

Restauration d'objets astrophysiques à partir de données multispectrales floues et d'une réponse instrument non stationnaire

M.A. Hadj-Youcef ^{1,2}; F. Orieux ^{1,2}; A. Fraysse ¹; A. Abergel ²

¹ Laboratoire des Signaux et Systèmes, Univ. Paris-Sud, CNRS, CentraleSupélec, Université Paris Saclay
3 rue Joliot-Curie, 91 192 Gif-sur-Yvette, France

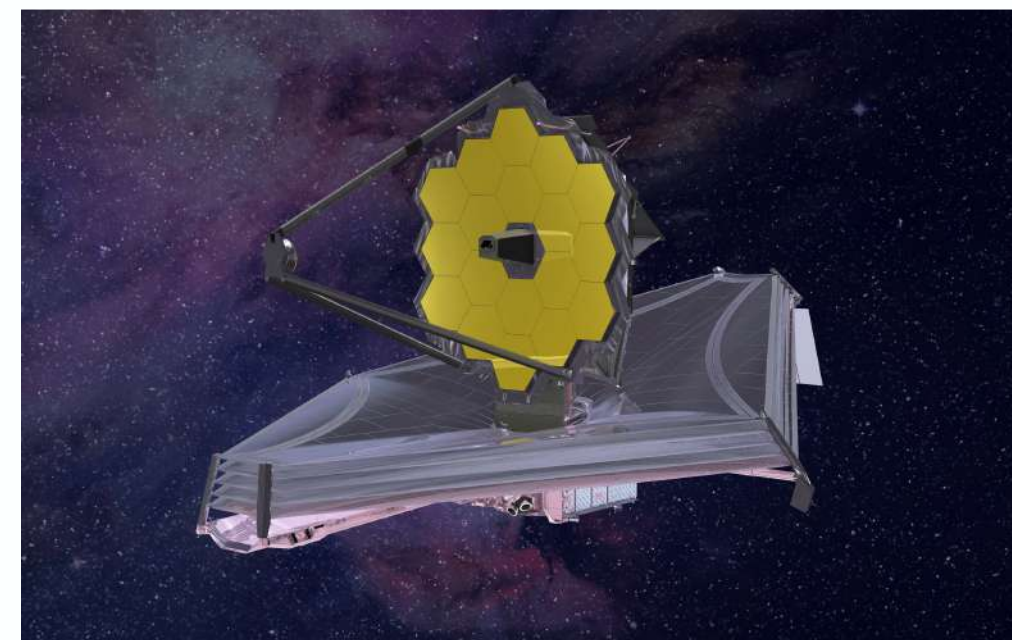
² Institut d'Astrophysique Spatiale, CNRS, UMR 8617, Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay,
Univ. Paris-Sud, 91405 Orsay, France

amine.hadjyoucef@ias.u-psud.fr; orieux@l2s.centralesupelec.fr, fraysse@l2s.centralesupelec.fr; alain.abergel@ias.u-psud.fr



Contexte

Ce travail traite la restauration d'objet astrophysique à partir de données multispectrales acquises par l'imageur moyen-infrarouge (MIRI), à bord du prochain télescope spatial James Webb (JWST) [jwst.nasa.gov].



L'objet d'intérêt à l'entrée du système optique est un flux lumineux ayant deux dimensions spatiales et une dimension spectrale. Durant le processus d'observation, l'objet est modifié par la réponse de l'instrument, fournissant une sortie discrète 2D pour chaque filtre [1].

Problématique

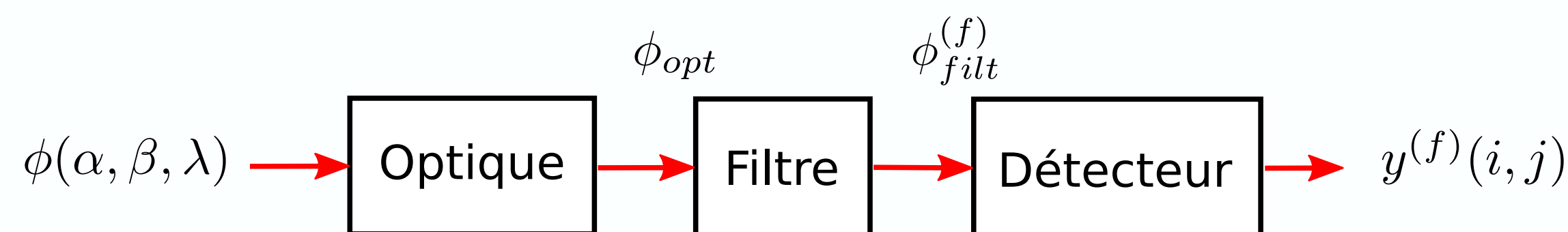
- Limitation de la résolution spatiale de données à cause de la diffraction de la lumière [2]
- Variation spectrale importante de la réponse optique entre $[5 - 28\mu m]$
- Intégration spectrale de l'objet sur de larges bandes
- Mauvais échantillonnage spectral de données, seulement 9 filtre pour l'imageur MIRI

