

# Modélisation de scène et extraction de sources

## Sommaire

7.1	Modélisation de scène . . . . .	<b>2</b>
7.1.1	Présentation de la méthode . . . . .	<b>2</b>
7.1.2	Projection du cube intrinsèque . . . . .	<b>2</b>
7.1.3	Composantes de la scène . . . . .	<b>4</b>
7.1.4	Ajustement de la scene 2D . . . . .	<b>5</b>
7.1.5	Ajustement chromatique . . . . .	<b>6</b>
7.2	Extraction des sources . . . . .	<b>11</b>
7.2.1	Extraction de la galaxie hôte . . . . .	<b>11</b>
7.2.2	Extraction de la Supernova . . . . .	<b>14</b>
7.3	Classification : SNID . . . . .	<b>18</b>
7.4	Cas complexes . . . . .	<b>18</b>

Ce chapitre est consacré à la description de la dernière étape du pipeline **HYPERGAL**, la modélisation de scène. Les chapitres précédents ont permis dans un premier temps la construction du cube intrinsèque de la galaxie hôte. Puis nous avons procédé à sa projection dans l'espace spectral de la SEDm à partir de la réponse impulsionnelle spectrale de l'instrument. Enfin, nous avons également construit un modèle de PSF robuste permettant la modélisation de sources ponctuelles.

Dans ce chapitre, nous allons tout d'abord détailler le processus de modélisation de scène, puis nous présenterons les résultats d'extraction des différentes composantes qui la composent. Après avoir montré ces résultats pour un cas idéal, nous montrerons quelques extractions de cas plus complexes obtenues avec **HYPERGAL**.

## 7.1 Modélisation de scène

### 7.1.1 Présentation de la méthode

La modélisation de scène implémentée dans `HYPERCAL` va globalement suivre la méthode utilisée pour l'extraction de source ponctuelle, présentée dans le chapitre précédent. Les cubes de données (observations) utilisés sont préalablement calibrés en flux, en utilisant la courbe de sensibilité inverse obtenue à partir de l'étoile standard observée la plus récente. Les rayons cosmiques sont également retirés à l'aide du module `BYECR` (KIM et al., 2022).

L'idée est de modéliser la scène pour  $N$  méta-tranches couvrant un domaine spectral pertinent de la SEDm. En effectuant un ajustement de la scène pour chaque méta-tranche, nous obtiendrons un jeu de  $N$  paramètres. Puis, à l'instar de la méthode d'extraction de source ponctuelle, nous procèderons à un ajustement de la chromaticité des différentes composantes de la scène. Cela nous permettra de fixer tous les paramètres de forme et de position. Enfin nous terminerons par un ajustement linéaire des amplitudes pour toutes les tranches du cube de données.

Cette procédure nécessite dans un premier temps de projeter notre cube intrinsèque dans l'espace de la SEDm. Nous rappelons qu'à l'issue de la détermination de la réponse impulsionale spectrale (LSF), nous avons déjà projeté notre cube intrinsèque dans l'espace spectral de la SEDm. Il nous manque donc la projection dans l'espace spatiale.

### 7.1.2 Projection du cube intrinsèque

La projection du cube ne se fait pas en une opération, mais en projetant successivement chaque tranche qui le compose.

Il nous faut pour cela prendre en compte la géométrie des spaxels des 2 cubes. Pour les traitements géométriques, nous utilisons le module `SHAPELY`<sup>1</sup> (GILLIES et al., 2007–), qui nous permet de reconstruire la grille avec les spaxels carrés du cube intrinsèque, et celle avec les spaxels hexagonaux du cube de données SEDm.

Avant de projeter le flux, nous adaptons l'échelle des pixels entre les deux espaces. Nous savons que les pixels des images PS1 ont une taille de  $0''.25$  de côté. Afin de connaître précisément le facteur d'échelle à appliquer, nous avons effectué une analyse spatiale sur des observations de la SEDm avec un grand nombre ( $> 3$ ) de sources dans le champ de vue. Par comparaison géométrique avec les images PS1 de la même zone du ciel, analogue à une triangulation, nous avons déterminé un rapport d'échelle de  $2.230 \pm 0.003$  entre la taille des pixels de la SEDm et des images PS1. Nous en avons déduit une taille effective des spaxels hexagonaux de  $0''.558/\text{spaxel}$ . Il est important de comprendre que cette adaptation d'échelle est purement numérique et ne correspond pas à un ré-échantillonnage. La Figure 7.1 illustre l'importance de prendre en compte cette différence de taille entre les spaxels.

Avant de projeter le flux du cube intrinsèque, nous incluons un modèle de correction du seeing. En effet, les images PS1 ayant un seeing plus petit ( $\sim 1''.2$ ) que celui de la SEDm ( $\sim 2''$ ), nous devons prendre en compte cette différence avant le ré-échantillonnage spatial.

En toute rigueur, il faudrait entraîner un modèle de PSF relatif entre PS1 et la SEDm. Dans ce travail, nous avons supposé que la correction du seeing relatif pouvait être modélisée par une gaussienne 2D asymétrique (présentant une potentielle ellipticité). Le

---

1. <https://github.com/shapely/shapely>

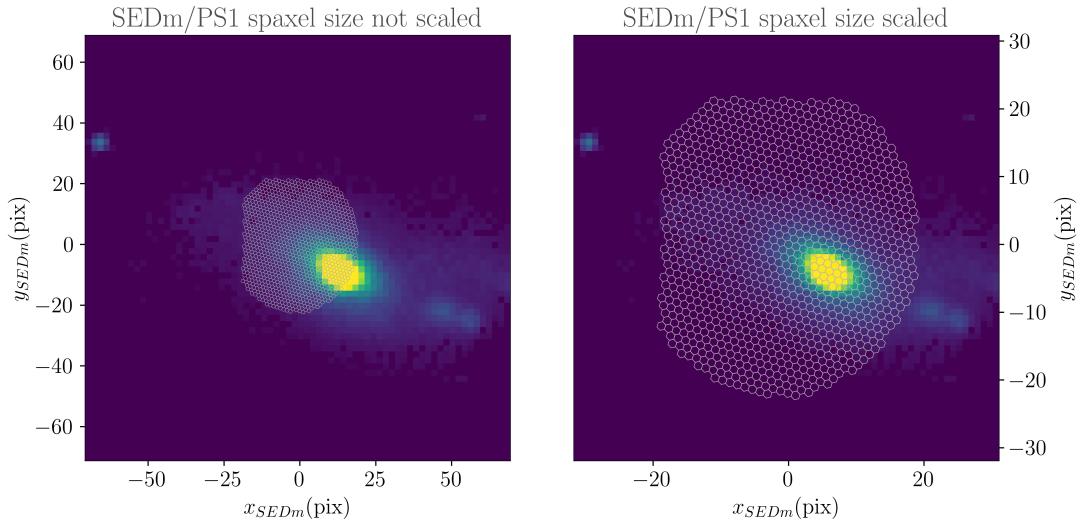


FIGURE 7.1 – Concordance des champs de vue PS1 et SEDm sur la supernova ZTF18accorf en appliquant le rapport d'échelle entre la taille des pixels de chaque instrument. La grille hexagonale correspond au MLA de la SEDm, superposé sur une métatranche du cube intrinsèque empilé. La superposition illustrée ici aligne le centre du MLA et celui du cube.

seeing des images PS1 et de la SEDm n'étant pas fixes, les paramètres de ce modèle seront libres dans notre modélisation de scène.

Après la convolution de la tranche considérée du cube intrinsèque par ce kernel gaussien, nous devons déterminer une position d'ancrage entre la grille hexagonale et la tranche du cube à projeter.

Cette ancre de projection doit être une position du ciel dont nous connaissons la localisation à la fois dans les images PS1, et dans le MLA de la SEDm. Par défaut dans **HYPERGAL**, nous utilisons la position de l'événement transitoire détectée par la caméra ZTF, à partir de laquelle nous avons récupéré les images PS1. La caméra de guidage de la SEDm (la *Rainbow Camera*) nous fournit également une position approximative de l'objet détecté dans le MLA.

Nous alignons ainsi cette position du MLA avec le centre de la tranche du cube considérée avant d'effectuer la projection du flux.

Pour procéder à la projection du flux dans l'espace spatial de la SEDm, nous utilisons le module **GEOPANDAS**<sup>1</sup> ([JORDAHL et al., 2020](#)). Cet outil nous permet de superposer les deux grilles de polygones décrivant les géométries du cube intrinsèque et du MLA, puis de déterminer les aires de chevauchement entre tous les pixels.

Nous récupérons ainsi pour chaque pixel du MLA l'intégrale des flux du cube qui le chevauchent, en pondérant par l'aire de superposition. Cette aire de superposition est égale à 1 lorsque qu'un pixel carré du cube est entièrement contenu dans un pixel hexagonal du MLA.

Nous présentons dans la Figure 7.2 la projection d'une métatranche du cube intrinsèque dans l'espace de la SEDm, convoluée par une gaussienne 2D sans ellipticité d'écart type 1 pixel (= 0''.5). L'ancrage est effectué à partir de la position de la supernova ZTF18accorf dans le MLA estimée par la caméra de guidage.

1. <https://geopandas.org/>

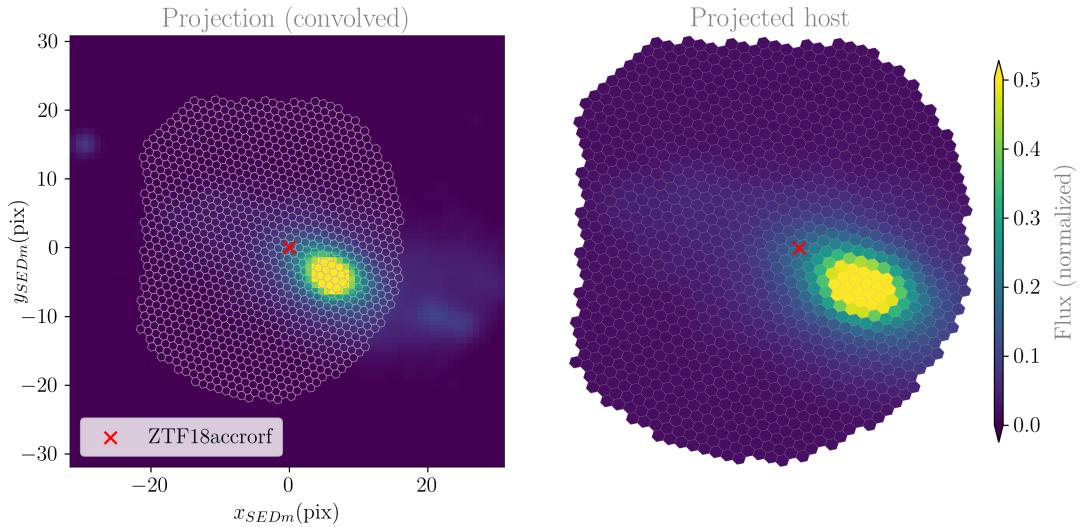


FIGURE 7.2 – Projection de la galaxie hôte dans le MLA pour une méta-tranche du cube intrinsèque. Pour l’illustration de cet exemple, nous avons convolué la tranche par une gaussienne 2D sans ellipticité d’écart type 1 pixel. La croix rouge indique la position de la supernova ZTF18accorf estimée par la *Rainbow Camera* dans le MLA, qui sert d’ancrage à la projection d’un espace spatial à l’autre.

