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

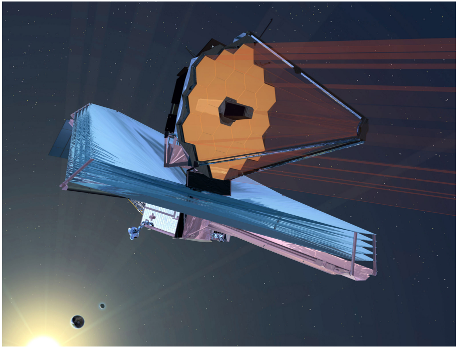
Mohamed Amine HADJ-YOUCEF [1,2]
François ORIEUX[1,2] Aurélia FRAYSSE[1] Alain ABERGEL [2]

[1]Laboratoire des Signaux et Systèmes (L2S)
CNRS, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay

[2]Institut d'Astrophysique Spatiale (IAS)
CNRS, Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay

19 Avril 2017

Contexte

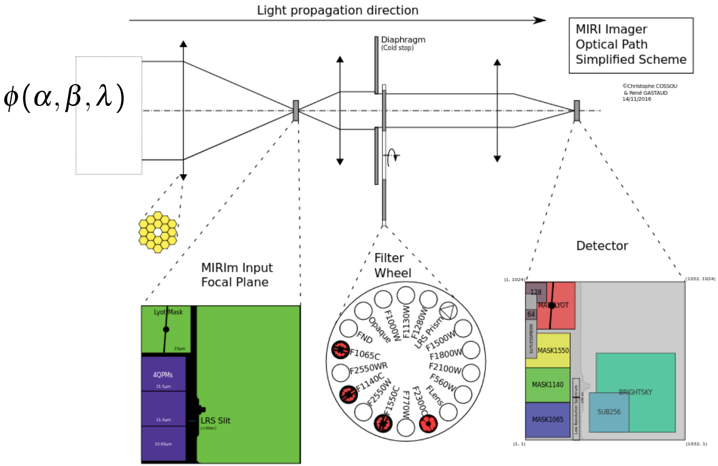


Télescope	JWST
Organisation	NASA (ESA, CSA)
Lancement	Oct. 2018
Budget	10 Milliard US$

- Principales objectifs de la mission :
  - Étudier la formation et évolution des galaxies
  - Comprendre la formation des étoiles et les systèmes planétaires

Plan de travail

Introduction



Problèmes et objectif

Problèmes

- Limitation de la résolution spatiale par la réponse optique
- Variation de la réponse optique en λ
- Intégration spectrale de l'objet sur une large bande (filtre + détecteur)

Objectif

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

Problèmes et objectif

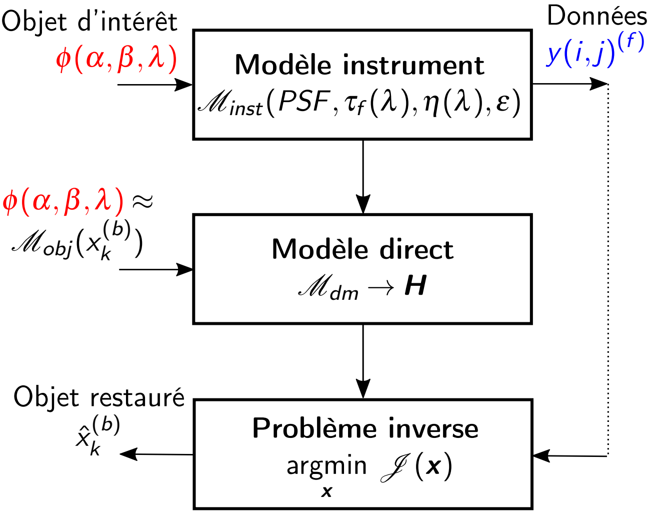
Problèmes

- Limitation de la résolution spatiale par la réponse optique
- Variation de la réponse optique en λ
- Intégration spectrale de l'objet sur une large bande (filtre + détecteur)

