

Un spectrographe 3D : La Spectral Energy Distribution machine

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté la collaboration Zwicky Transient Facility et nous nous sommes focalisés sur la caméra principale de 47deg^2 montée sur le P48 au Mont Palomar. Cette caméra permet à ZTF de détecter 10^5 évènements transitoires ou variables, en scannant l'entièreté du ciel Nord visible chaque nuit, à la vitesse vertigineuse de $3760\text{deg}^2/\text{heure}$. Parmi ces évènements, $\mathcal{O}(10)$ correspondent à de nouveaux évènements transitoires non répertoriés : Les Supernovae. Comme expliqué dans le Chapitre ??, seules les Supernovae de type Ia sont d'intérêts dans la cosmologie, de part leur propriété de chandelle standardisable. Il faut donc les classifier. Pour cela, on utilise leur spectre, dont les raies d'absorbction/émission sont caractéristiques d'un type à l'autre de SN. Ainsi, ZTF possède également un spectrographe 3D monté sur le télescope P60 au Mont Palomar (Figure ??) spécialement conçu à cet effet. Nous présentons dans ce chapitre ce spectrographe, la Spectral Energy Distribution machine (SEDm).

1.1 Présentation de l'instrument

1.1.1 Principe d'un IFS

Le spectrographe 3D SEDm est ce qu'on appelle un IFS pour Integral Field Spectrograph. Sans surprise, c'est un instrument qui permet de recueillir le spectre du ciel sur un champ de vue bidimensionnel. Ainsi et indépendamment de la méthode utilisée, le produit final avec cet instrument correspond à un cube de données ayant 2 dimensions spatiales ((x, y) ou (RA, Dec)) et une dimension spectrale (longueur d'onde λ ou une vitesse).

Un IFS est composé de 2 parties : le spectrographe qui va disperser la lumière incidente, et l'IFU (Integrated Field Unit). Le rôle de l'IFU est de diviser le plan spatial 2D du champ de vue en réseau continue et concentré de lumière. Ce réseau est ensuite donné en entrée au spectrographe qui va se charger de le disperser sur le détecteur.

Il existe 3 types principaux d'IFU, schématisés dans la Figure 1.1.

- **Le réseau de micro-lentilles** conceptualisé par [Bacon et al. \(1995\)](#) (qui s'apparente aux yeux composites de certains insectes) : C'est le système utilisé par la SEDm, mais également par l'IFS SAURON ([Bacon et al., 2001](#)) dans le projet ATLAS3D ([Cappellari et al., 2011](#)) ou encore SNIFS ([Lantz et al., 2004](#)). Dans ce système, l'image bi-dimensionnelle est fractionnée par un réseau de micro-lentilles (le MLA, microlens array). Chaque élément est ensuite concentré et dispersé par le spectrographe (voir Figure 1.1). Pour éviter au maximum le chevauchement des spectres sur le détecteur, le réseau de lentille est légèrement incliné. Le désavantage principal de cette technique est le court intervalle de longueur d'onde dispersable sans induire de chevauchement.
- **Le paquet de fibre** comme avec l'IFS du relevé MaNGA d'SDSS ([Yan et al., 2016](#)) qui peut être utilisé en combinaison ([Barden & Wade, 1988](#)) ou non ([Allington-Smith et al., 1997](#)) de réseau de micro-lentilles. Ici la lumière n'est pas concentrée par des lentilles mais acheminée par un paquet de fibres optiques "à la chaîne" jusqu'à la fente du spectrographe. Le premier avantage est bien évidemment la flexibilité des fibres. Mais en contrepartie l'échantillon du ciel dispersé devient non contigu, à cause de la forme circulaire des fibres. Il est possible de pallier à cet effet en ajoutant un réseau de micro-lentilles (lui contigu) entre le plan focal et le paquet de fibres.
- **Le "trancheur d'image"** qui est la méthode la plus ancienne ([Bowen \(1938\)](#), [Content \(1997\)](#)) utilisée par exemple avec le NIFS (near-infrared integral field spectrograph, [McGregor et al. \(2003\)](#)). Cette méthode utilise un miroir segmenté en fines sections horizontales. Chacune de ces sections va diriger la lumière incidente dans des directions légèrement différentes jusqu'à un second miroir segmenté. Ce dernier va réarranger les tranches incidentes non pas l'une au dessus de l'autre, mais de façon étalées, "à la chaîne" comme avec la méthode fibrée. L'agencement est ensuite dispersé par la fente du spectrographe. Cette méthode permet de conserver la contiguïté du champ de vue, mais est en contrepartie coûteuse et difficile à concevoir.

