

ADIR: Angular Differential Imaging applied to Rhapsodie(Reconstruction of High-contrast Polarized Sources and Deconvolution for Circumstellar Environments)

Vincent TARDIEUX, Laurence DENNEULIN

LRE

vincent.tardieux@epita.fr

Résumé – L’observation des environnements circumstellaires permet de comprendre les processus de formation des planètes en étudiant l’évolution des disques de poussière et de gaz. Notre objectif est d’améliorer RHAPSODIE pour reconstruire des images à partir de la lumière diffusée non polarisée en utilisant des données prises en pupille non stabilisée. Cet article présente ADIR, une méthode d’Imagerie Différentielle Angulaire appliquée à RHAPSODIE pour séparer la lumière du disque circumstellaire de celle de l’étoile. ADIR isole les signaux polarisés et non polarisés, améliorant ainsi la visibilité des disques circumstellaires dans les images reconstruites. La combinaison de RHAPSODIE avec ADIR constitue un outil puissant pour étudier les environnements circumstellaires et le processus de formation planétaire. Il permet également d’obtenir de précieuses informations comme le taux de polarisation du disque.

Abstract – Observing circumstellar environments helps us understand planet formation processes by studying the evolution of dust and gas disks. We aim to enhance RHAPSODIE to reconstruct images from non-polarized scattered light using non pupil tracking mode data. This paper introduces ADIR, an Angular Differential Imaging method applied to RHAPSODIE to separate circumstellar disk light from starlight. ADIR effectively isolates polarized and non-polarized signals, improving the visibility of circumstellar disks in reconstructed images. Combining RHAPSODIE with ADIR provides a powerful tool for studying circumstellar environments and the planet formation process. It also provides valuable information such as the polarization rate of the disk.

1 Introduction

L’étude des environnements circumstellaires est essentielle pour comprendre les processus de formation des planètes. Ces environnements, composés de poussière et de gaz entourant les jeunes étoiles, évoluent au fil du temps et mènent à la formation de systèmes planétaires. Observer ces régions nous permet d’accéder aux premières étapes de la formation des planètes, mais cette tâche est souvent compliquée par l’éclat intense de l’étoile hôte, qui masque les signaux faibles provenant du disque environnant.

Pour surmonter ces défis, des instruments astronomiques modernes, tels que le SPHERE IRDIS (2) (Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet REsearch Infrared Dual Imager and Spectrograph) du VLT (Very Large Telescope) de l’ESO (European Southern Observatory), ont été développés. Cet instrument permet d’obtenir des images à haut contraste conçue pour isoler les disques circumstellaires peu lumineux de la forte lumière stellaire. Dans un tel instrument, il existe deux modes : l’imagerie différentielle angulaire (ADI (1)) et l’imagerie différentielle polarimétrique (DPI (2)). Ces modes sont couramment utilisés pour distinguer la lumière de l’étoile de la lumière diffusée par le disque circumstellaire. L’ADI exploite la rotation du champ pour améliorer la visibilité des structures faibles, tandis que la DPI utilise les propriétés de polarisation de la

lumière diffusée. Les deux méthodes sont complémentaires et permettent d’obtenir la lumière du disque dans sa totalité.

La méthode de différence double(?) représente actuellement la technique la plus utilisée pour l’extraction de la lumière polarisée. Cette méthode consiste à prendre plusieurs images polarisées à différentes orientations de polarisation et à les soustraire afin d’isoler la composante polarisée de la lumière (3).

RHAPSODIE (4) est une méthode qui remet en question l’état de l’art actuel en utilisant un cadre basé sur le problème inverse. Une approche par problème inverse consiste à déterminer les causes ou les paramètres inconnus d’un système à partir d’observations ou de données mesurées, en résolvant un problème mathématique souvent mal posé qui inverse la relation entre les causes et les effets. Cette approche vise à améliorer l’extraction de la lumière polarisée en prenant en compte les propriétés statistiques des données. RHAPSODIE intègre un modèle direct des données, incluant des facteurs tels que le flou, les variations de polarisation, les translations et les rotations. Cette modélisation exhaustive permet de séparer avec précision la lumière provenant du disque et de l’étoile.