Objectif

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

Contenu

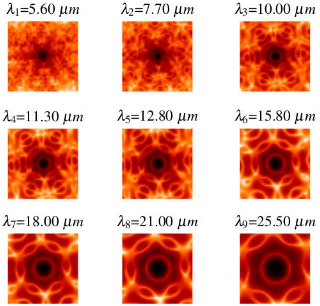

Objet d'intérêt
$\phi(\alpha,\beta,\lambda)$
Modèle instrument
$\mathscr{M}_{inst}(PSF,\tau_f(\lambda),\eta(\lambda),\varepsilon)$
Données
$y(i,j)^{(f)}$
$\phi(\alpha,\beta,\lambda) \approx$
$\mathscr{M}_{obj}(x_k^{(b)})$
Modèle direct
$\mathscr{M}_{dm} \rightarrow \boldsymbol{H}$
Objet restauré
$\hat{x}_k^{(b)}$
Problème inverse
$\underset{\boldsymbol{x}}{\operatorname{argmin}} \ \mathscr{J}(\boldsymbol{x})$

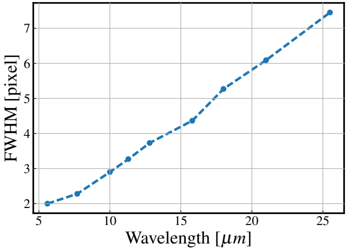
Modèle de l'instrument (1/4)

- Réponse du système optique

$$\phi_{opt}(\alpha,\beta,\lambda) = \phi(\alpha,\beta,\lambda) \underset{(\alpha,\beta)}{\star} h(\alpha,\beta,\lambda)$$

$h(\alpha,\beta,\lambda)$: réponse optique, ou PSF (Point Spread Function)





Modèle de l'instrument (2/4)

- Réponse du filtre

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

$\tau_f(\lambda)$: Transmission du filtre. $f \in [1, n_f]$ indice du filtre

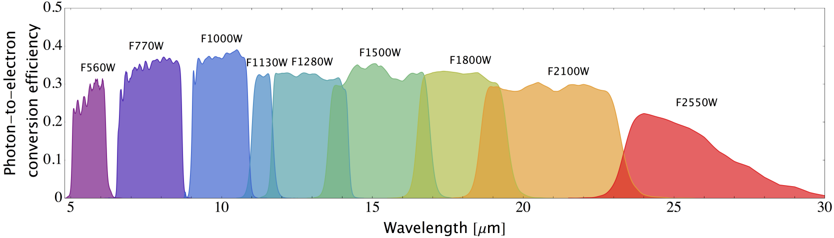


Figure – Filtres de l'imageur de MIRI, source : jwst-docs.stsci.edu

Modèle de l'instrument (3/4)

- Réponse du détecteur :

$$y^{(f)}(i,j) = \iint\limits_{\Omega_{pix_{i,j}}} \left[\int_{\mathbb{R}_+} \eta(\lambda)\phi_{filt}^{(f)}(\alpha,\beta,\lambda)d\lambda \right] b_{det}(\alpha-\alpha_{i,j},\beta-\beta_{i,j})d\alpha d\beta$$
$$+\varepsilon_{i,j}^{(f)},$$

avec $\varepsilon_{i,j}^{(f)}$ est un terme d'erreur.

Modèle de l'instrument (4/4)

Équation complète

$$y^{(f)}(i,j) = \iint_{\Omega_{pix_{i,j}}} \left[\int_{\mathbb{R}_+} \eta(\lambda)\tau_f(\lambda)\phi(\alpha,\beta,\lambda) \underset{(\alpha,\beta)}{\ast} h(\alpha,\beta,\lambda) d\lambda \right]$$
$$b_{det}(\alpha - \alpha_{i,j}, \beta - \beta_{i,j})\, d\alpha d\beta$$

Modèle de l'instrument proposé (optique + filtre + détecteur)

$$y^{(f)}(i,j) = \triangle^2 \int_{\mathbb{R}_+} \eta(\lambda)\tau_f(\lambda)\, \phi(i,j,\lambda) \underset{(i,j)}{\ast} h(i,j,\lambda)\, d\lambda$$

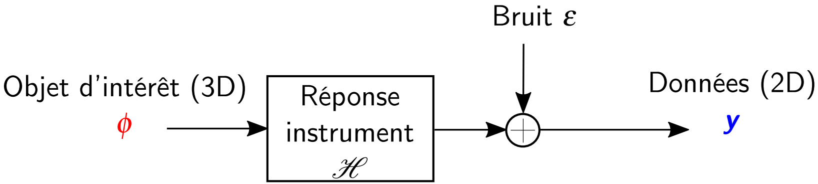
Différence avec les travaux existants

1. Variation en λ de la PSF
   - PSF 2D mesurée [BGML+15, GRR+10]
   - PSF 2D à large bande [ADGS11, GL10]
   - $>$ Interpolation linéaire de PSF [STD13]
   - $>$ Approximation de PSF [VC14]

