

# Spectro-imagerie haute résolution par inversion de données pour le JWST

## 1 Contexte

Le JWST (de la NASA, l'ESA et le CSA), dont le lancement est prévu en 2019, offrira le plus grand miroir lancé dans l'espace avec un diamètre de 6,5 m. La mission embarque une combinaison unique d'imageurs et de spectromètres sur une étendue spectrale extrêmement large de 0,7 à 28 microns. L'instrument infrarouge moyen MIRI (Mid-Infrared Instrument) contient en particulier un imageur et un spectromètre à intégrale de champ (MRS) travaillant *tous deux* de 5 à 28 microns. Jusqu'à aujourd'hui, le traitement des données issues des imageurs et des spectromètres est le plus souvent dissocié de par la nature des mesures.

- Le traitement des données des imageurs aborde le plus souvent des problèmes de convolution-déconvolution spatiale, d'identification de réponse optique (PSF : Point Spread Function) et de modèles spatiaux de sources (sources étendues ou sources ponctuelles par exemple). L'information spatiale est très bonne sur le plan de l'échantillonnage sur le ciel et de dimensions du champ de vue, mais la résolution spectrale évidemment limitée.
- Le traitement des données hyperspectrales issus des spectromètres concerne plutôt des problèmes de mélange et de séparation de sources spectrales (*continuum*, raies d'émission- ou d'absorption, structures spectroscopiques élargies), de PSF variable en longueur d'onde, voire la segmentation en imagerie terrestre (délimitation spatiale d'un type de source comme de l'eau). Par rapport à une bande spectrale donnée (filtre) d'un imageur, les domaines spectraux sont plus étendus, l'information spectroscopique beaucoup plus riche, mais les champs de vue sont en général très réduits (3,5" × 3,5" à 7" × 7" pour le spectromètre de MIRI, à comparer avec 74" × 113" pour l'imageur).

## 2 Objectifs

L'objectif de cette thèse est de lever les verrous liés aux traitements *conjoint*s des données d'imagerie (avec plusieurs filtres large bande) et des données hyperspectrales afin d'estimer un *unique* objet combinant bonne information spatiale (champ de vue, échantillonnage, résolution) et haute résolution spectrale. Ce problème, assimilable partiellement à un problème de fusion de données à été abordé en observation de la Terre principalement dans un contexte où les effets dus à la PSF sont négligeables et les fenêtres multi-spectrales des imageurs nombreuses et à bande étroite.

Les observatoires spatiaux présentent l'avantage d'avoir une PSF parfaitement stabilisée mais qui limite la résolution spatiale en particulier dans l'infrarouge. La largeur des PSFs, et donc la résolution spatiale, dépend linéairement de la longueur d'onde. Le JWST ayant une très large étendue spectrale (0,7–28 microns), il est impératif de prendre en compte les variations spectrales de la PSF tant pour le traitement que l'analyse des données des imageurs *et* des spectromètres. Il faut également prendre en compte la structure complexe

de la PSF due au miroir segmenté. Notons enfin que les imageurs ont un nombre de filtres limité (9 pour MIRI), chacun d'eux couvrant une large fenêtre spectrale.

Plusieurs problèmes se poseront donc pour l'exploitation des données de spectro-imagerie du JWST.

- Tout d'abord les fenêtres larges bandes des filtres introduisent des artefacts spatiaux où le spectre de l'objet se combine avec la PSF spectralement variable pour modifier la structure spatiale des mesures.
- Ensuite, les images avec différents filtres sont obtenues avec des PSFs différentes, leur comparaison ne peut donc pas se faire directement. L'approche usuelle est de *dégrader* de la meilleure vers la moins bonne résolution spatiale (homogénéisation), ce qui se traduit par une perte d'information.
- Les données spectrométriques ont elles-aussi une PSF spectralement variable avec un facteur de 1 à 5 en résolution.

Les effets instrumentaux spécifiques des imageurs et des spectromètres *doivent être pris en compte conjointement*. Ceci impose de reconstruire un modèle unique du ciel, commun pour les deux instruments (une même discrétisation sur des voxels par exemple).