Nous procédons ainsi à cette projection pour chaque méta-tranche du cube spectral. Tout comme avec les étoiles standards, les cubes de données SEDm sont affectés par les effets d’ADR, et ainsi la position d’ancrage varie en fonction de la longueur d’onde.

Ces paramètres ( $x_0, y_0$ ) sont donc également des paramètres libres de notre modélisation de scène, et la position renseignée par la *Rainbow Camera* fait office de condition initiale.

À ce stade de la modélisation, toutes les contributions relatives entre PS1 et la SEDm ont été prises en compte. Nous pouvons à présent compléter la scène avec les composantes de fond et de source ponctuelle.

### 7.1.3 Composantes de la scène

#### 7.1.3.1 Composante du fond : ciel et artefacts

Le fond du ciel ayant été retiré dans les images PS1 (WATERS et al., 2020), il nous faut modéliser cette composante. Pour les mêmes raisons évoquées dans le chapitre ?? avec l’extraction des étoiles standards, nous choisissons de modéliser le fond par un polynôme de second degré tel que :

$$\text{Bkgd}(x, y) = \begin{pmatrix} b_{xx} & & & 0 \\ & b_{yy} & & \\ & & b_{xy} & b_x \\ 0 & & & b_y \\ & & & b_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x^2 \\ y^2 \\ xy \\ x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (7.1)$$

avec  $x$  et  $y$  les coordonnées dans le MLA. La constante  $b_0$  est donc utilisée pour modéliser l’uniformité du ciel, tandis que les autres paramètres sont là pour corriger les artefacts

présents dans le cube de données.

### 7.1.3.2 Composante de la supernova

L'autre composante de la scène n'est autre que la supernova, une source ponctuelle entièrement caractérisée par la PSF de la SEDm. Nous utilisons donc bien évidemment le profil radial constraint établit au chapitre ?? :

$$PSF(r; \alpha, \eta) = N \left[ \eta \times \exp \left( -\frac{r}{2(\sigma_0 + \sigma_1 \times \alpha)^2} \right) + \left( 1 + \left( \frac{r}{\alpha} \right)^2 \right)^{-(\beta_0 + \beta_1 \times \alpha)} \right] \quad (7.2)$$

avec  $r$  le rayon elliptique du profil radial, et les  $\sigma_i$  et  $\beta_i$  fixés par l'entraînement du modèle.

La position de la supernova à modéliser dans le MLA est supposée confondue avec la position d'ancrage utilisée lors de la projection du cube intrinsèque. Cette approximation signifie que nous considérons la position de détection dans le ciel par la caméra ZTF suffisamment précise et ne nécessitant pas de donner de liberté à la position relative entre la galaxie et l'objet détecté.

### 7.1.4 Ajustement de la scène 2D

Toutes les composantes de la scène ayant été décrites, nous pouvons passer à l'ajustement de la scène 2D, en considérant les méta-tranches indépendamment les unes des autres.

Nous avons choisi par défaut dans `HYPERGAL` de considérer 6 méta-tranches dans l'intervalle spectral  $\lambda \in [5000, 8500]\text{\AA}$ . Ce choix est motivé par la précision spectrale de la calibration en flux de la Figure ?? du chapitre précédent. Bien que notre modèle de fond ait été conçu pour prévenir de potentiels artefacts strucutrés, ceux-ci deviennent parfois trop intenses au delà de ce domaine spectral. En se restreignant à cet intervalle, nous réduisons le risque de valeurs d'ajustements aberrantes pouvant compliquer par la suite l'ajustement chromatique. De plus, la majorité des supernovae observées par la SEDm sont des SNIea ( $\sim 75\%$ ), dont leur magnitude diminue fortement vers le rouge, notamment au delà de 8000-8500\AA. Le contraste entre une SNIa et sa galaxie hôte dans une méta-tranche au delà de ces valeurs est donc fortement réduit, ce qui permet difficilement la contrainte sur les paramètres de forme de la PSF. La Figure 7.3 illustre bien le type d'artefacts auxquels nous faisons référence, notamment sur les bords des cubes dans le bleu, et des franges d'interférences intenses dans le rouge.

Nous présentons dans la Table 7.1 la liste des paramètres libres de la modélisation de scène pour une méta-tranche.

L'ajustement se fait par minimisation de  $\chi^2$ , défini comme :

$$\chi^2 = \sum_{pixel} \left( \frac{(y_p - \tilde{y}_p)^2}{\sigma_p^2} \right) \quad (7.3)$$

où  $y_p$  et  $\sigma_p$  sont respectivement le flux et la racine de la variance dans un pixel  $p$  de la méta-tranche du cube SEDm, et  $\tilde{y}_p$  le flux modélisé dans ce même pixel. Nous effectuons la minimisation avec le module `IMINUIT`<sup>1</sup> (JAMES et ROOS, 1975; DEMBINSKI et al., 2020).

---

1. <https://iminuit.readthedocs.io/en/stable/>

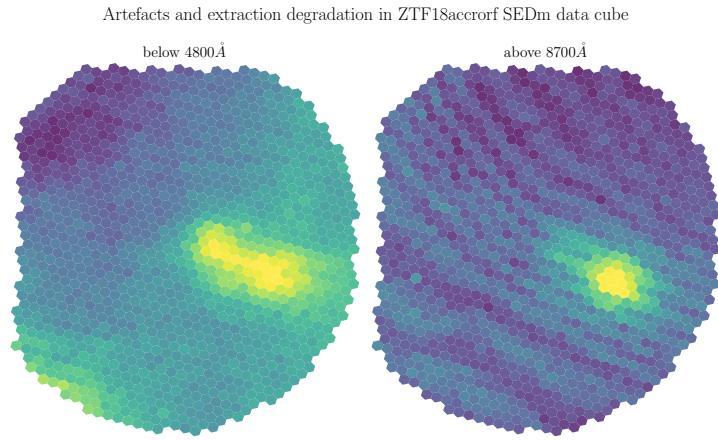


FIGURE 7.3 – Exemple d’artefacts dans les cubes de données SEDm pour ZTF18accorff. Nous montrons à gauche toutes les tranches en dessous de  $4800\text{\AA}$  du cube de données empilées, et à droite, toutes celles au dessus de  $8700\text{\AA}$ . Nous pouvons clairement voir dans le bleu la dégradation importante du signal, distordant complètement les objets dans le champ de vue, et également la présence d’artefacts de fond sur les bords du cube. Dans le rouge la forme des sources est également altérée, mais nous voyons surtout des franges d’interférences dans les données.

La procédure de construction de la scène pour une méta-tranche et pour chaque pas de minimisation du  $\chi^2$  se fait de la façon suivante :

- Convolution de la méta-tranche du cube intrinsèque par un kernel gaussien 2D asymétrique avec un paramètre d’amplitude ;
- Projection dans l’espace spatial de la SEDm suivant à partir de la position d’ancrage ;
- Ajout du fond structuré (ciel + artefacts) ;
- Ajout de la source ponctuelle (PSF + amplitude) ;
- Détermination du  $\chi^2$ , puis réitération des étapes précédentes ;

Nous présentons dans la Figure 7.4 l’ajustement des 6 méta-tranches par HYPERGAL pour ZTF18accorff. Pour chaque longueur d’onde, nous montrons la scène ajustée, la scène observée, et le résidu avec le RMS spatial associé. Dans le cas de cette observation, notre RMS spatial varie de 1.8% à 3.9%. Nous pouvons également remarquer l’augmentation de RMS pour la méta-tranche la plus bleue centrée sur  $5285\text{\AA}$ , probablement à cause d’un fond de plus en plus structuré comme illustré dans la Figure 7.3. La méta-tranche la plus rouge à  $8200\text{\AA}$  commence également à présenter des artefacts structurés, vraisemblablement des franges de Moiré (phénomène d’interférences).

La Figure 7.5 quant à elle présente la matrice de corrélation entre les paramètres libres de la scène pour la méta-tranche à  $\lambda = 6461\text{\AA}$ .

### 7.1.5 Ajustement chromatique

L’ajustement de chaque méta-tranche nous donne ainsi un jeu de  $N$  paramètres sur le domaine spectral  $[5000,8000]\text{\AA}$ . Nous modélisons la chromaticité de la PSF de la source ponctuelle de la même manière qu’avec les étoiles standards : une loi de puissance pour  $\alpha$