Malgré les avancées, une limitation majeure des méthodes actuelles réside dans le fait qu’elles ne fournissent que la lumière polarisée du disque. Cette restriction entrave l’étude approfondie de l’environnement circumstellaire. Pour obtenir la partie non polarisée de la lumière du disque, la méthode de

pointe utilisée est REXPACO (5).

Notre contribution vise à combler cette lacune en améliorant RHAPSODIE, avec une nouvelle méthode : ADIR (Imagerie Différentielle Angulaire pour RHAPSODIE) qui combine ADI et DPI. Cette approche hybride vise à améliorer l'extraction à la fois de la lumière polarisée et non polarisée, offrant ainsi une vue plus complète des environnements circumstellaires. La méthode proposée devrait permettre des reconstructions de meilleure qualité des disques circumstellaires, améliorant ainsi notre capacité à analyser la lumière diffusée polarisée et non polarisée.

Cet article est structuré comme suit : nous commençons par détailler dans la partie 2 la configuration des observations et l'acquisition des données avec SPHERE IRDIS. Nous présentons ensuite dans la section 3 notre nouvelle méthode, ADIR, et son intégration dans le cadre RHAPSODIE. Les résultats de l'application de cette méthode à des données réelles sont ensuite exposés dans la section 5, suivis d'une discussion sur les avantages et les limites. Enfin, nous concluons en résumant les contributions de ce travail et en présentant les perspectives de recherche futures.

2 ESO/VLT SPHERE IRDIS

L'instrument SPHERE IRDIS du ESO/VLT est conçu pour l'imagerie à haut contraste et la spectroscopie, en particulier pour l'étude des environnements circumstellaires autour des étoiles jeunes. Cette section détaille les différents composants et explique le fonctionnement de l'instrument partie par partie.

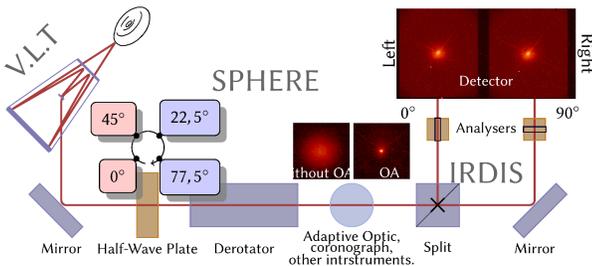


FIGURE 1 – Scheme of the ESO/VLT SPHERE IRDIS Instrument

- **VLT (Very Large Telescope)** : La lumière provenant du système stellaire est collectée par le VLT, qui est équipé d'un grand miroir pour capter et focaliser la lumière.
- **Plaque demi-onde** : Ce composant est utilisé pour faire tourner le plan de polarisation de la lumière incidente. Il dispose de plusieurs positions (0°, 22,5°, 45°, 77,5°) pour atteindre différents états de polarisation.
- **Dérrotateur** : Le dérotateur compense la rotation du champ qui se produit lorsque le télescope suit des objets à travers le ciel. Cependant, pour l'imagerie différentielle angulaire (ADI), le dérotateur est désactivé afin de permettre au champ de vision de tourner naturellement, ce

qui est essentiel pour distinguer la lumière de l'étoile de celle du disque en exploitant la rotation du ciel.