L'objectif de la thèse est d'aborder ce problème de traitement conjoint par une approche de type *problèmes inverses*. Ces approches passent par l'utilisation *explicite* d'un modèle de formation des données (un «simulateur») étant donné un objet en entrée. L'inversion consiste à exploiter ce modèle de formation et les données réellement acquises pour retrouver l'objet qui en est à l'origine. Cette approche est très prometteuse pour lever les verrous mentionnés plus haut, car elle résout le problème d'hétérogénéité des mesures en s'appuyant sur un instrument «virtuel» qui combinerait l'imagerie et la spectroscopie.

Au sein de la communauté problèmes inverses, aucune méthode spécifique n'a été à notre connaissance développée pour résoudre ce problème de spectro-imagerie haute résolution avec PSF variable. Le travail devra être mené pour développer un *nouvel* algorithme capable de lever les verrous mentionnés plus haut. Cet algorithme sera mis en oeuvre dans un *pipeline* qui fournira des données validées avec leurs incertitudes et exploitables scientifiquement.

Les développements que nous proposons reposeront en outre sur plusieurs travaux menés depuis de nombreuses années au sein du L2S en collaboration avec l'IAS. Nous avons par exemple déjà proposé une approche de reconstruction d'un cube hyperspectrale haute-résolution à partir de données de Spitzer/IRS avec un *modèle complet* du spectromètre [1]. D'autres travaux ont concerné le traitement des données d'imagerie bande par bande de Herschel/SPIRE [2]. Enfin une thèse actuellement en cours concernant l'instrument MIRI a montré le potentiel déjà important d'une fusion de donnée multi spectrale [3]. Ce dernier travail montre qu'un traitement adapté multibande permet de retrouver des informations spectroscopiques à partir de données d'imagerie obtenues en bande large, voir figure 1.

### 3 Déroulement et plan de la thèse

Dans un premier temps, l'étudiant se consacrera à l'étude et la compréhension des instruments et de leur physique d'acquisition. Sans entrer dans les détails, les effets majeurs de la diffraction, des filtres, des réseaux de diffraction devront être acquis suffisamment

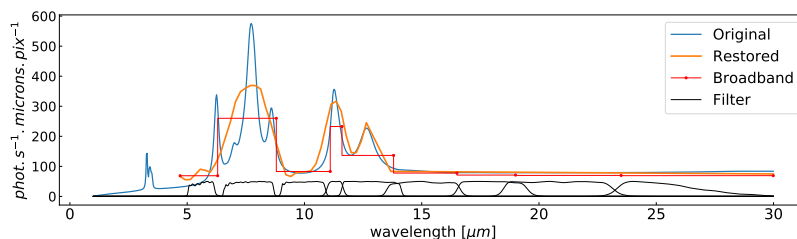


FIGURE 1 – Résultats préliminaires sur la restauration multi-spectral avec les 9 imageurs de MIRI du JWST.

pour proposer un modèle des mesures, appelé modèle direct, fiable et rapide. Ce travail se fera en collaboration avec les spécialistes et experts des instruments présents au Space Telescope Science Institute de Baltimore, mais également à Paris-Saclay, lieu de la thèse (Centre d'expertise français MIRI).

L'étudiant bénéficiera du travail doctoral déjà mené sur l'imageur de MIRI par Amine HADJ-YOUCHEF, actuellement en thèse au L2S en collaboration avec l'IAS (Encadrement : F. ORIEUX, A. FRAYSSE, A. ABERGEL, soutenance de la thèse en septembre 2018). A. HADJ-YOUCHEF a établi un modèle direct multibande pour l'imageur de MIRI, l'étudiant devra donc développer un modèle pour le spectromètre (MRS) en se basant également sur des travaux que nous avons menés sur le spectromètre Spitzer/IRS [1].

Une fois le modèle direct pour le spectromètre établi, l'étudiant devra mettre au point un premier algorithme d'inversion utilisant le modèle direct total simulant l'instrument «virtuel» de spectro-imagerie. L'approche reposera en partie sur la minimisation de critères composites possédant à la fois un terme d'attache aux données et un terme modélisant des solutions préférentielles pour au moins stabiliser l'inversion. Là encore, de premières approches ont été développées au sein du L2S pour, en outre, *quantifier les incertitudes* [4].