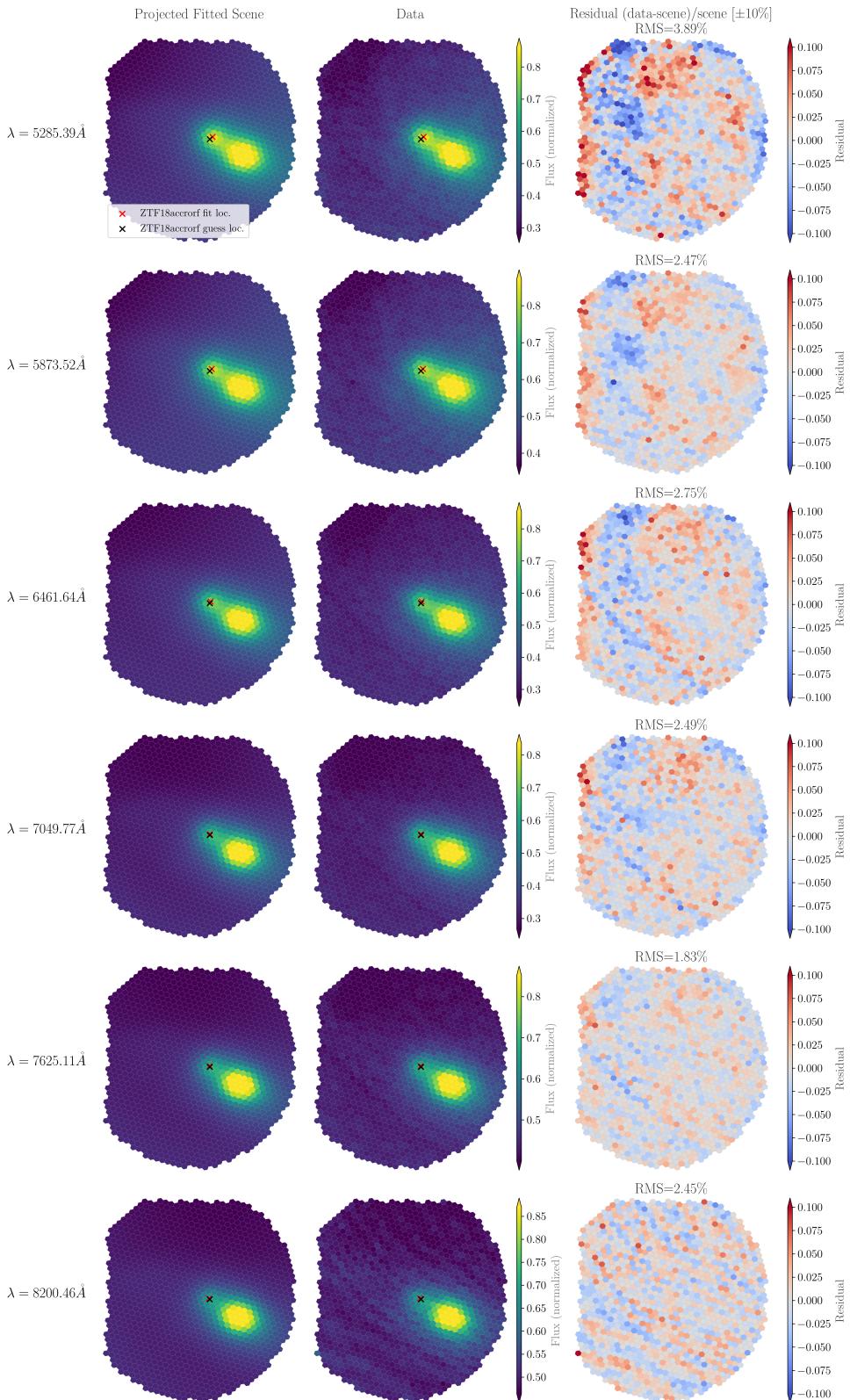


FIGURE 7.4 – Ajustement des méta-tranches pour la modélisation de scène de ZTF18accorf. *De haut en bas* sont représentées les méta-tranches modélisées du bleu vers le rouge. Pour chaque ligne *de gauche à droite* : La méta-tranche modélisée par HYPERGAL, la méta-tranche du cube de données SEDm, et le résidu pondéré par le modèle. Nous indiquons pour chaque longueur d'onde le RMS spatial de l'ajustement, allant de 1.8% à 3.9%. Les croix noires et rouges indiquent respectivement la position d'ancrage initiale (caméra de guidage), et la position ajustée par HYPERGAL.

TABLE 7.1 – Paramètres de modélisation de scène incluant toutes les composantes pour une métatranche dans HYPERGAL.

Paramètre		Symbole	
<b>Géométrie</b>			
Position d'ancrage			$x_0, y_0$
<b>Galaxie hôte</b>			
PSF relative SEDm/PS1			$\sigma$
Ellipticité (PSF relative)			$\mathcal{A}_G, \mathcal{B}_G$
Amplitude			$G$
<b>Fond</b>			
Artefacts			$b_{xx}, b_{yy}, b_{xy}, b_x, b_y$
Ciel			$b_0$
<b>Source ponctuelle (SN)</b>			
PSF SEDm			$\alpha, \eta$
Ellipticité (PSF)			$\mathcal{A}, \mathcal{B}$
Amplitude			$I$

**Note.** Les paramètres d'amplitudes et de fond sont des paramètres de nuisance dans la modélisation des métatranches.

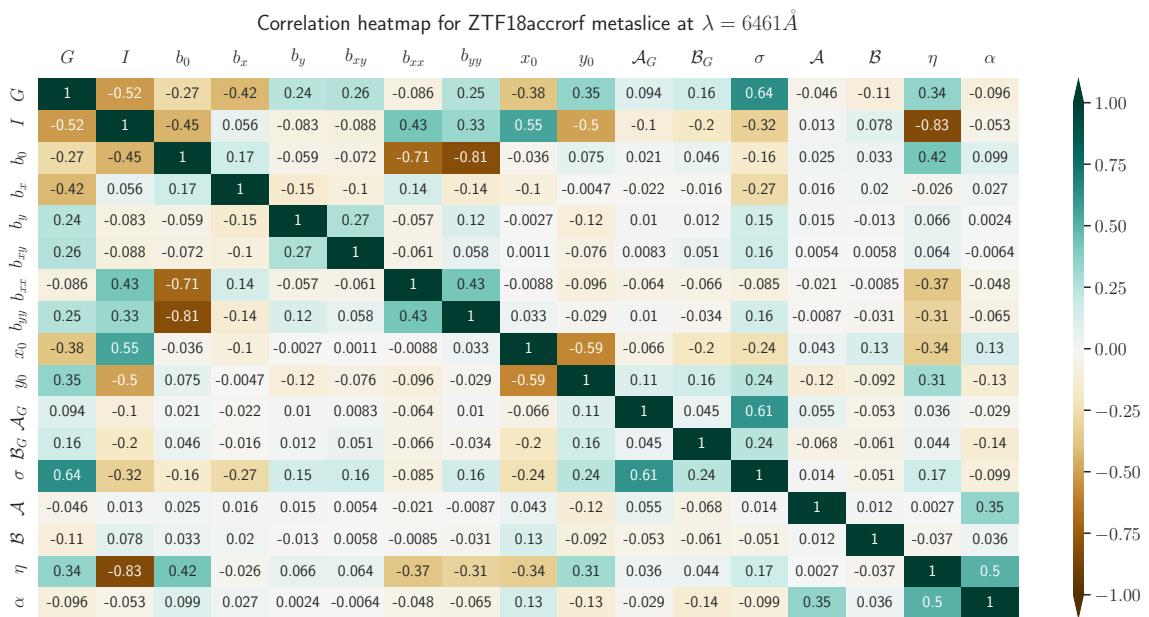


FIGURE 7.5 – Matrice de corrélation des paramètres d'ajustement de scène de ZTF18accorf pour la métatranche à  $\lambda = 6461\text{\AA}$ .

(rayon de la Moffat), et une constante pour  $\eta$  (poids gaussienne/Moffat),  $\mathcal{A}$  et  $\mathcal{B}$  (ellipticité et orientation).

Nous montrons dans la Figure 7.6 la modélisation chromatique de ces 4 paramètres.

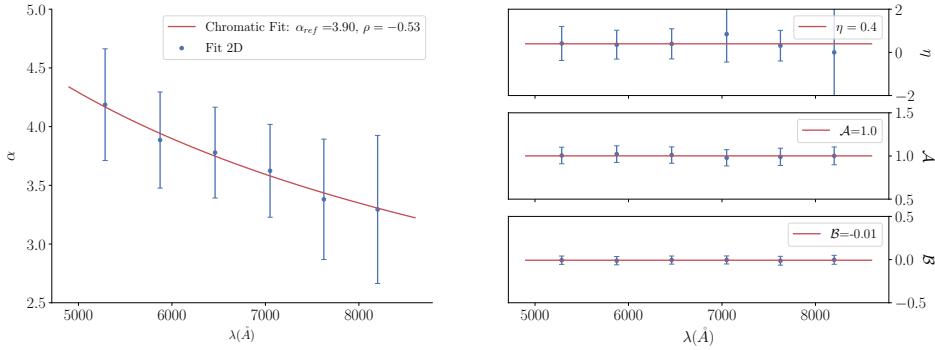


FIGURE 7.6 – Ajustement de la chromaticité des paramètres de forme de la PSF pour la supernova ZTF18accorrf, à partir des 6 méta-tranches. À gauche l’ajustement du paramètre  $\alpha$  avec une loi de puissance. À droite de haut en bas, l’ajustement par une constante de  $\eta$  (poids entre la gaussienne et la Moffat) et des paramètres d’ellipticité ( $\mathcal{A}$ ) et d’orientation ( $\mathcal{B}$ ).

Nous utilisons également pour l’ellipticité et l’orientation de la PSF relative (SEDm/PS1) une modélisation chromatique par une constante.

La chromaticité du rayon de la gaussienne de cette PSF relative est modélisée par une loi de puissance, de la même façon que le paramètre de forme principal de la source ponctuelle :

$$\sigma(\lambda) = \sigma_{ref} \left( \frac{\lambda}{\lambda_{ref}} \right)^{\rho_g} \quad (7.4)$$

De la même façon que pour la source ponctuelle, nous montrons dans la Figure 7.7 la modélisation chromatique des paramètres décrivant la PSF relative par laquelle nous avons convolué les méta-tranches du cube intrinsèque.

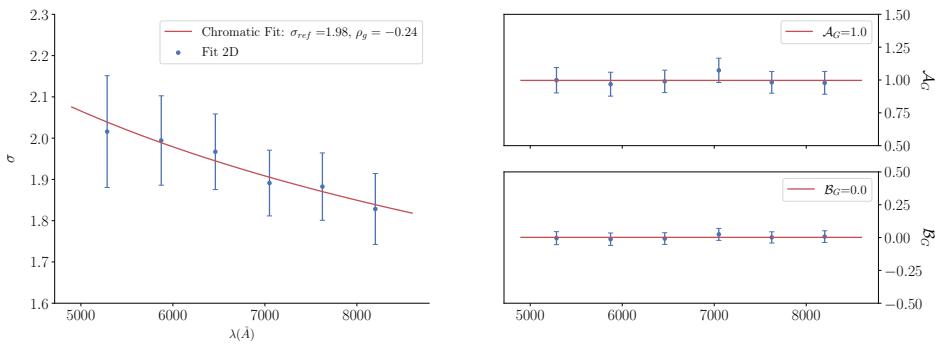


FIGURE 7.7 – Ajustement de la chromaticité des paramètres de forme de la PSF relative SEDm/PS1 pour la galaxie hôte de la supernova ZTF18accorrf, à partir des 6 méta-tranches. À gauche l’ajustement du paramètre  $\sigma$  avec une loi de puissance. À droite de haut en bas, les paramètres d’ellipticité ( $\mathcal{A}_G$ ) et d’orientation ( $\mathcal{B}_G$ ).

Enfin, à partir de l’ajustement de la position d’ancrage lors de la projection pour chaque

méta-tranche, nous modélisons les paramètres de la réfraction atmosphérique différentielle pour cette observation. Cet ajustement est illustré dans la Figure 7.8.