- **Optique adaptative (AO), coronographe et autres instruments** : Le système AO corrige en temps réel les distorsions causées par l'atmosphère terrestre, améliorant ainsi la qualité de l'image. Le coronographe bloque la lumière de l'étoile pour améliorer la visibilité du disque et des planètes environnantes.
- **Division** : Le trajet de la lumière est divisé en deux faisceaux : un pour le détecteur gauche et un pour le détecteur droit.
- **Analyseurs** : Les analyseurs, placés dans chaque chemin optique (gauche et droit), sont utilisés pour séparer la lumière en ses différentes composantes de polarisation (0° et 90°).
- **IRDIS (Infra-Red Dual-beam Imager and Spectrograph)** : Il s'agit du principal composant d'imagerie qui capture les images en double faisceau. Il comprend deux détecteurs (gauche et droit) qui enregistrent simultanément deux états de polarisation orthogonaux de la lumière.

Étant donné que nous utilisons l'ADI, le dérotateur est désactivé. Cela permet au champ de vision de tourner au fil du temps, à mesure que le télescope suit l'objet. En capturant une série d'images sur une période donnée, nous pouvons ensuite combiner ces images de manière à ce que la position de l'étoile reste fixe tandis que l'environnement environnant effectue une rotation. Cela aide à différencier la lumière du disque (qui tourne) de celle de l'étoile (qui reste immobile).

La plaque demi-onde et les analyseurs travaillent ensemble pour analyser l'état de polarisation de la lumière incidente. En tournant la plaque demi-onde à différents angles et en utilisant les analyseurs, l'instrument peut mesurer les paramètres de Stokes (I, Q, U) qui décrivent l'état de polarisation. Ces informations sont essentielles pour comprendre les propriétés de diffusion du disque circumstellaire.

Ce dispositif détaillé permet aux astronomes de réaliser une imagerie à haut contraste, nécessaire pour l'étude de structures faibles comme les disques circumstellaires et les exoplanètes autour d'étoiles brillantes.

3 Différence polarimétrique d'image dans le contexte d'ADIR

Différence polarimétrique d'image (DPI) est une technique utilisée pour observer et analyser la lumière polarisée provenant de sources astronomiques. Les paramètres de Stokes ($\mathbf{S} = (I, Q, U)$) sont utilisés, où $I = I^u + I^p$. Les composants I^u et I^p sont donnés par $I^u = I_{star}^u + I_{disk}^p$ et $I^p = \sqrt{Q^2 + U^2}$, avec $Q = I^p \cos(2\theta)$ et $U = I^p \sin(2\theta)$.

4 Méthode

4.1 Modèle direct

Nous définissons le modèle direct selon l'équation (9) du papier RHAPSODIE :

$$I_{j,k,m}^{det} = \sum_{l=1}^4 \sum_{n=1}^N v_{j,k,l} H_{j,k,m,n} S_{l,n} \quad (1)$$

On peut alors définir $I^u = I_{disk}^u + I_{star}^u$ et $I^p = I_{disk}^p + I_{star}^p$

De plus, on suppose la lumière de l'étoile non polarisée d'où $I_{star}^p = 0$ et donc $I^p = I_{disk}^p$.

Explicitons maintenant les paramètres de Stokes dans une base que nous appellerons $S = (I, Q, U, V)$, Cependant on ne peut mesurer V puisque cela requiert une plaque demi onde, ce qui nous donne donc :

$$I_{j,k,m}^{det} = \sum_{n=1}^N (v_{j,k,1} * H_{j,k,m,n} * I_n + v_{j,k,2} * H_{j,k,m,n} * Q_n + v_{j,k,3} * H_{j,k,m,n} * U_n) \quad (2)$$

Notons B une base telle que $B = (I_{star}^u, I_{disk}^u, Q, U)$
Si nous nous concentrons maintenant sur la fonction d'étalement de points $H_{j,k,l,m}$ (PSF) :

$$H_{j,k,l,m} = \sum_{n'=1}^N (T_{j,k})_{m,n'} (A_k)_{n',n} \quad (3)$$

Avec A_k étant un flou Gaussien et $T_{j,k}$ une composition de fonctions de translations λ et une fonction de rotation ω , qui peuvent être exprimées :

$$T_{j,k}(x) = \lambda_{j,k} \omega_{j,k} x \quad (4)$$

Si nous appliquons $T_{j,k}$ à I_n , en notant $I_n = I_{n,disk} + I_{n,star}$ on obtient :

$$T_{j,k}(I_n) = \lambda_{j,k}(\omega_{j,k}(I_n)) = \lambda_{j,k}(\omega_{j,k}(I_{n,disk} + I_{n,star}))$$