## 4 Encadrement

L'étudiant sera co-encadré au Laboratoire des Signaux et Systèmes (L2S) sur les aspects traitement de données et à l'Institut d'Astrophysique Spatiale (IAS) sur les aspects connaissance des instruments, mise en oeuvre des algorithmes dans le pipeline de traitement des données de MIRI et exploitation astrophysique. L'étudiant bénéficiera de la collaboration entre le L2S et l'IAS établi depuis de nombreuses années avec plusieurs travaux et thèses concernant différentes missions spatiales et diffusées dans de nombreuses revues et conférences aussi bien en traitement du signal qu'en astrophysique.

Le Groupe Problèmes Inverses (GPI) du L2S mène des activités d'inversion de données en traitement du signal et des images. Les applications sont diverses avec par exemple la super résolution d'images ou la séparation de sources. F. ORIEUX a notamment été recruté pour renforcer la collaboration avec l'IAS sur les problèmes de traitement de données en astronomie. L'équipe possède une expertise reconnue en problèmes inverses, cette approche ayant déjà démontré son succès sur plusieurs projets spatiaux comme Spitzer [1], Herschel [2], [5] et dernièrement le JWST [3]. L'équipe encadre actuellement la thèse d'Amine HADJ-YOUCHEF sur le traitement multi spectrale des données de MIRI du JWST [3].

Tant pour la cosmologie que la physique de la matière interstellaire dans les galaxies et la

formation des étoiles, l'IAS est impliqué dans le traitement et l'analyse des données d'un grand nombre de missions spatiales à grande longueur d'onde (ISO, COBE, Spitzer, Planck, Herschel, JWST, ...). Le laboratoire est membre du consortium européen de l'imager de MIRI, et aura accès à ce titre à des données issues du temps garanti. En particulier, nous coordonnons le programme de spectro-imagerie sur les régions de photodissociation construit en collaboration entre les équipes MIRI américaines et européennes, et l'équipe NIRCAM. L'IAS a de plus participé aux tests optiques de l'instrument menés au SAP/CEA qui ont en particulier permis une première caractérisation de la PSF avant livraison. L'IAS est de plus responsable du « data management » dans le centre d'expertise MIRI. Les pipelines officiels de traitement des données de MIRI seront donc opérationnels au laboratoire, et tous les développements issus de la thèse pourront être directement testés et intégrés dans ces pipelines (avec le soutien des ingénieurs du laboratoire), avec l'objectif de les rendre accessibles à toute la communauté des observateurs de MIRI.

## 5 Profil recherché

L'étudiant devra avoir une solide formation en traitement du signal ou d'images de niveau Master 2 ou équivalent. Des connaissances en physique, mathématiques appliquées ou informatique seront appréciées.

## Références

- [1] T. RODET, F. ORIEUX, J.-F. GIOVANNELLI et A. ABERGEL, "Data inversion for over-resolved spectral imaging in astronomy", *IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing*, t. 2, n° 5, p. 802–811, 2008.
- [2] F. ORIEUX, J.-F. GIOVANNELLI, T. RODET, A. ABERGEL, H. AYASSO et M. HUSSON, "Super-resolution in map-making based on a physical instrument model and regularized inversion. Application to SPIRE/Herschel", *Astronomy & Astrophysics*, t. 1, p. 1–28, 2012.
- [3] M. E. A. HADJ-YOUCHEF, F. ORIEUX, A. FRAYSSE et A. ABERGEL, "Restoration from Multispectral Blurred Data with Non-Stationary Instrument Response", in *Proc. of EUSIPCO*, 2017.
- [4] F. ORIEUX, J.-F. GIOVANNELLI, T. RODET et A. ABERGEL, "Estimating hyperparameters and instrument parameters in regularized inversion. Illustration for Herschel/SPIRE map making", *Astronomy & Astrophysics*, t. 423, p. 407–423, 2012.
- [5] H. AYASSO, T. RODET et A. ABERGEL, "A variational Bayesian approach for unsupervised super-resolution using mixture models of point and smooth sources applied to astrophysical map-making", *Inverse Problems*, t. 28, n° 12, 2012.

# High-resolution spectral imaging for JWST with data inversion

## 1 Context

The JWST project (NASA, ESA and CSA), will be launched in 2019 with the largest mirror in space (diameter of 6.5 m). The mission offers a unique combination of imagers and spectrometers with an extremely broad spectral window from 0.7 to 28 microns. The Mid-Infrared Instrument (MIRI) contains an imager and Integral Field Unit (IFU) spectrometer both working between 5 and 28 microns. Until now, the data processing of imagers and spectrometers are separated.