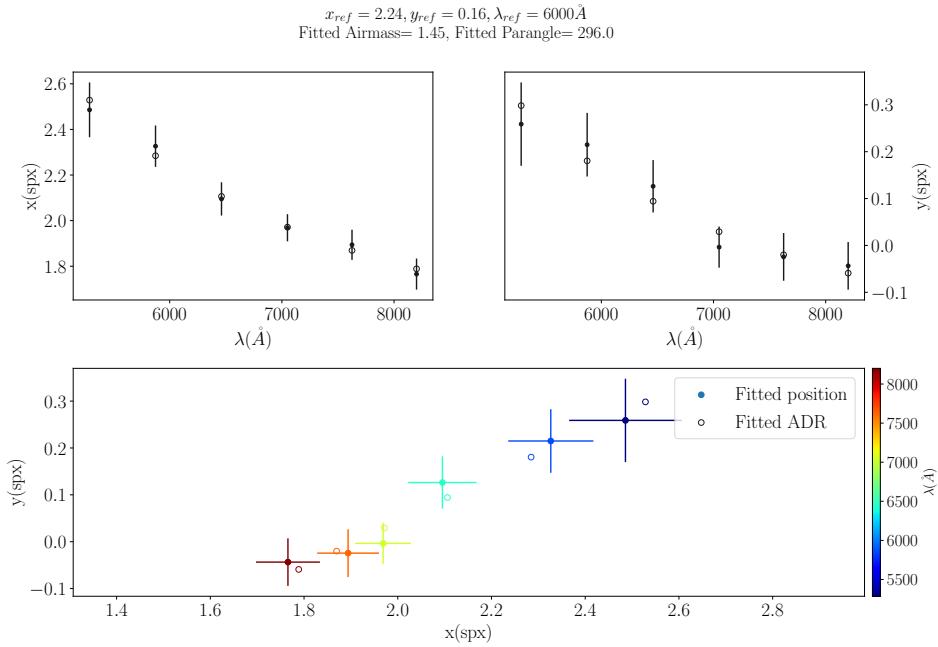


FIGURE 7.8 – Modélisation de la réfraction atmosphérique différentielle pour ZTF18accorf. Nous montrons ici l’ajustement de la position d’ancrage ( $x_0, y_0$ ) qui représente le centroïde de la supernova par le modèle d’ADR présenté dans le chapitre ???. Les deux graphes du haut représentent l’ajustement des deux coordonnées en fonction de la longueur d’onde. Le graphe du bas illustre l’effet de la réfraction atmosphérique.

Si pour une raison quelconque l’ajustement d’une méta-tranche n’a pas convergé, celle-ci est ignorée lors de l’ajustement chromatique. D’autre part, nous limitons l’impacte de potentielles valeurs aberrantes en utilisant une fonction de perte de Huber (HUBER, 1964). Plus exactement, nous utilisons la fonction de perte *pseudo-Huber* d’ordre 1 (appelée *soft-l1*), qui est une approximation lisse de la fonction originale, définie elle par morceau. Si on considère comme l’analogie mécanique à un ajustement de  $\chi^2$  un système avec des forces attractives, alors les points de données attirent le modèle avec une force possédant un potentiel  $V(a)$  pour un décalage quadratique  $a$ . La Figure 7.9 montre la forme d’un potentiel standard (fonction de perte linéaire), en comparaison avec un potentiel pseudo-Huber d’ordre 1. On voit que l’utilisation de ce potentiel permet d’affaiblir le poids des valeurs aberrantes, ce qui permet de ne pas faire dévier excessivement l’ajustement du modèle.

#### Estimation des valeurs initiales pour la modélisation de scène des méta-tranches.

Toute la procédure expliquée précédemment, de l’ajustement 2D des méta-tranches à l’ajustement chromatique, est également réalisée directement entre les images PS1 et les méta-tranches à transmission équivalentes du cube SEDm. Nous effectuons cette étape préliminaire simultanément avec la construction du cube intrinsèque afin d’optimiser le temps de calcul et les ressources numériques utilisées. Ces ajustements permettent d’obtenir un jeu de paramètres initial pour l’ajustement de scène principal.

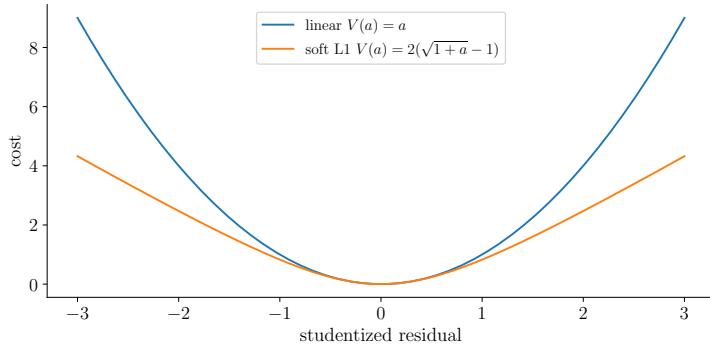


FIGURE 7.9 – Mise en évidence du poids plus faible accordé aux valeurs aberrantes avec la fonction de perte *pseudo-Huber*.

Une fois l’ajustement de la chromaticité des paramètres de la scène effectué, nous fixons tous les paramètres et procédons à l’ajustement de toutes les tranches du cube en laissant libre les paramètres de nuisances. Le coefficient d’amplitude correctif de la galaxie  $G$  et également laissé libre pour toutes les tranches. Nous avons remarqué que cela permet de prévenir les potentiels sur/sous-estimations de l’intensité des raies modélisées dans le cube intrinsèque, d’éventuels fluctuations causées par une calibration en flux de mauvaise qualité ou encore des résidus telluriques dans le cube SEDm. Nous reviendrons sur ce point à la fin de cette section lors de l’extraction des sources pour illustrer nos propos.

La Figure 7.10 montre le résultat final de la modélisation de scène effectuée avec **HYPERGAL** pour la supernova ZTF18accrorf. Nous y présentons l’image 2D du cube de données SEDm et du cube modélisé empilés entre 5000Å et 8500Å. Afin de contrôler la qualité de l’ajustement, nous montrons également le pull spectral et le RMS spectral pour chaque spaxel.

Le RMS spectral est calculé comme dans l’équation ???. Le pull spectral est quant à lui calculé après intégration du spectre pour un spaxel donné de la façon suivante :

$$p_{spx} = \frac{\sum_{\lambda} (y_{\lambda} - \tilde{y}_{\lambda})}{\sqrt{\sum_{\lambda} \sigma_{\lambda}^2}} \quad (7.5)$$

avec  $\tilde{y}$  la prédiction du modèle,  $y$  la donnée dans le cube SEDm et  $\sigma$  l’erreur sur  $y$ .

## 7.2 Extraction des sources

Une fois la modélisation de scène complétée, résultant en un cube 3D dans l’espace des observations de la SEDm, nous sommes en mesure d’extraire chacune des composantes : le fond, la galaxie hôte et la source ponctuelle.

### 7.2.1 Extraction de la galaxie hôte

Afin d’extraire la galaxie hôte du cube de données, nous l’isolons en soustrayant les modèles de fond et de la source ponctuelle au cube SEDm.

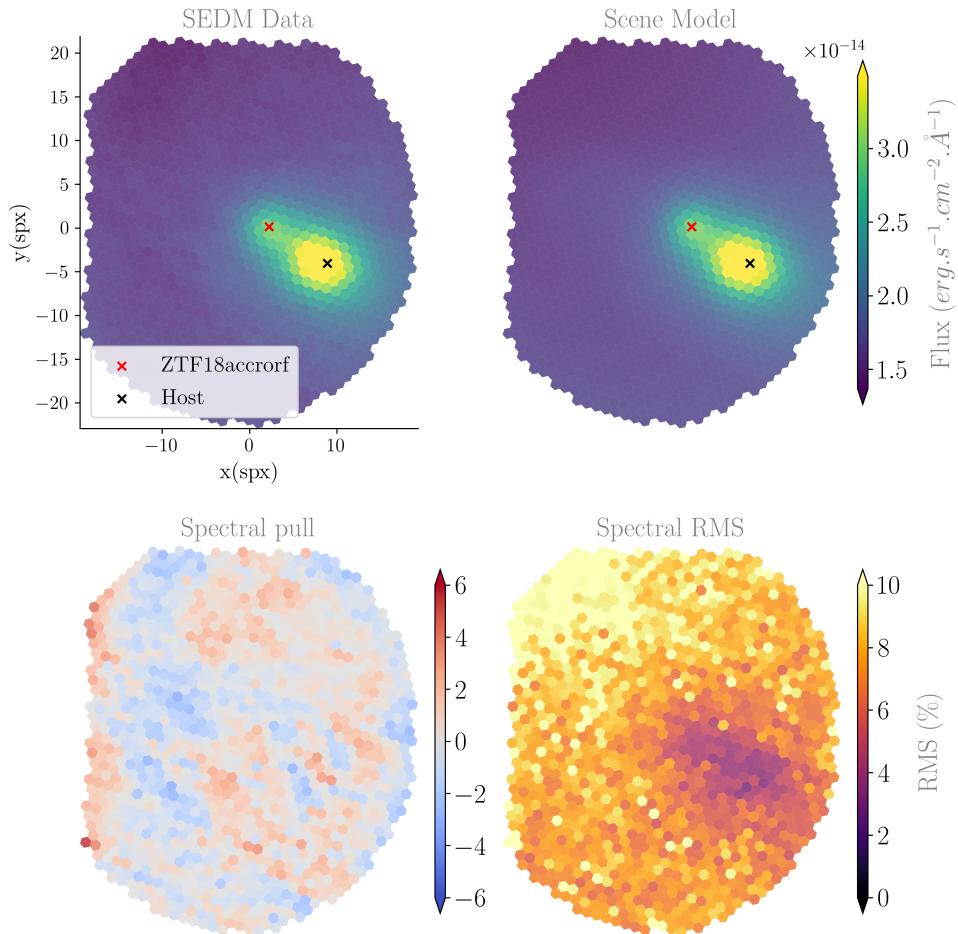


FIGURE 7.10 – Modélisation de scène complète pour ZTF18accorrf. *En haut* nous montrons *de gauche à droite* : le cube de données SEDm empilé entre 5000 et 8500, puis le cube modélisé par HYPERGAL empilé également sur le même domaine spectral. La croix rouge indique la position ajustée de ZTF18accorrf à 7000Å, et la croix noire la position de la galaxie hôte. *En bas* nous montrons *de gauche à droite* : le pull spectral tel que définit dans l'équation 7.5, et le RMS spectral en %. Le pull nous permet de contrôler la présence éventuelle de structures dans le résidu, ce qui n'est pas le cas ici. Le RMS quant à lui nous indique une précision de l'ordre de 4% sur le domaine spectral considéré au niveau des sources présentes dans le champ de vue de la SEDm. Les fluctuations du fond induisent un RMS spectral de l'ordre de 6-7%, et nous pouvons clairement voir les conséquences de l'artefact en haut à gauche du cube de données.

Une galaxie n'étant pas une source ponctuelle, nous devons définir une ouverture afin d'en extraire le spectre.