Parce que $\lambda_{j,k}$ et $\omega_{j,k}$ sont linéaires, On a :

$$T_{j,k}(I_n) = \lambda_{j,k}(\omega_{j,k}(I_{n,disk})) + \lambda_{j,k}(\omega_{j,k}(I_{n,star}))$$

Puisque l'étoile est invariante par rotation (sa tâche de diffraction est invariante par rotation), on a : $\omega_{j,k}(I_{n,star}) = I_{n,star}$

On en déduit :

$$\begin{aligned} T_{j,k}(I_n) &= \lambda_{j,k}(\omega_{j,k}(I_{n,disk})) + \lambda_{j,k}(I_{n,star}) \\ T_{j,k}(I_n) &= \lambda_{j,k}(\omega_{j,k}(I_{n,disk}) + I_{n,star}) \end{aligned}$$

On obtient alors :

$$T_{j,k}(I_n) = \lambda_{j,k}(\omega_{j,k}(I_{n,disk}) + I_{n,star}^u) \quad (5)$$

Enfin si l'on retourne à notre modèle en utilisant les équations (2), (3) and (5), on obtient :

$$\begin{aligned} I_{j,k}^{det}(B) &= \sum_{m=1}^N v_{j,k,1} \underbrace{\left\{ \sum_{n=1}^N \lambda_{j,k} \left[\omega_{j,k}(I_{disk} * A_k) + I_{star}^u \right]_{m,n} \right\}}_{=S_{1,j,k}} \\ &+ v_{j,k,2} \underbrace{\left\{ \sum_{n=1}^N \lambda_{j,k} \left[\omega_{j,k}(Q * A_k) \right]_{m,n} \right\}}_{=S_{2,j,k}} \\ &+ v_{j,k,3} \underbrace{\left\{ \sum_{n=1}^N \lambda_{j,k} \left[\omega_{j,k}(U * A_k) \right]_{m,n} \right\}}_{=S_{3,j,k}} \end{aligned} \quad (6)$$

4.2 Problème inverse

En partant de l'équation (13) du papier RHAPSODIE :

$$\hat{X} = \arg \min_{X \in C} \left\{ f(X) = (f_{data} + f_{prior})(X) \right\} \quad (7)$$

4.2.1 Terme de fidélité aux données

En se basant sur l'équation (14) du papier RHAPSODIE, notre terme de fidélité aux données se définit sous la forme suivante :

$$f_{data}(X) = \sum_{j,k} \|d_{j,k} - I_{j,k}^{det}(X)\|_{W_{j,k}}^2 \quad (8)$$

D'où :

- d nos données mesurées
- I_{det} le modèle direct
- W sont nos poids
- X représente les paramètres de Stokes ($I_{star}^u, I_{disk}^u, Q, U$)

En combinant tout nos résultats, on peut maintenant expliciter notre modèle dans la base B :

$$I_{j,k}^{det}(S) = v_{j,k,1}(I_{star}^u + I_{disk}^u + I_{disk}^p) + v_{j,k,2}(Q) + v_{j,k,3}(U) \quad (9)$$

Un autre essai est d'utiliser le mode "intensities" en notant O une base telle que $O = (I_{star}^u, I_{disk}^u, I_{disk}^p, \theta)$, ici le modèle explicite devient :

$$\begin{aligned} I_{j,k}^{det}(O) &= v_{j,k,1}(I_{star}^u + I_{disk}^u + I_{disk}^p) \\ &+ v_{j,k,2}(I_{disk}^p * \cos(2\theta)) + v_{j,k,3}(I_{disk}^p * \sin(2\theta)) \end{aligned} \quad (10)$$