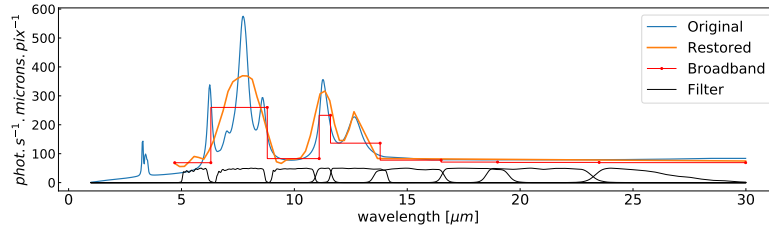
- Data processing of imagers is more about the problem of spatial convolution and deconvolution, Point Spread Function (PSF) identification or spatial source models (e.g., extended/punctual sources). Spatial information is very good in regards to sampling and field of view but the spectral resolution is limited.
- Hyperspectral data processing deals with problems of mixing and sources separation (*continuum*, emission or absorption lines, spectroscopic structures), or spectral variations of the PSF. In regards to broad-band imaging, the spectral domain is larger, the spectroscopic information is richer but the fields of view are much smaller (from 3.5" × 3.5" to 7" × 7" for the MIRI spectrometer versus 74" × 113" for the imager).

## 2 Objectives

The objective of the PhD is to work on new *joined* data processing of broad-band imaging and hyperspectral data, in order to reconstruct a unique object containing good spatial and spectral information (field of view, sampling, resolution). This problem, somewhat similar to a data fusion problem, has been partially investigated in Earth observation and in the case where the degradation due to the PSF can be neglected and for imaging with numerous narrow-band filters.

Space telescopes has the advantage of well-stabilized PSFs. The PSFs limit the spatial resolution, in infrared wavelengths in particular. The width of the PSF, and therefore the spatial resolution, depends linearly of the wavelength. The JWST has a very broad spectral window (0.7–28 microns), so the data processing for the imager and the spectrometer must take into account the spectral variations of the PSF. The complex spatial structure of the PSF, due to the segmented mirror, must also be taken into account. Moreover, the number of filters for the imager is limited (9 for MIRI), and each of them has a broad window.

Several problems will therefore arise for the exploitation of JWST data.



**Figure 1:** Preliminary results from a multi-spectral restoration with the 9 imager of JWST/MIRI.

- The broad window of the filters introduce spatial artifacts since the object spectrum combined to the PSF which depends on the wavelength modifies the spatial structure of the measurements.
- Each image obtained with different filters have a different effective PSF, that forbids direct comparison. The usual approach is to degrade the best resolution to the worst resolution (homogenization), which means a loss of information.
- Spectrometric data are also impacted by the spectral varying PSF with a factor in resolution from 1 to 5.

Specific instrumental effects from both the imager and the spectrometer must be taken into account jointly. This imposes a unique and common sky model for both instruments with an identical representation, in voxel for instance.

The objective of the PhD is to work on the problem of *joined* data processing with a *inverse problem approach*. Such approach use an *explicit* data formation model (a “simulator”) for a given input. The inversion process uses this model and true measurement in order to reconstruct the initial input sky. This approach is very promising since it solves the problem of data heterogeneity by using a “virtual” instrument that combines the imager and the spectrometer.

Inside the inverse problem community, no specific method, up to our knowledge, has been developed to solve this problem of high-resolution spectral imaging with varying PSF. Therefore work must be done to develop a *new* algorithm able to solve this issue, and to include the result in a scientifically usable *pipeline* that will provide validated results, with uncertainty.

The development that we propose will rely on several works done since several years in the L2S – IAS collaboration. We have, for instance, developed an approach to reconstruct a high-resolution hyperspectral sky from Spitzer/IRS data with a *complete* model of the spectrometer [1]. Other works were about the data processing of each wide band imaging, separately, of Herschel/SPIRE data [2]. Recently, we have demonstrated the potential of multi-spectral data imaging fusion for MIRI [3] : as illustrated in figure 1, a dedicated multi-band processing is able to reconstruct spectroscopic information from broad-band imaging.

### 3 Scheduling of the PhD

First, the student will study the MIRI instrument and the physical principles of acquisition. Without details, the major effects of the diffraction, the filters and the gratings will be understood in order to propose a data model, called “forward model”, reliable and fast. This work will be done in collaboration with specialists and experts of the instrument at the Space Telescope Science Institute in Baltimore, and in the MIRI center of expertise (IAS, SAp/AIM, LESIA, LAM).