Nous utilisons pour cela l'outil **SEP**<sup>1</sup> ([BARBARY, 2016](#)) (implémentation python de **SEXTRACTOR** [BERTIN et ARNOUDS \(1996\)](#)), en définissant une ellipse d'ouverture dans les images PS1 que nous projetons ensuite dans le MLA de la SEDm à l'aide des solutions WCS des deux espaces. Nous négligeons les effets d'ADR dans cette procédure, étant donné qu'ils induisent rarement un déplacement de plus d'un spaxel dans le champ de vue. Nous illustrons dans la Figure 7.11 l'extraction du spectre de la galaxie hôte de ZTF18accorrf, en considérant les spaxels mis en évidences sur l'image du cube empilée. Ce que nous montrons ici n'est pas le spectre de la galaxie modélisée, mais bien celui de la galaxie dans le cube de données de la SEDm, auquel nous avons retiré les modèles de fond et de la source ponctuelle.

De la même façon que la modélisation hyperspectrale de la galaxie (et du fond) nous permet de lever la contamination de la supernova, la modélisation de la supernova nous permet également de réduire la contamination de la galaxie et de l'isoler dans les cubes d'observation.

Connaissant également a priori le redshift utilisé pour la modélisation de la galaxie, nous indiquons la position déduite de quelques raies d'absorption et d'émission<sup>2, 3</sup> dans l'air ([MORTON, 1991](#)), afin de visualiser la cohérence entre le spectre isolé dans les données et le redshift utilisé. Dans le cas de cette galaxie, nous pouvons par exemple voir la concordance entre le redshift  $z = 0.042$  et la position de la raie H $\alpha$ .

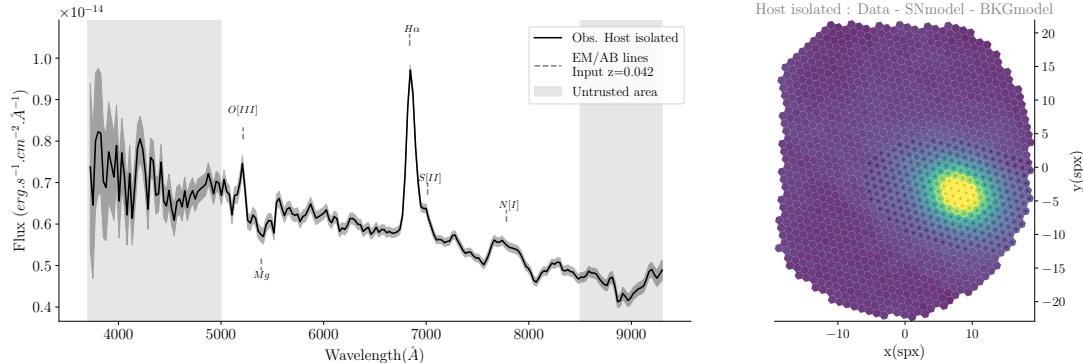


FIGURE 7.11 – Extraction du spectre de la galaxie hôte de ZTF18accorrf. *À droite* nous montrons le cube de données de la SEDm, auquel nous avons soustrait les modèles de fond et de la source ponctuelle afin d'isoler la galaxie hôte. Les spaxels sélectionnés par les losanges noirs indiquent ceux appartenant à l'ouverture utilisée pour l'extraction du spectre. *À gauche* nous montrons donc le spectre extrait et l'erreur associée contenus dans cette ouverture. Tout le domaine spectral de la SEDm est affiché, et les bandes grises indiquent les zones auxquelles nous accordons généralement une faible fiabilité ( $\lambda < 5000\text{\AA}$  et  $\lambda > 8500\text{\AA}$ ) due aux artefacts présents dans les cubes SEDm. Nous montrons également la position théorique de quelques raies d'émission et d'absorption sachant le redshift utilisé, et nous pouvons voir ici la bonne cohérence avec le spectre extrait.

1. <http://github.com/kbarbary/sep>

2. <http://astronomy.nmsu.edu/drewski/tableofemissionlines.html>

3. <http://classic.sdss.org/dr6/algorithms/linetable.html>

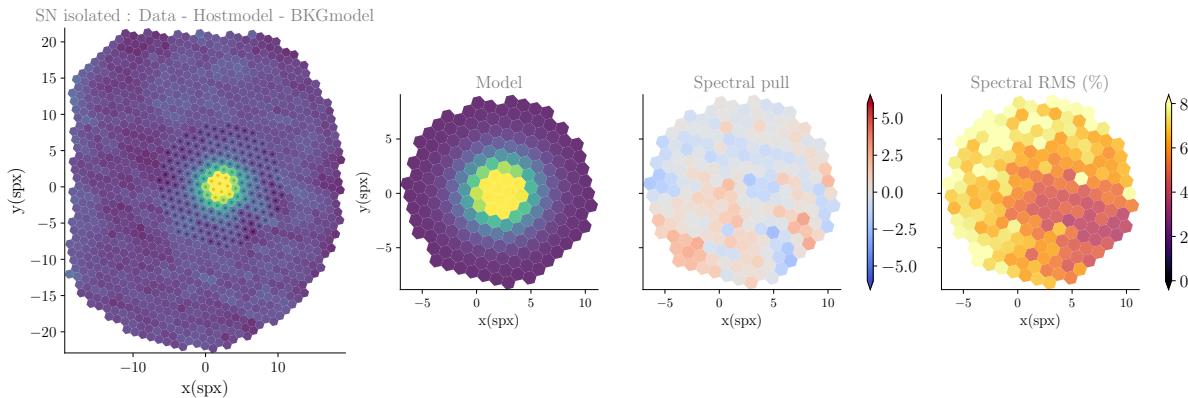


FIGURE 7.12 – Isolation de la supernova ZTF18accorrf dans le cube SEDm. Chaque image de cube 3D correspond à un empilement entre 5000 et 8500Å. *De gauche à droite* : (a) le cube de données SEDm auquel nous avons soustrait le modèle de la galaxie et celui du fond, ce qui met en évidence la qualité d’isolation de la supernova et à fortiori la qualité de modélisation des deux autres composantes. (b) Le cube modèle de la source ponctuelle limité à une ouverture circulaire de 8 spaxels ( $\sim 4''.5$ ) de rayon, définie par les spaxels mis en évidence dans (a) par les losanges noirs. (c) Le pull spectral et (d) le RMS spectral dans cette ouverture, tout deux définis comme dans la Figure 7.10. Nous pouvons voir ici l’absence de structure résiduelle, et un RMS spectral de l’ordre de 3-4% au niveau de la position de ZTF18accorrf.

### 7.2.2 Extraction de la Supernova

De la même façon qu’avec la galaxie hôte, nous pouvons vérifier la l’isolation de la supernova dans le cube de données en y soustrayant le modèle de fond et de la galaxie. La Figure 7.12 illustre ainsi le cube SEDm de l’observation auquel nous avons retiré les deux autres composantes, et nous pouvons voir à quel point la supernova est bien définie sans structure résiduelle apparente. Nous pouvons par exemple définir une ouverture arbitraire (ici circulaire de 8 spaxels  $\sim 4''.5$  de rayon) centrée sur la position de la source ponctuelle et porter un visuel sur le pull et le RMS spectral dans cette ouverture. Pour cette observation nous pouvons par exemple voir un RMS spectral de l’ordre de 3-4% au niveau de la position de la supernova dans le cube, et aucune structure résiduelle apparente (en provenance d’une mauvaise modélisation galactique par exemple).

Nous pouvons également vérifier la robustesse du modèle de PSF que nous avons défini et contraint dans le chapitre précédent en superposant le modèle ajusté de profil radial aux données. Afin de permettre également un contrôle de la qualité de l’ajustement du fond de ciel, et la présence éventuelle de structure résiduelle, nous visualisons ce profil radial après soustraction du fond ajusté et du modèle hyperspectral de la galaxie hôte. Nous montrons ainsi dans la Figure 7.13 le profil radial ajusté pour une des méta-tranches. Nous pouvons voir que le fond de ciel tend bien vers 0, ce qui indique une bonne estimation de cette composante. Par ailleurs, nous n’observons pas de valeur aberrante dans la supernova isolée, ce qui à son tour traduit une soustraction galactique sans résidu notable.

L’ajustement de l’amplitude de la PSF de la supernova à chaque tranche nous permet ainsi d’en extraire le spectre, de la même façon qu’avec les étoiles standards. Nous montrons enfin dans la Figure 7.14 le spectre extrait de ZTF18accorrf.

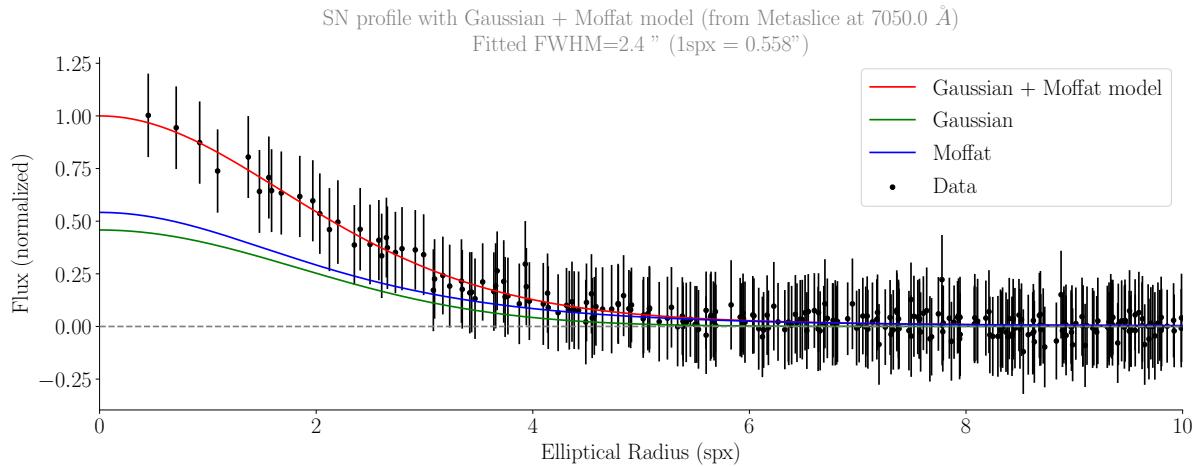


FIGURE 7.13 – Profile radial et modèle de PSF pour la méta-tranche à  $7050\text{\AA}$  de ZTF18accorf. Le flux est ici normalisé à 1. Les points noirs indiquent les données de la méta-tranche du cube d’observation de la SEDm, après soustraction du modèle de la galaxie et du fond. Les courbes verte, bleue et rouge montrent respectivement l’ajustement de la composante gaussienne, Moffat et profil radial total du modèle de PSF pour cette méta-tranche. Le trait horizontal en pointillés indique un fond de ciel à 0 si cette composante a été parfaitement soustraite. Les ailes du profil tendant clairement vers cette valeur, cela nous conforte quant à la qualité d’ajustement de cette composante. Connaissant la taille d’un spaxel, nous pouvons également déterminer la largeur à mi-hauteur à cette longueur d’onde, ici  $2''.4$ .