Objectif

Reconstruction de l'objet atrophysique spatio-spectral original en exploitant l'ensemble de données à différentes bandes spectrales de l'instrument

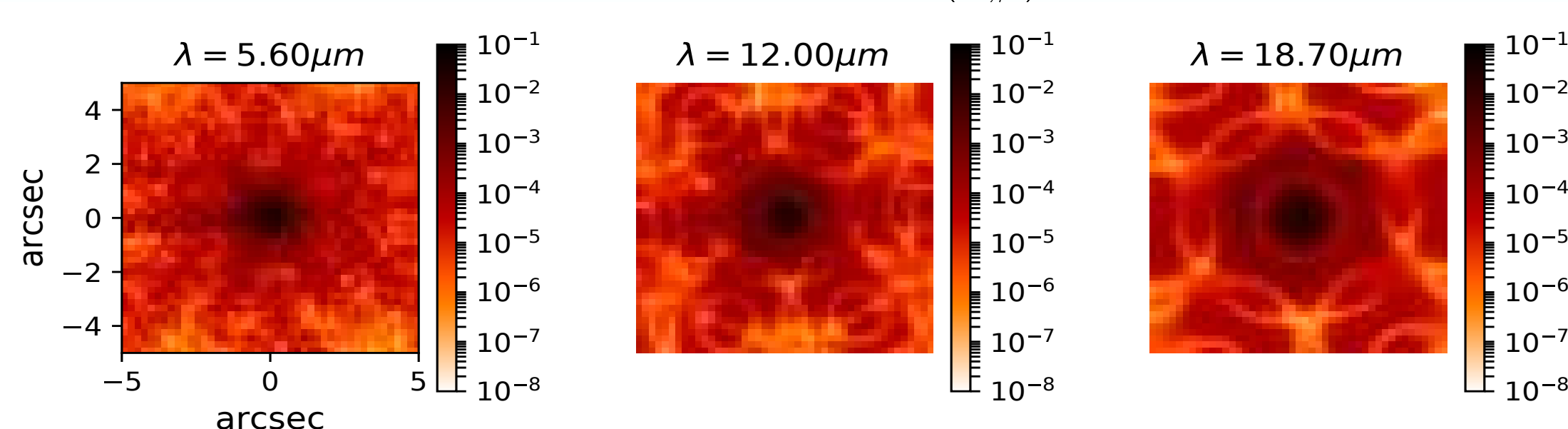
Méthodologie

1) Modèle de l'Instrument



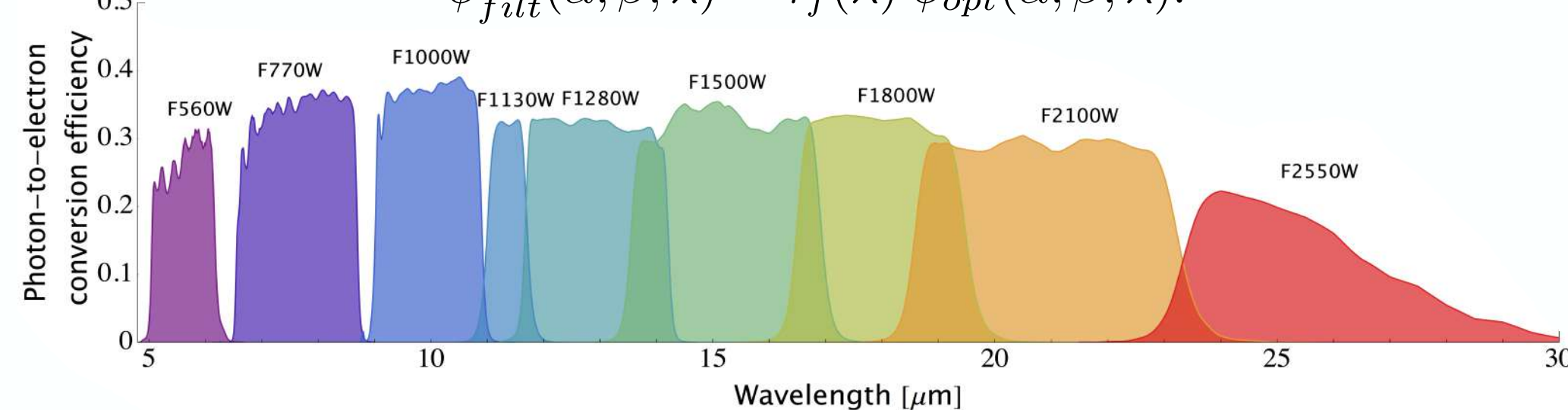
- Optique:

$$\phi_{opt}(\alpha, \beta, \lambda) = \phi(\alpha, \beta, \lambda) *_{(\alpha, \beta)} h(\alpha, \beta, \lambda).$$