2. Traitement de données filtre par filtre

$$y^{(f)}(i,j) = \phi(i,j) \underset{(i,j)}{*} h_{Large}(i,j)$$

Modèle direct (1/4)

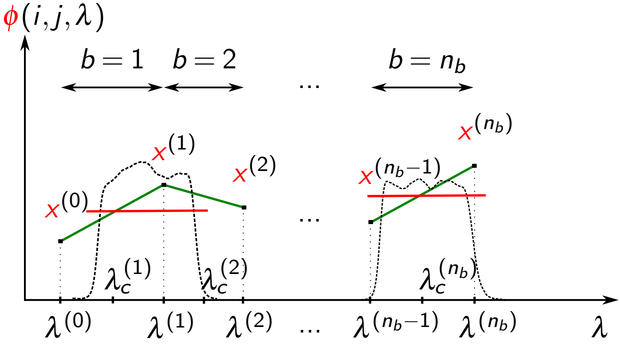


$$\boldsymbol{y}^{(f)} = \mathscr{H}(\phi) + \varepsilon^{(f)}$$

$\varepsilon^{(f)} \in \mathbb{R}^N$: erreur

Modèle direct (2/4)

- Pour le pixel (i,j)



- Spectre linéaire par morceau continue
- Traitement conjoint de l'ensemble de données multi-filtre

Modèle direct (3/4)

- Mise en équation de spectre linéaire par morceau

$$\phi_{i,j}(\lambda) \simeq \sum_{b=1}^{n_b} \left(x_{i,j}^{(b)} g_+^{(b)}(\lambda) + x_{i,j}^{(b-1)} g_-^{(b)}(\lambda) \right) \mathbb{1}_{[\lambda^{(b-1)}, \lambda^{(b)}]}(\lambda)$$

- Le modèle de l'instrument devient :

$$y^{(f)}(i,j) = \sum_{b=0}^{n_b} \left[h_{\text{int}}^{(f,b)} \underset{i,j}{\star} x^{(b)} \right](i,j)$$

avec

$$h_{\text{int}}^{(f,b)}(i,j) = \int_{\mathbb{R}_+} \eta(\lambda) \tau_f(\lambda) g^{(b)}(\lambda)\, h(i,j,\lambda)\, d\lambda$$

Modèle direct (4/4) : Traitement multi-filtres

Modèle direct linéaire

- Écriture vecteur-matrice :

$$\boldsymbol{y}^{(f)} = \sum_{b=0}^{n_b} \boldsymbol{H}_{\text{int}}^{(f,b)} \boldsymbol{x}^{(b)}, \qquad f \in [1, n_f]$$

$\boldsymbol{H}_{\text{int}}^{(f,b)}$ est une matrice de convolution de taille $N \times N$.

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

$$\Rightarrow \boldsymbol{y} = \boldsymbol{H}\boldsymbol{x} + \varepsilon.$$

Inversion (1/3)

- Calcul de la solution

$$\hat{\boldsymbol{x}} = \underset{\boldsymbol{x}}{\operatorname{argmin}}\, J(\boldsymbol{x})$$

$$J(\boldsymbol{x}) = \|\boldsymbol{y} - \boldsymbol{H}\boldsymbol{x}\|_2^2 + \underbrace{\sum_{b=0}^{n_b} \mu_b \left\|\boldsymbol{D}\boldsymbol{x}^{(b)}\right\|_2^2}_{\|\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}\|_2^2}$$

$\boldsymbol{C} = \operatorname{diag}\{\sqrt{\mu_0}\boldsymbol{D}, \ldots, \sqrt{\mu_{n_b}}\boldsymbol{D}\}$. $\mu_0 \ldots \mu_{n_b}$ sont les paramètres de régularisation et $\boldsymbol{D}$ est un opérateur de différence 2D (solutions spatialement lisses).