Les données brutes obtenues à partir d'un IFS sont ainsi sous la forme de multiples spectres (de plusieurs dizaines à plusieurs milliers) étalés (la trace) sur le détecteur, chacun ayant pour origine un élément individuel de l'IFU. Ces éléments sont en quelques sortes des pixels spatiaux, que l'on contracte communément par le terme de spaxels. La reconstruction

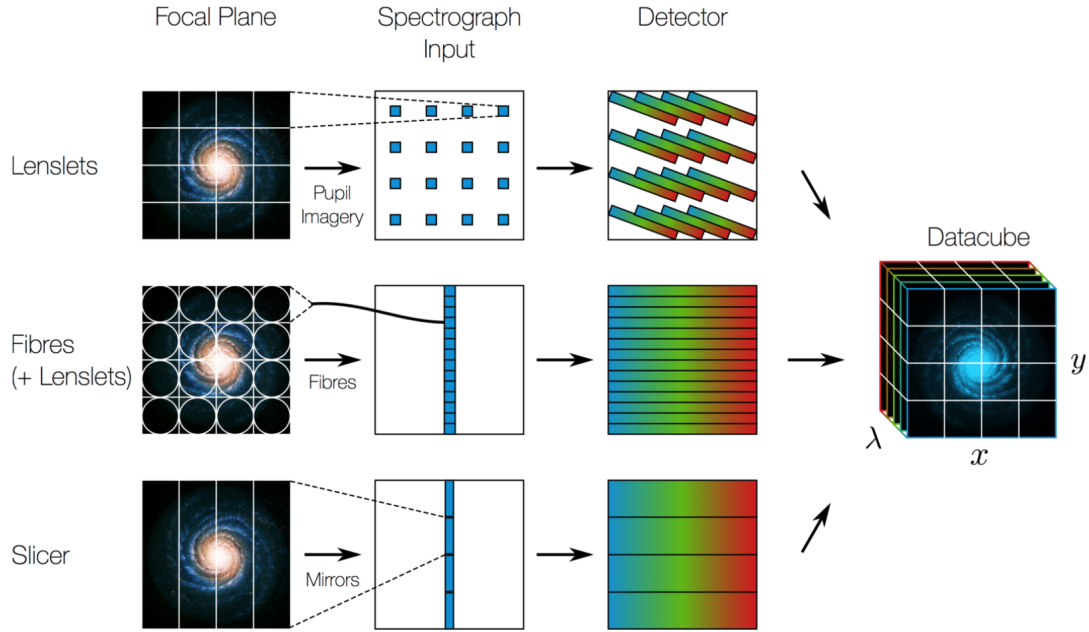


FIGURE 1.1 – Fonctionnement d'un IFS pour différents types d'IFU. La SEDm utilise un système d'agencement de micro-lentilles (cas du *haut*) (Crédit M. Westmoquette, adaptée de [Allington-Smith & Content \(1998\)](#))

du cube de données se fait en extrayant chaque spectre du détecteur, et en les réarrangeant dans le même espace géométrique que le plan focal du télescope (nous détaillerons ce processus dans la section suivante).

1.1.2 La SEDm

Focalisons nous maintenant sur notre instrument, la Spectral Energy Distribution machine, présenté par [Blagorodnova et al. \(2018\)](#). Comme mentionné plusieurs fois, celui ci est monté sur le télescope P60 (Cassegrain) au Mont Palomar depuis Août 2016. Une vue d'ensemble de l'instrument est présenté dans la Figure 1.2, où l'on peut voir qu'il est composé de deux canaux : l'IFU et la "Rainbow Camera" (RC), montés sur un agencement en forme de T. Cette caméra d'acquisition multi-bande est accompagnée de 4 filtres photométriques u' , g' , r' et i' .

Les 2 caméras de la SEDm sont des Princeton Instruments identiques : une PIXIS 2048B et une PIXIS 2048B_Excelon chacun avec 2048×2048 pixels de taille $13,5 \mu\text{m}$.

La Rainbow Camera est utilisée pour le guidage, la calibration, l'acquisition de cible ou encore l'imagerie scientifique. Le champ de vue de $13' \times 13'$ est divisé en 4 quadrants, un pour chacun des filtres $u'g'r'i'$.

L'IFU de la SEDm fonctionne sur la méthode du réseau de micro-lentilles, le MLA. Celui ci couvre un champ de vue de $28 \times 28 \text{ arcsec}$, avec 45×52 lentilles hexagonales. Le faisceau de lumière projeté par ces lentilles passe dans un triple prisme avec une résolution spectrale achromatique de $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \sim 100$. Comme illustré dans la Figure 1.2, c'est la RC qui est alignée avec la lumière directe en provenance du Cassegrain. Il faut donc en dévier une partie qui sera transmise à la caméra de l'IFU : cela est effectué avec un prisme d'interception centré sur le faisceau incident, qui va rediriger le champ de $28 \times 28 \text{ arcsec}$