The student will benefit from the PhD work on the MIRI imager done by Amine HADJ-YOUCCEF, presently in the L2S in collaboration with IAS (supervisors: F. ORIEUX, A. FRAYSSE, A. ABERGEL, defence in September 2018). As A. HADJ-YOUCCEF has already built a forward model for MIRI multiband imaging, the student will develop a forward model for the IFU spectrometer (MRS), based on work already done on the Spitzer/IRS IFU spectrometer [1].

Once the forward model is built, the student will develop a first inversion algorithm using the “virtual” spectral-imaging instrument that combines the whole set of measures of both the imager and the spectrometer. The approach will rely on the minimization of the composite criterion that contains a data fidelity term and a term that stabilizes the inversion process. A first approach has already been developed at L2S, particularly to *quantify the uncertainty* [4].

### 4 Supervision of the PhD

The student will be supervised at the “Laboratoire des Signaux et Systèmes” (L2S – Laboratory of Signal and Systems) on the data processing aspects and “Institut d’Astrophysique Spatiale” (IAS – Spatial Astrophysics Institute) on the instrument aspects, pipeline implementation of the MIRI data processing and the astrophysics exploitation. The student will benefit from the collaboration between the L2S and IAS established for several years with several works and PhD about several spatial missions and published in numerous papers, both in signal processing and astrophysics.

The Groupe Problèmes Inverses (GPI – Inverse Problems Group) from L2S has data inversion activities in signal and image processing. The applications are various with image super-resolution and sources separation for instance. F. ORIEUX has been recruited to reinforce the collaboration with IAS on data processing problems in astronomy. The team has a recognized expertise in inverse problems, where this approach has demonstrated success on several spatial projects : Spitzer [1], Herschel [2], [5] and lastly on the JWST [3]. The team is actually supervising the PhD of Amine HADJ-YOUCCEF on the multi-spectral data processing of the JWST/MIRI [3]. The defense will be in September 2017.

IAS is involved in data analysis and processing for several spatial missions at large wavelengths (ISO, COBE, Spitzer, Planck, Herschel, JWST, ...), for cosmology, physics of interstellar matter in galaxy and star formation. The laboratory is member of the European consortium for the MIRI imager, and will have access to data from guaranteed

time (GT). We are coordinating the GT program of spectral imaging in photodissociation regions build in collaboration between the MIRI American and European teams and the NIRCAM team. In addition, IAS has participated in the optical tests of the MIRI imager performed at SAp/CEA in order to measure the PSF. Moreover, IAS is in charge of the « data management » in the expertise center of MIRI. Official pipelines for MIRI data processing will be operational at the laboratory, and all the developments resulting from the thesis will be directly tested and integrated in these pipelines (with supports of IAS engineers), with the objective to make them available to all MIRI observers.

## 5 Required profile

The student must have a good skill in signal and image processing with a Master 2 degree or equivalent. Knowledge in physics, applied mathematics or data science will be appreciated.

## References

- [1] T. Rodet, F. Orieux, J.-F. Giovannelli, and A. Abergel, “Data inversion for over-resolved spectral imaging in astronomy”, *IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing*, vol. 2, no. 5, pp. 802–811, 2008.
- [2] F. Orieux, J.-F. Giovannelli, T. Rodet, A. Abergel, H. Ayasso, and M. Husson, “Super-resolution in map-making based on a physical instrument model and regularized inversion. Application to SPIRE/Herschel”, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 1, pp. 1–28, 2012.
- [3] M. E. A. Hadj-Youcef, F. Orieux, A. Fraysse, and A. Abergel, “Restoration from multispectral blurred data with non-stationary instrument response”, in *Proc. of EUSIPCO*, 2017.
- [4] F. Orieux, J.-F. Giovannelli, T. Rodet, and A. Abergel, “Estimating hyperparameters and instrument parameters in regularized inversion. Illustration for Herschel/SPIRE map making”, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 423, pp. 407–423, 2012.
- [5] H. Ayasso, T. Rodet, and A. Abergel, “A variational Bayesian approach for unsupervised super-resolution using mixture models of point and smooth sources applied to astrophysical map-making”, *Inverse Problems*, vol. 28, no. 12, 2012.