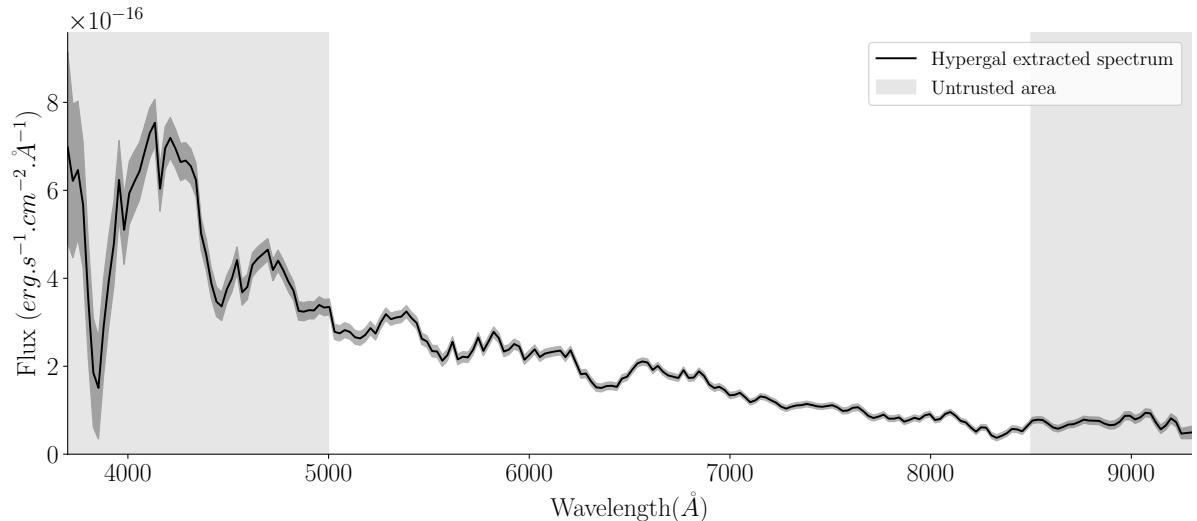


FIGURE 7.14 – Spectre extrait de ZTF18accorf avec HYPERGAL. Tout le domaine spectral de la SEDm est affiché, et les bandes grises indiquent les zones auxquelles nous accordons généralement une faible fiabilité.

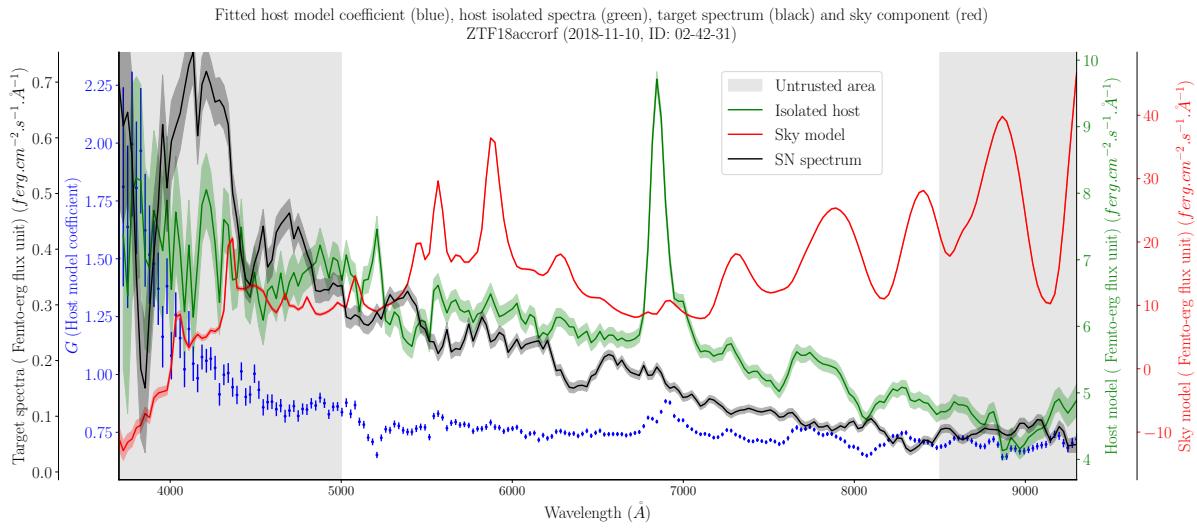


FIGURE 7.15 – Superposition du spectre des 3 composantes de la scène d’observation de ZTF18accorf : fond de ciel en rouge, galaxie en vert, supernova en noir. Nous montrons également l’évolution chromatique de l’ajustement du coefficient de correction  $G$  du cube intrinsèque. Le but de cette superposition est de mettre en évidence l’absence de contamination évidente entre les spectres notamment par les raies d’émission de la galaxie. L’évolution du paramètre  $G$  montre l’adaptation de l’intensité des raies O[III] et H $\alpha$  aux observations.

Dans la Figure 7.15 nous montrons la superposition du spectre des 3 composantes (fond, galaxie, supernova), ainsi que l’ajustement du coefficient de correction  $G$  du cube intrinsèque. L’objectif principal de cette visualisation et de vérifier une potentielle contamination entre les spectres, par exemple des raies d’émission de la galaxie, ce qui ne semble pas être le cas ici. Nous pouvons par ailleurs voir l’évolution chromatique du coefficient  $G$ , qui semble corriger dans le cube intrinsèque un excédant d’intensité de la raie d’émission O[III] vers 5200Å, et un déficit d’intensité de la raie H $\alpha$ . Bien que nous n’ayons pas poussé l’analyse de cet effet, nous avons choisi pour le moment de laisser ce coefficient  $G$  libre lors de l’ajustement linéaire des amplitudes par tranche spectrale, afin d’avoir cette liberté de correction. Le modèle de ciel présent dans cette figure correspond au coefficient de degré 0 du modèle de fond  $b_0$  (équation 7.1).

Nous présentons finalement le schéma complet de toute la procédure de modélisation de scène avec **HYPERGAL**. Un script d’automatisation de tout ce processus est également disponible dans le code du pipeline, prenant en entrée le nom d’une cible observée avec ZTF (par exemple ZTF18accorf), et/ou le chemin d’accès au cube de données. Les informations relatives à l’événement transitoire étudié (redshift, RA/DEC) sont automatiquement récupérées sur le serveur Fritz<sup>1</sup> ([VAN DER WALT et al., 2019; DUEV et al., 2019; KASLIWAL et al., 2019; DUEV et VAN DER WALT, 2021](https://fritz.science/)), mais peuvent également être imposées en argument. **HYPERGAL** est conçu pour être suffisamment flexible et adaptable à n’importe quel cube 3D. Par défaut, le pipeline est optimisé avec la librairie de calculs parallèles **DASK**<sup>2</sup> ([DASK DEVELOPMENT TEAM, 2016](https://www.dask.org)).

1. <https://fritz.science/>

2. <https://www.dask.org>

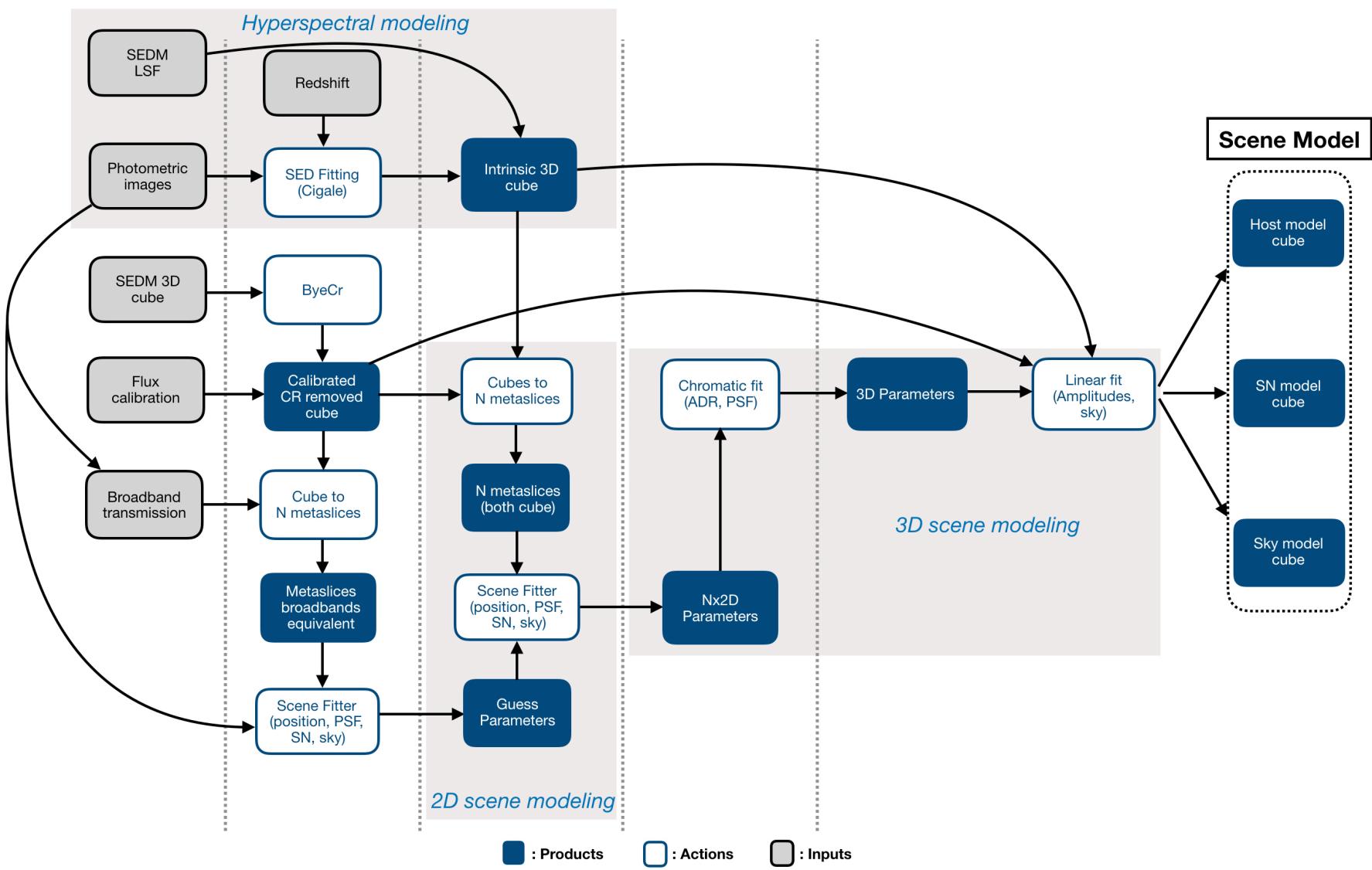


FIGURE 7.16 – Schéma complet du fonctionnement d’HYPERGAL. Les étapes sur la même verticale sont effectuées simultanément.

