{ pixel}^{-1}$. La FWHM médiane de la fonction d'étalement du point (PSF) résultant de cette configuration est de $2''.1$ dans les bandes g et i , et de $2''.0$ dans la bande r . En ce qui concerne la sensibilité limite en magnitude, la bande g montre un seuil median à 5σ de 20.8mag, la bande r de 20.6mag et la bande i 19.9mag.

2.3 Le rôle de ZTF dans l'étude cosmologique moderne

2.4 ZTF en quelques chiffres



(a) Plan focal de la caméra ZTF ([Bellm et al. 2019](#)).



(b) Vue en coupe du télescope Samuel Oschin avec le nouveau système ZTF ([Dekany et al. 2020](#)).

FIGURE 2.3 – Description du système d'imagerie de ZTF (à droite) et présentation du plan focal de la caméra et ses 16 CCD (à gauche).

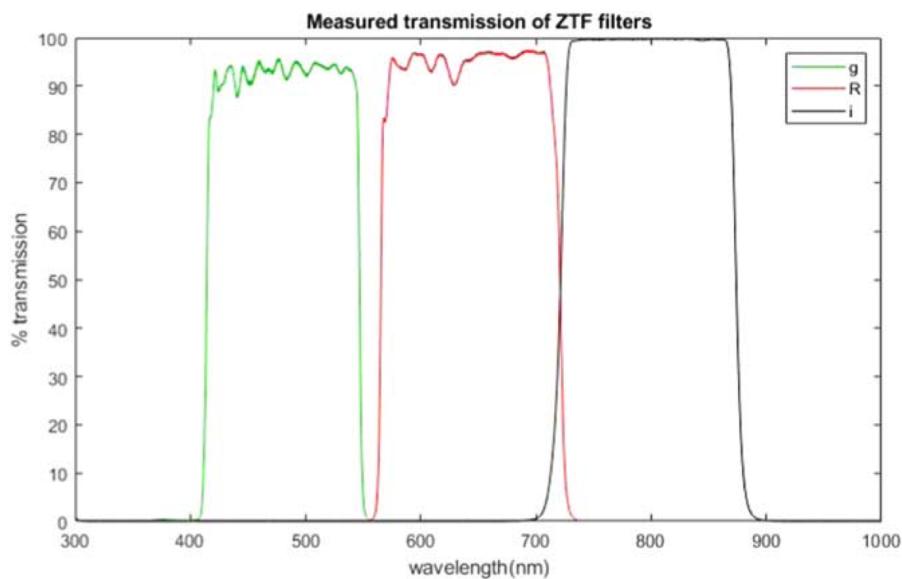


FIGURE 2.4 – Transmission des filtres *g*, *r* et *i* de la caméra de ZTF ([Dekany et al. 2020](#)).

Un spectrograph 3D : The Spectral Energy Distribution machine

– XXX –

Sommaire

3.1	Présentation de l'instrument	32
3.2	Extraction des spectres du CCD et création des cubes de données	32
3.3	Actuelle méthode d'extraction de spectre	32
3.4	SEDm en quelques chiffres	32

- 3.1 Présentation de l'instrument**
- 3.2 Extraction des spectres du CCD et création des cubes de données**
- 3.3 Actuelle méthode d'extraction de spectre**
- 3.4 SEDm en quelques chiffres**

Deuxième partie

Extraction de spectre de Supernovae

HyperGal : Une nouvelle méthode d'extraction de source ponctuelle

- XXX -

Sommaire

4.1	Idée générale	36
4.2	SED Fitting	36
4.3	Présentation du Pipeline	36

4.1 Idée générale

4.2 SED Fitting

4.3 Présentation du Pipeline

Modélisation Hyperspectrale

- XXX -

Sommaire

5.1	Source photométrique : PS1	38
5.1.1	Présentation du survey	38
5.1.2	Utilisation des images PS1	38
5.2	Cigale et SEDFitting	38
5.2.1	Présentation de Cigale	38
5.2.2	Utilisation	38
5.3	Construction du cube intrinsèque	38
5.3.1	Sampling des spectres dans l'espace SEDm	38
5.3.2	Construction du cube	38

