



Université Claude Bernard



DIPLÔME NATIONAL DE DOCTORAT

(Arrêté du 25 mai 2016)

Date de la soutenance : **15 octobre 2020**

Nom de famille et prénom de l'auteur : **Madame DENNEULIN Laurence**

Titre de la thèse : : « *Approche inverse pour la reconstruction en polarimétrie des environnements circumstellaires avec l'instrument d'imagerie directe ESO/VLT SPHERE IRDIS* »

Résumé



L'étude des environnements circumstellaires nous permet d'en apprendre plus sur la formation des exoplanètes. Malgré les avancées instrumentales, permettant une plus grande résolution des environnements, leur observation reste difficile du fait du grand contraste entre les environnements et leurs étoiles hôtes. En effet, celles-ci sont 1000 à 10 000 fois plus brillantes, voir 10 000 000 fois plus brillantes dans le cas des exoplanètes.

Lors de l'acquisition directe d'image de ces environnements, le signal de l'environnement est mélangé au résidu de lumière stellaire. Or, la lumière de l'environnement est partiellement linéairement polarisée, tandis que le résidu de lumière stellaire ne l'est pas. Le sous-instrument *Infrared Dual-band Imaging and Spectroscopy* (IRDIS) de l'instrument de l'*European Southern Observatory* (ESO) appelé *Spectro-Polarimeter High-contrast Exoplanet REsearch* (SPHERE), situé sur l'un des quatre *Very Large Telescopes* (VLT) dans le désert d'Atacama au Chili, acquiert des jeux de données où la polarisation linéaire est modulée par rotation, selon plusieurs cycles d'angles connus. Ainsi, par combinaison de ces données, il est possible de démêler la lumière diffusée par l'environnement circumstellaire et la lumière de l'étoile.

Lors du démêlage par les méthodes de l'état-de-l'art, les données sont combinées sans prendre en compte la précision des mesures, c'est-à-dire la statistique du bruit de photon, qui domine le signal d'intérêt, et du bruit de lecture du détecteur, ainsi que les données manquantes. De plus, si les images d'un cycle de rotation d'angle contiennent des images non-exploitable, à cause de la turbulence atmosphérique par exemple, les images du cycle sont toutes supprimées. De plus, tout recentrage, toute rotation ou toute déconvolution des données est fait indépendamment du démêlage. De ce fait, la propagation des erreurs n'est pas contrôlée.

Les méthodes de types « *problèmes inverses* » permettent, à partir d'un modèle direct des données, de procéder au démêlage tout en ayant le contrôle sur la propagation des erreurs. Une telle approche peut être retrouvée pour d'autres types d'observations en astrophysiques, mais n'a jamais été développée pour l'imagerie directe en polarimétrie.

Le but de ma thèse, est de reconstruire, sous un certain critère d'optimalité qui sera précisé, une carte de la lumière polarisée des environnements circumstellaires, une carte des angles de polarisation associés et une carte des résidus lumineux de l'étoile et de la lumière non-polarisée de l'environnement.

Pour y parvenir, dans cette thèse, je propose un modèle physique des données non-linéaire, séparable en chaque pixel, basé sur le formalisme de Jones et paramétré par l'intensité non-polarisée, l'intensité polarisée linéairement et l'angle de polarisation linéaire. Je dérive ensuite une formulation alternative linéaire de ce modèle, paramétrée par les paramètres de Stokes, permettant d'explicitier le lien entre un tel modèle et les méthodes de l'état-de-l'art. J'étends par la suite ce modèle au cas non-séparable, sans et avec convolution par la réponse impulsionnelle spatiale (PSF : *Point Spread Function*), et dérive, dans le cas sans convolution, un nouveau modèle non-linéaire, paramétré en l'intensité non-polarisée et les paramètres de Stokes d'intensité polarisée horizontale et verticale.

Pour chacun de ces modèles, je propose différentes méthodes d'estimation des paramètres, basées sur la minimisation de critères sous contraintes et, dans le cas non-séparable, régularisés. Parmi les régularisations utilisées, je compare notamment les pénalisations différentiables et non-différentiables sur le gradient des pixels ou sur les valeurs propres du hessien des pixels. Dans le cas linéaire, une contrainte épigraphique reliant les paramètres de Stokes est proposée. Dans le cas non-linéaire, on impose une contrainte de positivité sur les intensités. Afin de régler le poids des régularisations j'utilise l'estimateur non-biaisé du risque de Stein (SURE : *Stein Umbiased Risk Estimator*).

L'ensemble de ces méthodes d'estimation sont mises en œuvre sur des données synthétiques qui reproduisent les données types rencontrées en imagerie directe en polarimétrie et sur des données réelles. Selon les propriétés des fonctions considérées dans le critère, j'utilise pour la minimisation différents algorithmes. Dans le cas séparable, je procède à une inversion directe par annulation du gradient. Dans le cas non-linéaire, les paramètres sont estimés de manière hiérarchique. Dans le cas différentiable j'utilise une méthode de descente de gradient avec préconditionnement à mémoire limitée de Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS), qui peut être également adaptée dans le cas de la contrainte de positivité sur les intensités. Dans le cas linéaire, avec régularisation différentiable et contrainte épigraphique, j'utilise l'algorithme Forward-Backward avec *backtracking*, afin d'éviter le calcul de la constante de Lipchitz du gradient de la partie différentiable du critère qui peut s'avérer difficile. Dans le cas des régularisations non-différentiables, j'utilise l'algorithme primal-dual de Condat-Vũ dans laquelle je propose d'intégrer une étape de *backtracking*.

Je montre alors que dans le cas séparable, la prise en compte des données manquantes permet d'utiliser les cartes des cycles incomplets, réduisant ainsi l'erreur sur l'estimation des paramètres. Je montre ensuite, dans le cas non-séparable, que la prise en compte dans le modèle des transformations du détecteur (rotations, translations) et des pixels morts réduit l'erreur faite sur les intensité non-polarisées et polarisées estimées, dans le cas d'une régularisation indépendante sur les intensités. Ce n'est cependant pas le cas pour l'angle dont l'erreur est mieux réduite par une régularisation sur les paramètres de Stokes d'intensité polarisée. Je montre également que sans déconvolution, dans le cas de disques de faible intensité, le réglage automatique des poids de régularisation par SURE sur-régularise l'estimation et qu'un choix manuel est alors plus pertinent.

Dans le cas de la déconvolution, je montre qu'une régularisation par Variation Totale (TV) donne une erreur moindre dans le cas des environnements brillants, mais que dans le cas des environnements de faible intensité, une pénalisation par la norme de Shatten du hessien est plus efficace. Nous montrons également qu'inclure la convolution par la PSF dans le modèle réduit l'erreur par rapport à une déconvolution *a posteriori*.

Enfin je montre sur différents jeux de données astrophysiques l'apport des meilleures méthodes présentées dans cette thèse au niveau de la reconstruction des structures et de l'intensité retrouvée. Je montre que la déconvolution des données permet d'améliorer la reconstruction des structures de faible intensité polarisée par rapport au bruit de photon.