4.2.2 Termes de régularisation

Nous avons utilisé plusieurs régularisations :

- Une combinaison de plusieurs régularisations qui reprennent RHAPSODIE :

- **Régularisation à bords francs** : (6) Cette régularisation est appliquée uniquement sur le disque et permet de lisser plus les petites variations d'intensités que les grandes variations d'intensités (contours).

$$\lambda f_{prior,disk}(I_{disk}^u, Q, U) = \lambda_{disk} \sqrt{\|\Delta Q\|^2 + \|\Delta U\|^2 + \alpha \|\Delta I_{disk}^u\|^2 + \epsilon_{I_{disk}^u}^2 - \epsilon_{I_{disk}^u}} \quad (11)$$

- **Tikhonov** : (7) Cette régularisation est appliquée uniquement sur l'étoile et permet de lisser plus les grandes variations d'intensités que les petites variations d'intensités.

$$\lambda f_{prior,star} = \frac{\lambda_{star}}{2\epsilon_{star}} \|\Delta I_{u_{star}}\|^2 \quad (12)$$

- Une autre régularisation qui ne tient pas de la contrainte de forme entre I_u et I_p (qui sont donc séparés).

- **Régularisation à bords francs** :

$$\lambda f_{prior,disk}(I_{disk}^u, I_{disk}^p) = \lambda_1 \left[\sqrt{\|\Delta I_{disk}^u\|^2 + I_{disk}^u - I_{disk}^u} \right] \lambda_2 \left[\sqrt{\|\Delta I_{disk}^p\|^2 + I_{disk}^p - I_{disk}^p} \right] \quad (13)$$

- **Tikhonov** :

$$\lambda f_{prior,star} = \frac{\lambda_{star}}{2\epsilon_{star}} \|\Delta I_{u_{star}}\|^2 \quad (14)$$

Remarques :

- Cette méthode est non convexe selon le choix de régularisation, ont choisi donc le résultat de la double différence comme point de départ.
- À partir de maintenant, nous noterons $f_{prior} = f_{prior,disk} + f_{prior,star}$
- Il convient de noter que α est un hyperparamètre que nous souhaitons régulariser. α contrôle l'intensité de la régularisation sur la partie non polarisée du disque.

5 Résultats

5.1 Vérité terrain

La vérité terrain a été simulée à partir de l'outil DDiT(8) en utilisant les données du disque. Cette simulation permet de valider notre méthode et de la comparer aux autres méthodes de l'état de l'art.

Pour bien comprendre les complications qu'impliquent un contexte à haut contraste, la figure 3 montre que plus haut le contraste est, meilleur sera la mse.

5.2 Exemple de reconstruction

Une reconstruction de la vérité terrain est présentée (figure 4) pour illustrer l'efficacité de la méthode ADIR. Comme nous

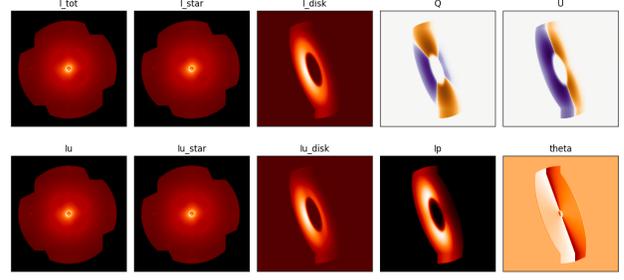


FIGURE 2 – Vérité terrain simulée à partir du disque de DDiT

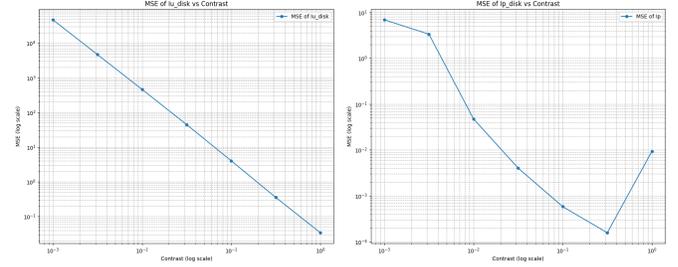


FIGURE 3 – MSE de la partie non-polarisée et polarisée du disque en fonction du contraste avec l'étoile