- Estimateur linéaire $\hat{\boldsymbol{x}} = \left(\boldsymbol{H}^t\boldsymbol{H} + \boldsymbol{C}^t\boldsymbol{C}\right)^{-1}\boldsymbol{H}^t\boldsymbol{y}$

Inversion (2/3)

- Diagonalisation en Fourier : Approximation circulante

$$\boldsymbol{H}^{(f,b)} \simeq \boldsymbol{F}^{\dagger}\boldsymbol{\Lambda}_h^{(f,b)}\boldsymbol{F}, \qquad \boldsymbol{D} \simeq \boldsymbol{F}^{\dagger}\boldsymbol{\Lambda}_d\boldsymbol{F}$$

$$\mathring{\hat{\boldsymbol{x}}} = \left(\boldsymbol{\Lambda}_h^t\boldsymbol{\Lambda}_h + \boldsymbol{\Lambda}_c^t\boldsymbol{\Lambda}_c\right)^{-1}\boldsymbol{\Lambda}_h^t\mathring{\boldsymbol{y}}$$

$$= \begin{bmatrix} \sum_{f=1}^{n_f}\left|\boldsymbol{\Lambda}_h{}^{(f,0)}\right|^2 + \mu_0\left|\boldsymbol{\Lambda}_d\right|^2 & \cdots & \sum_{f=1}^{n_f}\boldsymbol{\Lambda}_h^{\dagger\,(f,0)}\boldsymbol{\Lambda}_h{}^{(f,n_b)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{f=1}^{n_f}\boldsymbol{\Lambda}_h^{\dagger\,(f,n_b)}\boldsymbol{\Lambda}_h{}^{(f,0)} & \cdots & \sum_{f=1}^{n_f}\left|\boldsymbol{\Lambda}_h{}^{(f,n_b)}\right|^2 + \mu_{n_b}\left|\boldsymbol{\Lambda}_d\right|^2 \end{bmatrix}^{-1} \boldsymbol{\Lambda}_h^{\dagger}\mathring{\boldsymbol{y}}$$

Matrice de taille $(n_b+1)N \times (n_b+1)N$, lourd à inverser pour $n_b > 4$!

Inversion (3/3)

- Algorithme d'optimisation : Système linéaire à résoudre

$$\underbrace{\left(\boldsymbol{\Lambda}_h^{\dagger}\boldsymbol{\Lambda}_h + \boldsymbol{\Lambda}_c^{\dagger}\boldsymbol{\Lambda}_c\right)}_{\mathring{\boldsymbol{Q}}} \mathring{\hat{\boldsymbol{x}}} = \boldsymbol{\Lambda}_h^{\dagger}\mathring{\boldsymbol{y}}$$

$$\mathring{\boldsymbol{Q}}\mathring{\hat{\boldsymbol{x}}} = \begin{bmatrix} \sum_{f=1}^{n_f} \boldsymbol{\Lambda}_h^{\dagger(f,0)} \left(\sum_{i=0}^{n_b} \boldsymbol{\Lambda}_h^{(f,i)} \mathring{\hat{\boldsymbol{x}}}^{(i)}\right) + \mu_0 \boldsymbol{\Lambda}_d^{\dagger}\boldsymbol{\Lambda}_d \mathring{\hat{\boldsymbol{x}}}^{(0)} \\ \vdots \\ \sum_{f=1}^{n_f} \boldsymbol{\Lambda}_h^{\dagger(f,n_b)} \left(\sum_{i=0}^{n_b} \boldsymbol{\Lambda}_h^{(f,i)} \mathring{\hat{\boldsymbol{x}}}^{(i)}\right) + \mu_{n_b} \boldsymbol{\Lambda}_d^{\dagger}\boldsymbol{\Lambda}_d \mathring{\hat{\boldsymbol{x}}}^{(n_b)} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\Lambda}_h^{\dagger}\mathring{\boldsymbol{y}} = \begin{bmatrix} \sum_{f=1}^{n_f} \boldsymbol{\Lambda}_h^{\dagger(f,0)} \mathring{\boldsymbol{y}}^{(f)} \\ \vdots \\ \sum_{f=1}^{n_f} \boldsymbol{\Lambda}_h^{\dagger(f,n_b)} \mathring{\boldsymbol{y}}^{(f)} \end{bmatrix}$$