5.1 Source photométrique : PS1

5.1.1 Présentation du survey

5.1.2 Utilisation des images PS1

5.2 Cigale et SEDFitting

5.2.1 Présentation de Cigale

5.2.2 Utilisation

5.3 Construction du cube intrinsèque

5.3.1 Sampling des spectres dans l'espace SEDm

5.3.2 Construction du cube

Réponse impulsionale de la SEDm

– XXX –

Sommaire

6.1	LSF	40
6.1.1	Lampe à arc	40
6.1.2	Détermination de la LSF	40
6.2	PSF	40
6.2.1	Modèle de profil radial	40
6.2.2	Entrainement du modèle	40
6.2.3	Chromaticité et ADR	40
6.3	Validation	40
6.3.1	Calibration photométrique	40
6.3.2	Résultats	40

6.1 LSF

6.1.1 Lampe à arc

6.1.2 Détermination de la LSF

6.2 PSF

6.2.1 Modèle de profil radial

6.2.2 Entrainement du modèle

6.2.3 Chromaticité et ADR

6.3 Validation

6.3.1 Calibration photométrique

6.3.2 Résultats

Modélisation de Scène et Extraction de Source

– XXX –

Sommaire

7.1	Projection du cube intrinsèque	42
7.1.1	Seeing relatif Panstarrs/SEDm	42
7.1.2	Projection spatiale dans l'espace SEDm	42
7.2	Modélisation de Scène	42
7.2.1	Composante du fond : ciel et artefacts	42
7.2.2	Composante du point source : Supernova	42
7.2.3	Fitting de la scene	42
7.3	Extraction du point source	42
7.3.1	Outputs de contrôle du pipeline	42
7.3.2	Isolation de la galaxie hôte	42
7.3.3	Isolation de la Supernova	42
7.4	Classification : SNID	42

7.1 Projection du cube intrinsèque

7.1.1 Seeing relatif Panstarrs/SEDm

7.1.2 Projection spatiale dans l'espace SEDm

7.2 Modélisation de Scène

7.2.1 Composante du fond : ciel et artefacts

7.2.2 Composante du point source : Supernova

7.2.3 Fitting de la scene

7.3 Extraction du point source

7.3.1 Outputs de controle du pipeline

7.3.2 Isolation de la galaxie hôte

7.3.3 Isolation de la Supernova

7.4 Classification : SNID

Troisième partie

Simulations et Résultats

Simulations de cubes de données et application d'HyperGal

– XXX –

Sommaire

8.1	Génération des simulations	46
8.1.1	Cube de galaxies isolées	46
8.1.2	Modèles de Supernovae	46
8.1.3	Marginalisations	46
8.1.4	Paramètres libres d'étude : Distance et contraste	46
8.2	Résultats et Précision	46
8.2.1	Précision spectrophotométrique	46
8.2.2	Précision avec correction de continuum	46
8.2.3	Efficacité de classification	46

8.1 Génération des simulations

- 8.1.1 Cube de galaxies isolées
- 8.1.2 Modèles de Supernovae
- 8.1.3 Marginalisations
- 8.1.4 Paramètres libres d'étude : Distance et contraste

8.2 Résultats et Précision

- 8.2.1 Précision spectrophotométrique
- 8.2.2 Précision avec correction de continuum
- 8.2.3 Efficacité de classification

Data Release 2 de ZTF

- XXX -

Sommaire

9.1	Présentation de la DR2 de ZTF	48
9.1.1	XXX	48
9.1.2	XXX	48
9.2	Production d' HYPERGAL et résultats	48
9.2.1	XXX	48
9.2.2	XXX	48

9.1 Présentation de la DR2 de ZTF

9.1.1 XXX

9.1.2 XXX

9.2 Production d'HyperGal et résultats

9.2.1 XXX

9.2.2 XXX

Conclusions & perspectives

Bibliographie

Bellm, E. C., Kulkarni, S. R., Graham, M. J., et al. 2019, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 131, 018002 (document), 2.1, 2.2, 2.4

Dekany, R., Smith, R. M., Riddle, R., et al. 2020, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 132, 038001 (document), 2.5

Graham, M. J., Kulkarni, S. R., Bellm, E. C., et al. 2019, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 131, 078001 2.1

Law, N. M., Kulkarni, S. R., Dekany, R. G., et al. 2009, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 121, 1395 2.1

Rau, A., Kulkarni, S. R., Law, N. M., et al. 2009, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 121, 1334 2.1