pouvons le voir, ADIR a encore des difficultés à détecter et isoler le disque de l'étoile (dans I_{disk}), la principale raison proviendrait probablement du fait que les régularisations ne sont pas parfaitement ajustées, comme le montre Q , U , I^p et θ qui semblent légèrement sous-régularisés. Pour les autres attributs, nous pouvons observer qu'ADIR reproduit correctement les différentes composantes de l'image.

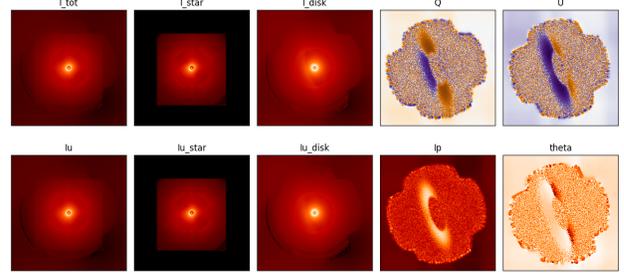


FIGURE 4 – Exemple de reconstruction de notre vérité terrain

5.3 Methods Comparison on Simulated Data

La comparaison entre les méthodes à l'état de l'art sur I^u , I^p , et θ est présentée dans la figure 5, montrant la performance relative de chaque méthode. L'élément principal à observer est que ADIR est celle qui présente la plus faible quantité de lumière stellaire dans I^u , étant ainsi la plus proche de la vérité terrain. I^p semble légèrement meilleur sur RHAPSODIE, étant donné que la double différence est largement éloignée de la vérité terrain puisqu'elle contient encore la lumière de l'étoile. Enfin, pour θ , ADIR semble aussi bon que la double différence

pour reconstruire cette partie, tandis que RHAPSODIE produit un résultat légèrement flou.