Contenu

Résultats : Information spectrale

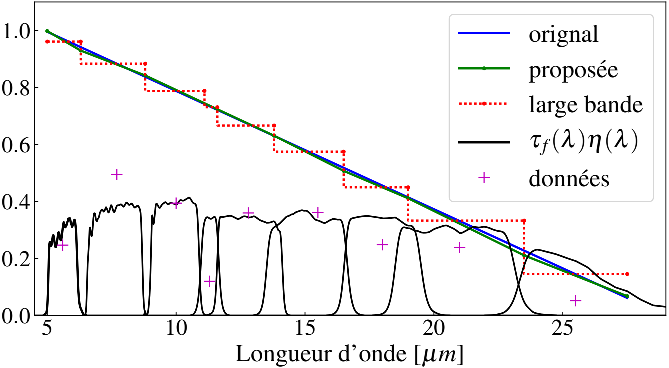


Figure – Illustration de la restauration spectrale

Résultats : Information spatiale

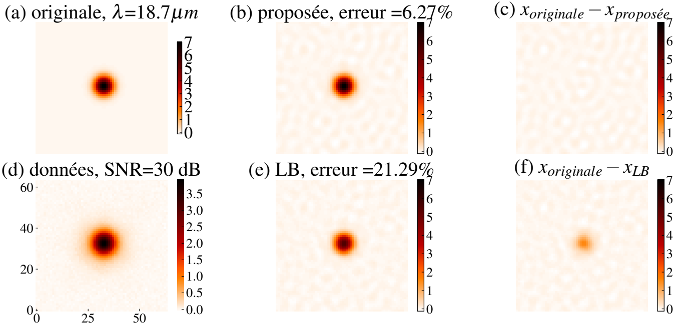


Figure – Illustration de la restauration spatiale sur des coupes à $\lambda = 18.7\mu m$

Résultats : Information spatiale

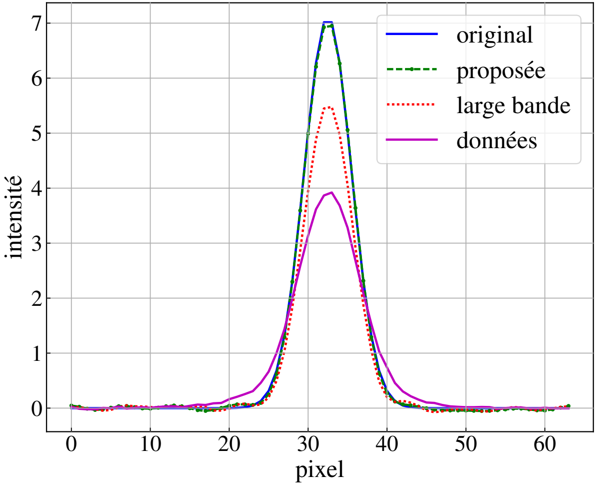


Figure – Illustration de la restauration spatiale sur des coupes à $\lambda = 18.7\mu m$

Contenu

Conclusion et perspectives

Résumé

- Modèle de l'instrument d'imageur prenant en compte la variation en λ de la PSF et de large intégration spectrale
- Modèle direct est obtenu par un traitement conjoint de données multi-filtre/instrument et choix du modèle linéaire par morceau
- Augmentation de résolution spatial et de l'information spectrale

Perspective

- Généralisation du modèle de l'objet et le modèle direct
- Ajout d'a priori spectrale afin de restauré un objet avec un échantillonnage spectrale plus fin
- Test sur des objets astrophysiques réalistes

Fin

Merci de votre attention

Références I

[ADGS11] G Aniano, BT Draine, KD Gordon, and K Sandstrom. Common-resolution convolution kernels for space-and ground-based telescopes. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 123(908) :1218, 2011.

[BGML+15] Patrice Bouchet, Macarena García-Marín, P-O Lagage, Jérome Amiaux, J-L Auguéres, Eva Bauwens, JADL Blommaert, CH Chen, ÖH Detre, Dan Dicken, et al. The Mid-Infrared Instrument for the James Webb Space Telescope, III : MIRIM, The MIRI Imager. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 127(953) :612, 2015.

Références II

[GL10] N Geis and D Lutzn.
Herschel/PACS modelled point-spread functions .
http://herschel.esac.esa.int/twiki/pub/Public/PacsCalibrationWeb/PACSPSF_PICC-ME-TN-029_v2.0.pdf, 2010.

[GRR+10] Pierre Guillard, Thomas Rodet, S Ronayette, J Amiaux, Alain Abergel, V Moreau, JL Augueres, A Bensalem, T Orduna, C Nehmé, et al.
Optical performance of the jwst/miri flight model : characterization of the point spread function at high resolution.
In *SPIE Astronomical Telescopes+ Instrumentation*, pages 77310J–77310J. International Society for Optics and Photonics, 2010.

Références III

[STD13] Ferréol Soulez, Eric Thiébaut, and Loıc Denis.
Restoration of hyperspectral astronomical data with spectrally varying blur.
EAS Publications Series, 59 :403–416, 2013.

[VC14] E. Villeneuve and H. Carfantan.
Nonlinear deconvolution of hyperspectral data with mcmc for studying the kinematics of galaxies.
IEEE Transactions on Image Processing, 23(10) :4322–4335, Oct 2014.