- Filtre:

$$\phi_{filt}^{(f)}(\alpha, \beta, \lambda) = \tau_f(\lambda) \phi_{opt}(\alpha, \beta, \lambda).$$



- Détecteur:

$$y^{(f)}(i, j) = \int_{\mathbb{R}_+} \iint_{\Omega_{pix}} \eta(\lambda) \phi_{filt}^{(f)}(\alpha, \beta, \lambda) b_{det} \left(\frac{\alpha - i\Delta_i}{\Delta_i}, \frac{\beta - j\Delta_j}{\Delta_j} \right) d\alpha d\beta d\lambda.$$

- Équation complète:

$$y^{(f)}(i, j) = \int_{\mathbb{R}_+} \eta(\lambda) \tau_f(\lambda) \iint_{\Omega_{pix}} \iint_{\mathbb{R}^2} \phi(\alpha', \beta', \lambda) h(\alpha - \alpha', \beta - \beta', \lambda) d\alpha' d\beta' b_{det} \left(\frac{\alpha - i\Delta_i}{\Delta_i}, \frac{\beta - j\Delta_j}{\Delta_j} \right) d\alpha d\beta d\lambda.$$

2) Modèle de l'objet

La distribution spectrale de l'objet au pixel (i,j) est modélisée par des fonctions linéaires par morceaux

$$\phi_{i,j}(\lambda) = \sum_{b=1}^{n_b} x_{i,j}^{(b)} g_+^{(b)}(\lambda) + x_{i,j}^{(b-1)} g_-^{(b)}(\lambda)$$

$g_{\pm}^{(b)}(\lambda)$ est une fonction contenant la variation spectral linéaire

3) Modèle directe multi-longueur d'onde

- En combinant les modèles de l'instrument et de l'objet pour un seul filtre :

$$y^{(f)}(i, j) = \sum_{b=0}^{n_b} h_{int}^{(f,b)}(i, j) *_{(i,j)} x^{(b)}(i, j)$$

avec

$$h_{int}^{(f,b)}(i, j) = \int_{\mathbb{R}_+} \eta(\lambda) \tau_f(\lambda) \left(g_+^{(b+1)}(\lambda) + g_-^{(b)}(\lambda) \right) h(i, j, \lambda) d\lambda.$$

- Traitement de l'ensemble de données :

$$\begin{bmatrix} y^{(1)} \\ y^{(2)} \\ \vdots \\ y^{(n_f)} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} H^{(1,0)} & H^{(1,1)} & \dots & H^{(1,n_b)} \\ H^{(2,0)} & \ddots & & H^{(2,n_b)} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ H^{(n_f,0)} & H^{(n_f,1)} & \dots & H^{(n_f,n_b)} \end{bmatrix}}_H \begin{bmatrix} x^{(0)} \\ x^{(1)} \\ \vdots \\ x^{(n_b)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon^{(1)} \\ \epsilon^{(2)} \\ \vdots \\ \epsilon^{(n_f)} \end{bmatrix}$$