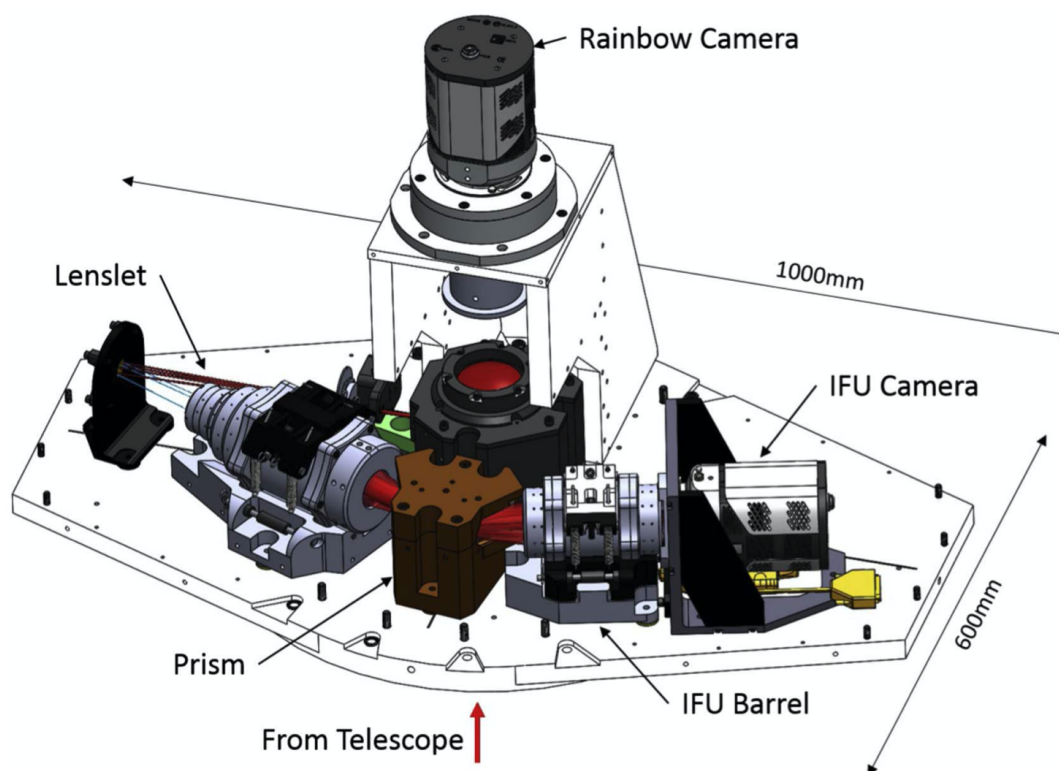


FIGURE 1.2 – Vue d’ensemble de la SEDm (Blagorodnova et al., 2018). La source de lumière du Cassegrain est indiqué par la lumière rouge. L’instrument photométrique, la RC, est situé en haut au centre et récolte directement la lumière. Pour l’IFU, la lumière est redirigée jusqu’à un miroir que l’on peut voir tout à gauche de la représentation. Elle est ensuite réfléchi dans le MLA (Lenslet). La lumière de chaque micro-lentille du MLA passe ensuite dans le prisme (en marron au centre) pour y être dispersé et focalisé par l’optique (IFU Barrel) sur le détecteur (IFU Camera).

vers un miroir. Les images photométriques de la RC ont donc en leur centre un masque qui correspond au champ de vue de l’IFU.

1.2 Extraction des spectres du CCD et création des cubes de données

1.3 Actuelle méthode d’extraction de point source

1.4 SEDm en quelques chiffres

Bibliographie

- Allington-Smith, J. R., Content, R., Haynes, R., & Lewis, I. J. 1997, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 2871, Optical Telescopes of Today and Tomorrow, ed. A. L. Ardeberg, [1284–1294](#)
- Allington-Smith, J. & Content, R. 1998, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 110, 1216
- Bacon, R., Adam, G., Baranne, A., et al. 1995, Astronomy & Astrophysics, Supplement, [113](#), [347](#)
- Bacon, R., Copin, Y., Monnet, G., et al. 2001, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), [326](#), [23](#)
- Barden, S. C. & Wade, R. A. 1988, in Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 3, Fiber Optics in Astronomy, ed. S. C. Barden, [113–124](#)
- Blagorodnova, N., Neill, J. D., Walters, R., et al. 2018, [Publications of the Astronomical Society of the Pacific](#), [130](#), [035003](#)
- Bowen, I. S. 1938, [The Astrophysical Journal](#), [88](#), [113](#)
- Cappellari, M., Emsellem, E., Krajnović, D., et al. 2011, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), [413](#), [813](#)
- Content, R. 1997, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 2871, Optical Telescopes of Today and Tomorrow, ed. A. L. Ardeberg, [1295–1305](#)
- Lantz, B., Aldering, G., Antilogus, P., et al. 2004, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 5249, Optical Design and Engineering, ed. L. Mazuray, P. J. Rogers, & R. Wartmann, [146–155](#)
- McGregor, P. J., Hart, J., Conroy, P. G., et al. 2003, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 4841, Instrument Design and Performance for Optical/Infrared Ground-based Telescopes, ed. M. Iye & A. F. M. Moorwood, [1581–1591](#)
- Yan, R., Bundy, K., Law, D. R., et al. 2016, [The Astronomical Journal](#), [152](#), [197](#)