### 7.3 Classification : SNID

Bien que le but principal du pipeline **HYPERGAL** est de *permettre* la classification du spectre des objets transitoires observés et non leur classification elle même, nous avons intégré une méthode de classification automatique à l'image de celle utilisée initialement dans **PYSEDM**. Nous utilisons pour cela le software **SNID**, présenté dans le chapitre ???. Le domaine spectral utilisé par défaut pour la classification s'étend entre 4000 et 8000Å, les modèles utilisés n'étant généralement pas défini au delà dans l'intervalle de redshift d'observation de ZTF. Bien que nous ayons présenté notre méfiance quant à la fiabilité des données en deça de 5000Å dans les cubes de la SEDm, nous conservons le spectre extrait jusqu'aux 4000Å pour la classification en raison des fortes caractéristiques des SNIae se trouvant dans cet interval spectral (absorption du silicium, flux plus intense dans le bleu).

Afin de faciliter l'utilisation de **SNID** initialement écrit en **FORTRAN**, nous utilisons une adaptation **PYTHON** : **PYSNID**<sup>1</sup>.

Nous montrons dans la Figure 7.17 la classification obtenue du spectre extrait de ZTF18accr0f avec **HYPERGAL**, à comparer avec celle obtenue par extraction sans modélisation de la galaxie hôte par **PYSEDM**, que nous avons présenté dans la Figure ???. Initialement, la classification était plus qu'incertaine, avec un paramètre de qualité *rlap* de 4.5 (le seuil minimal de "bonne qualité" étant 5), et un redshift estimé de  $z = 0.178$  (au delà de la profondeur en magnitude de la SEDm). La classification avec le spectre extrait par **HYPERGAL** montre pour le meilleur modèle un *rlap* de 12.5 pour une supernova de type Ia, à un redshift proche de celui estimé de la galaxie hôte ( $z_{snid} = 0.040$  contre  $z_{host} = 0.042$ ).

Nous présentons également la distribution des 30 modèles avec un *rlap* > 6, ainsi que le meilleur pour chaque sous-type de supernova pouvant correspondre au spectre extrait de ZTF18accr0f. Nous pouvons voir que seuls 2 sous-types semblent compatibles : une Ia-normal, ou une Ia-91T. Bien que la classification du sous-type soit plus subtile, la classification de ZTF18accr0f ne présente aucun doute comme étant une Ia.

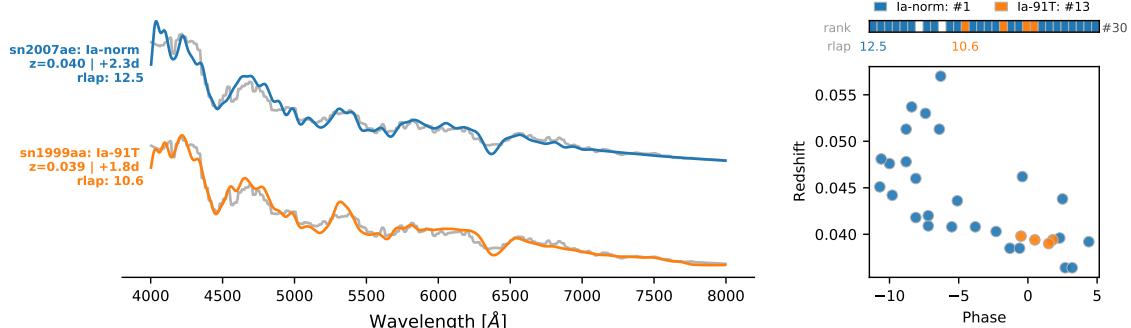


FIGURE 7.17 – Classification de ZTF18accr0f avec **SNID**. À gauche les modèles ayant le plus haut *rlap* pour chaque sous-type présent dans les 30 meilleurs modèles. Pour chacun nous y montrons le spectre extrait par **HYPERGAL** en gris, le modèle en couleur, le type et sous-type, le redshift, la phase et le *rlap*. À droite est présenté la distribution redshift/phase des 30 meilleurs modèles, avec pour le sous-type le même code couleur que pour les spectres affichés à gauche.

1. <https://github.com/MickaelRigault/pysnid>

## 7.4 Cas complexes

Bien que le cas utilisé pour présenter le pipeline **HYPERRAL** (ZTF18accr0rf) pouvait donner du fil à retordre à la méthode d'extraction directe (**PYSEDM**), nous considérons ce type d'observation comme idéal, avec une séparation assez net de sa galaxie hôte.

Nous présentons dans cette section quelques cas d'extraction plus complexes de spectre avec **HYPERRAL**, pour des observations où la supernova explose bien plus proche du bulbe galactique.

Pour toutes les observations que nous présentons ici, l'extraction avec le pipeline **PYSEDM** ne permet de classifier le spectre de la supernova, le cœur de la galaxie hôte étant extrait en même temps que la source ponctuelle (voir Figure ??).

Nous présenterons successivement pour chaque observation : une visualisation globale de la modélisation de scène avec le RMS et le pull spectral à l'instar de la Figure 7.10 ; l'isolation de la galaxie hôte dans le cube de données SEDm et le spectre extrait dans l'ouverture définie dans la section 7.2.1 ; l'isolation de la supernova dans le cube de données SEDm et le spectre extrait (section 7.2.2) ; la classification avec **SNID** (section 7.3).

### 7.4.1 ZTF19acbjlnt

Cette supernova est celle que nous avons présenté à la fin du chapitre ??, afin justement d'illustrer le phénomène de contamination par la galaxie hôte lors d'un alignement avec le bulbe galactique dans la ligne de visée. La distance apparente entre la supernova et le centre de la galaxie est d'environ  $0''.8$ , c'est à dire moins de la moitié de la largeur à mi-hauteur typique de la SEDm, et à un peu plus d'un spaxel de distance du centre du cœur de la galaxie hôte.

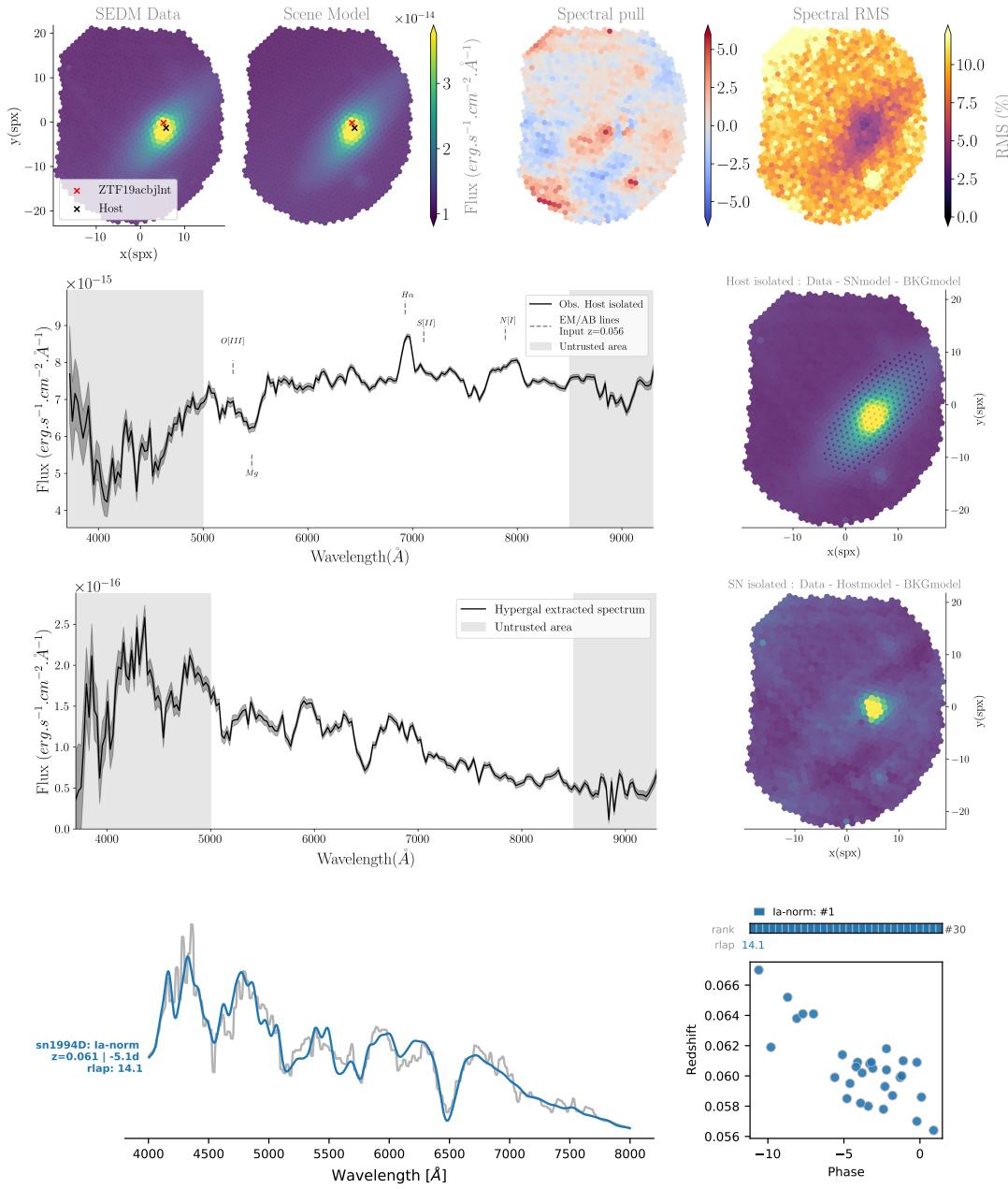


FIGURE 7.18 – Extraction de sources pour ZTF19acbjlnt avec HYPERGAL. *De haut en bas :* (a) visualisation globale de la modélisation de scène, pull et RMS spectraux, (b) l’isolation de la galaxie hôte, (c) l’isolation de ZTF19acbjlnt, (d) la classification de ZTF19acbjlnt. La distance apparente entre la supernova et la galaxie est d’environ 0''.8.