4) Problème inverse

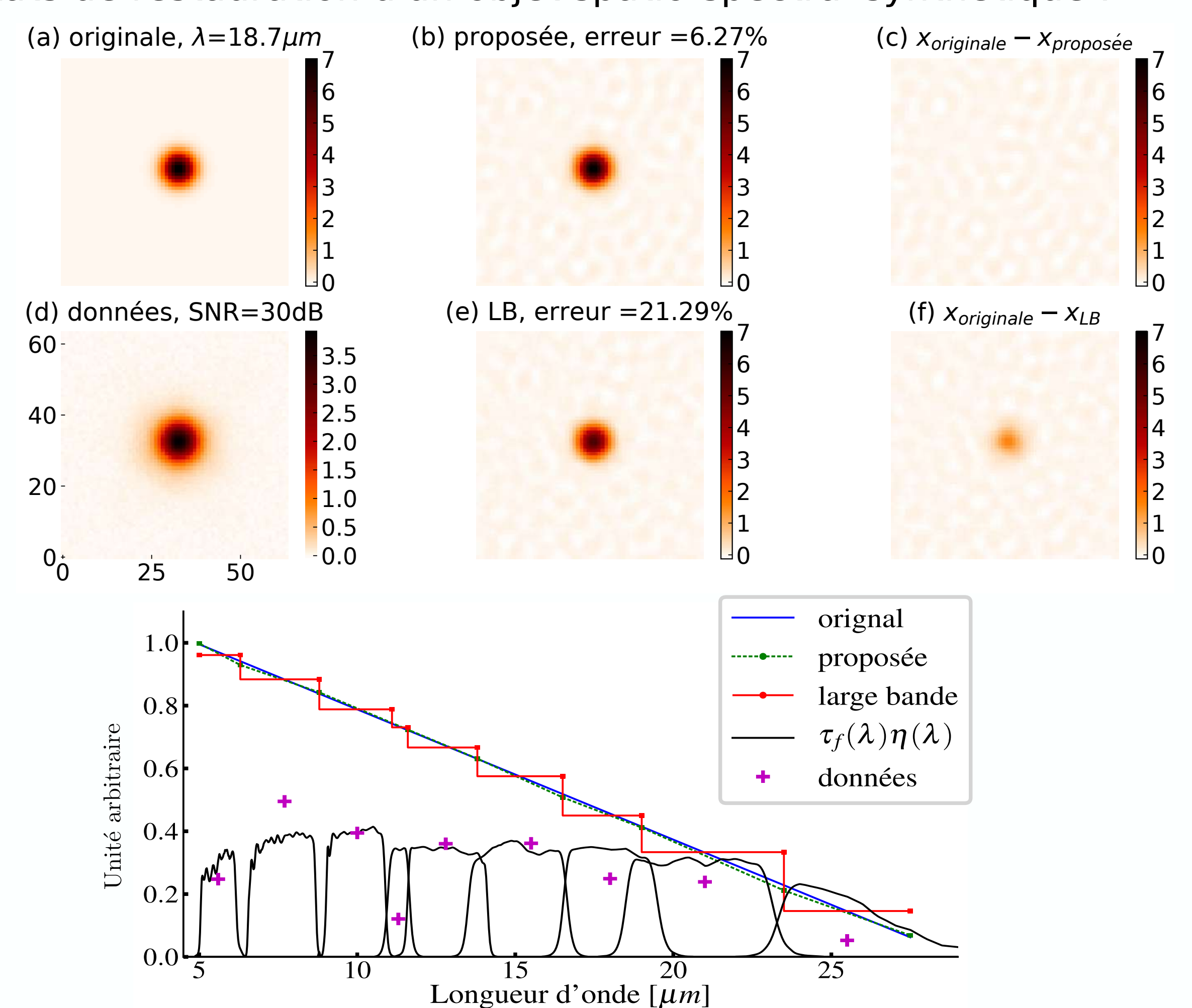
$$\hat{x} = \underset{x}{\operatorname{argmin}} J(x) = \|y - Hx\|_2^2 + \underbrace{\sum_{b=0}^{n_b} \mu_b \|Dx\|_2^2}_{\|Cx\|_2^2}.$$

- Solution du problème:

$$\hat{x} = (H^t H + C^t C)^{-1} H^t y$$

Résultats

- Résultats de restauration d'un objet spatio-spectral synthétique :



Conclusion

- Restauration du contenu spatio-spectral de l'objet original à partir de données multispectral acquises par l'imageur
- Modélisation de la réponse instrumentale décrivant la physique de l'instrument. Elle prend en compte la variation en longueur d'onde de la PSF et l'intégration spectrale sur de larges fenêtres spectrales
- Développement d'un modèle direct linéaire multi-longueur d'onde en modélisant le spectre de l'objet par une fonction continue, choisie linéaire par morceaux
- Calcul de la solution du problème en minimisant le critère des moindres carrés régularisés par l'algorithme du gradient conjugué
- Augmentation significative de résolution spatiale et une meilleure reconstruction de la distribution spectrale par rapport aux approches conventionnelles utilisant une PSF 2D à large bande "LB" [3].

Références

- [1] M.A. Hadj-Youcef; F. Orieux; A. Fraysse; A. Abergel; Restoration from Multispectral Blurred Data with Non-Stationary Instrument Response, EUSIPCO 2017
- [2] J. W. Goodman, Introduction to Fourier optics. Roberts and Company Pub., 2005.
- [3] G. Aniano, B. Draine, K. Gordon, and K. Sandstrom, "Common-resolution convolution kernels for space-and ground-based telescopes," Publications of the Astronomical Society of the Pacific, vol. 123, no. 908, p. 1218, 2011.