### 7.4.2 ZTF19abormno

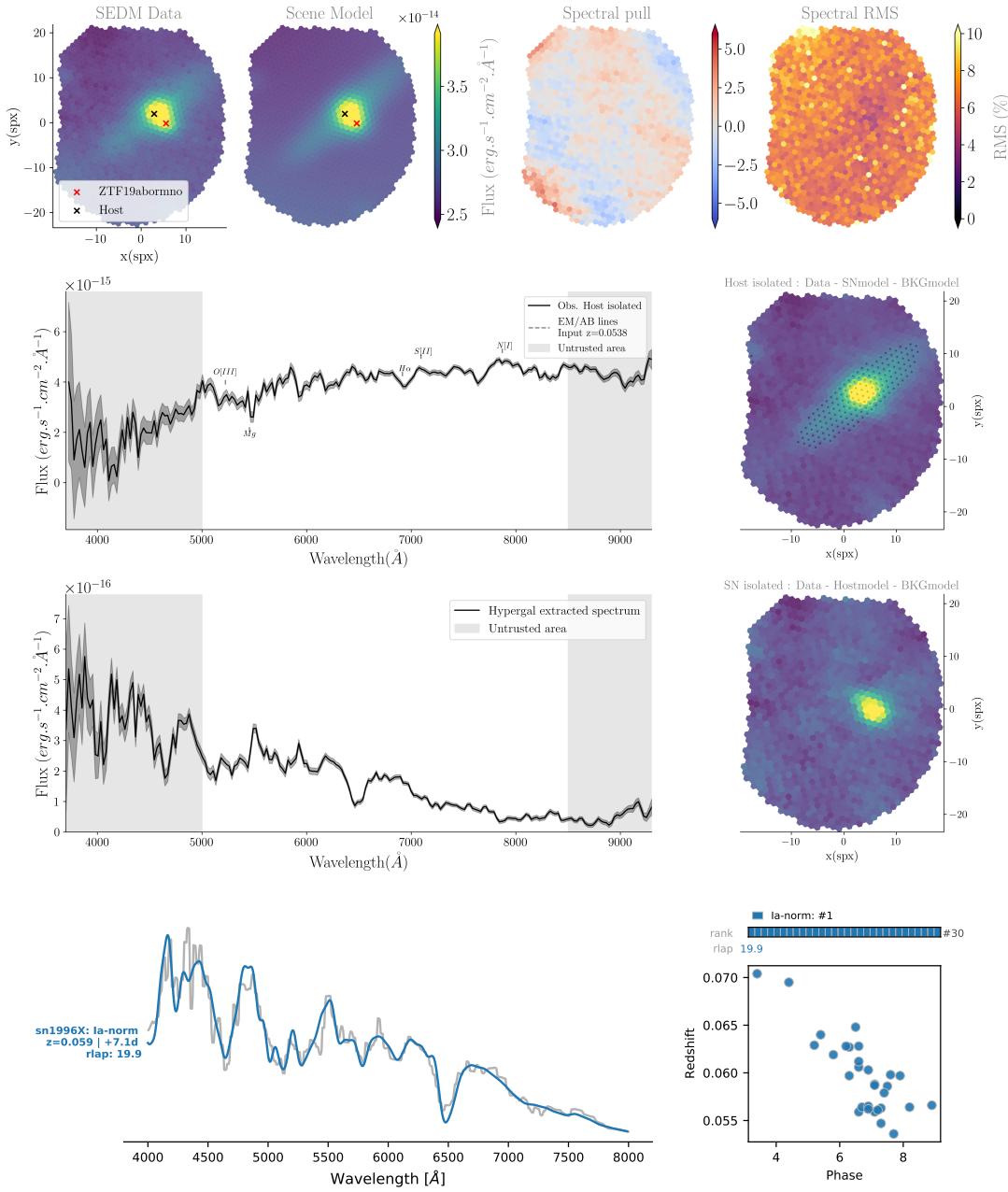


FIGURE 7.19 – Extraction de sources pour ZTF19abormno avec HYPERGAL. *De haut en bas* : (a) visualisation globale de la modélisation de scène, pull et RMS spectraux, (b) l’isolation de la galaxie hôte, (c) l’isolation de ZTF19abormno, (d) la classification de ZTF19abormno. La distance apparente entre la supernova et la galaxie est d’environ 1''.5.

### 7.4.3 ZTF20abhllo

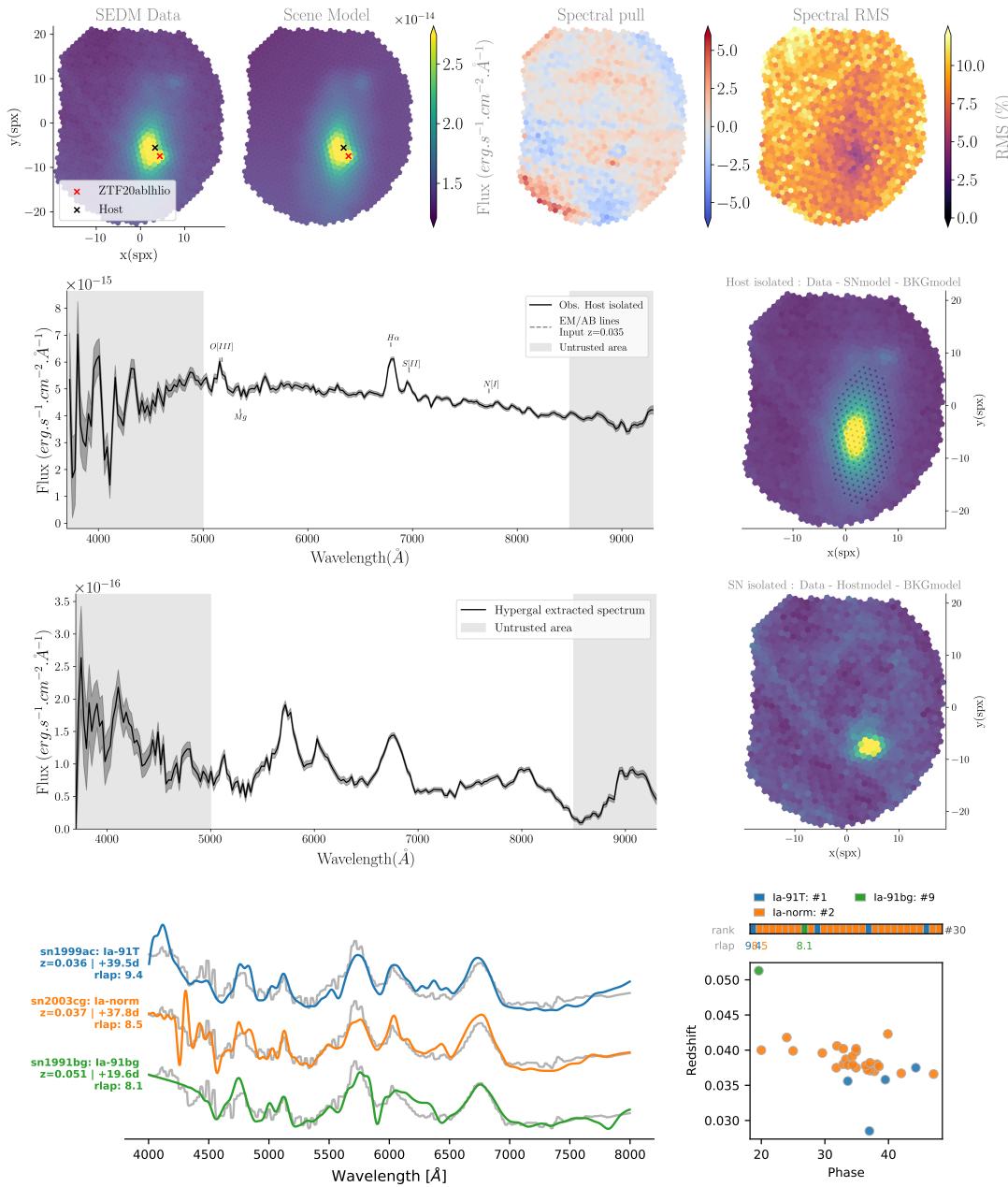


FIGURE 7.20 – Extraction de sources pour ZTF20abhllo avec HYPERGAL. De haut en bas : (a) visualisation globale de la modélisation de scène pull et RMS spectraux, (b) l’isolation de la galaxie hôte, (c) l’isolation de ZTF20abhllo, (d) la classification de ZTF20abhllo. La distance apparente entre la supernova et la galaxie est d’environ 1''.2.

## Bibliographie

- BARBARY K. 2016, « SEP : Source Extractor as a library », *Journal of Open Source Software*, 1, 58 [↑ Section 7.2.1](#)
- BERTIN E. et ARNOUTS S. 1996, « SExtractor : Software for source extraction. », *Astronomy & Astrophysics, Supplement*, 117, 393 [↑ Section 7.2.1](#)
- DASK DEVELOPMENT TEAM. 2016, Dask : Library for dynamic task scheduling [↑ Section 7.2.2](#)
- DEMBINSKI H., ONGMONGKOLKUL P., DEIL C. et al. 2020, « scikit-hep/iminuit : v1.5.4 » [↑ Section 7.1.4](#)
- DUEV D. A., MAHABAL A., MASCI F. J. et al. 2019, « Real-bogus classification for the Zwicky Transient Facility using deep learning », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 489, 3582 [↑ Section 7.2.2](#)
- DUEV D. A. et VAN DER WALT S. J. 2021, « Phenomenological classification of the Zwicky Transient Facility astronomical event alerts », *arXiv e-prints*, arXiv:2111.12142 [↑ Section 7.2.2](#)
- GILLIES S. et al. 2007–, « Shapely : manipulation and analysis of geometric objects » [↑ Section 7.1.2](#)
- HUBER P. J. 1964, « Robust Estimation of a Location Parameter », *The Annals of Mathematical Statistics*, 35, 73 [↑ Section 7.1.5](#)
- JAMES F. et ROOS M. 1975, « Minuit : A System for Function Minimization and Analysis of the Parameter Errors and Correlations », *Comput. Phys. Commun.*, 10, 343 [↑ Section 7.1.4](#)
- JORDAHL K., DEN BOSSCHE J. V., FLEISCHMANN M. et al. 2020, « geopandas/geopandas : v0.8.1 » [↑ Section 7.1.2](#)
- KASLIWAL M. M., CANNELLA C., BAGDASARYAN A. et al. 2019, « The GROWTH Marshal : A Dynamic Science Portal for Time-domain Astronomy », *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 131, 038003 [↑ Section 7.2.2](#)
- KIM Y. L., RIGAULT M., NEILL J. D. et al. 2022, « New Modules for the SEDMachine to Remove Contaminations from Cosmic Rays and Non-target Light : BYEGR and CONTSEP », *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 134, 024505 [↑ Section 7.1.1](#)
- MORTON D. C. 1991, « Atomic Data for Resonance Absorption Lines. I. Wavelengths Longward of the Lyman Limit », *The Astrophysical Journal, Supplement*, 77, 119 [↑ Section 7.2.1](#)

VAN DER WALT S. J., CRELLIN-QUICK A. et BLOOM J. S. 2019, « SkyPortal : An Astronomical Data Platform », *Journal of Open Source Software*, 4 ↑ [Section 7.2.2](#)

WATERS C. Z., MAGNIER E. A., PRICE P. A. et al. 2020, « Pan-STARRS Pixel Processing : Detrending, Warping, Stacking », *The Astrophysical Journal, Supplement*, 251, 4 ↑ [Section 7.1.3.1](#)