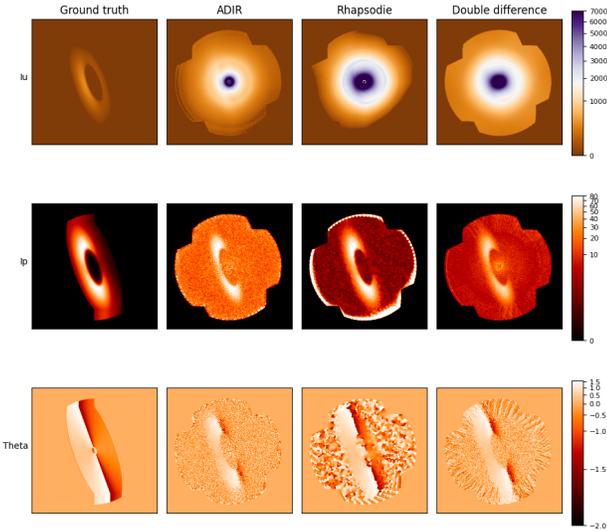


FIGURE 5 – Comparaison entre les méthodes sur I^u , I^p , et θ

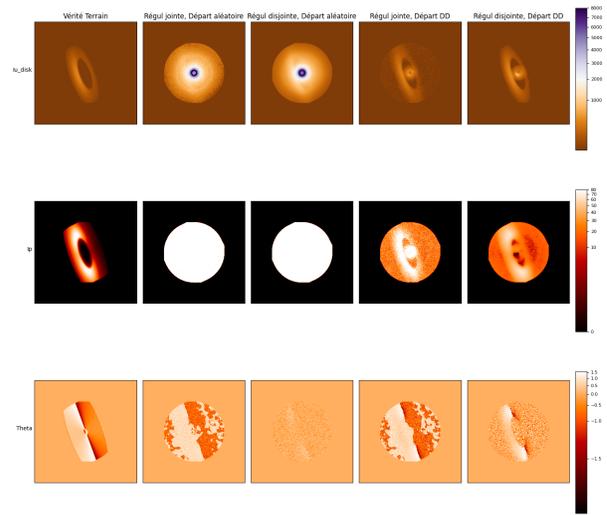


FIGURE 7 – Comparaison between different regularizations on I^u , I^p and θ

5.4 Hyperparameter Fine-tuning

En utilisant les méthodes de Powell (9), on recherche un couple d'hyperparamètres optimisés (α , λ) qui minimise la somme de la mse de I_{disk}^u et I_{disk}^p

Dans la figure 6, nous pouvons voir comment les méthodes de Powell ont trouvé le minimum de la somme de I_{disk}^u et I_{disk}^p (à droite), le minimum étant indiqué par une croix sur le carré correspondant.

6 Application sur des données astronomiques réelles

Nous avons, dans la figure 8, comparé les différentes méthodes présentées dans ce papier contre notre méthode, ADIR. Grâce à ADIR on perçoit bien mieux le disque et beaucoup moins le bruit de l'étoile.

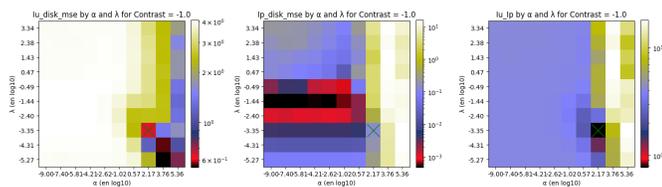


FIGURE 6 – Heatmaps pour la MSE en fonction de α et λ pour un contraste de -1.0

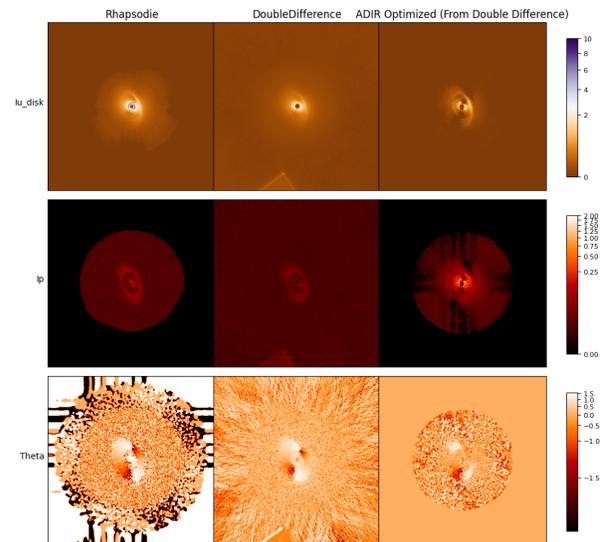


FIGURE 8 – Application on PDS70(10)

7 Conclusion and Perspective

Les premiers résultats obtenus à partir des images simulées sont prometteurs. ADIR a montré sa capacité à discriminer partiellement la lumière de l'étoile réfléchiée sur le disque de la lumière stellaire.

De plus, étant donné que I^p et I^u sont désormais disponibles, il est maintenant possible de calculer le rapport de polarisation de différents disques. L'objectif suivant est d'affiner les données astronomiques réelles (c'est-à-dire sans avoir de vérité terrain).

Références

- [1] C. Marois, D. Lafrenière, R. Doyon, B. Macintosh, and D. Nadeau, "Angular Differential Imaging : a Powerful High-Contrast Imaging Technique," *The Astrophysical Journal*, 2006.
- [2] J. de Boer, M. Langlois, R. G. van Holstein, J. H. Girard, D. Mouillet, et al., "Polarimetric imaging mode of VLT/SPHERE/IRDIS : I. Description, data reduction, and observing strategy," *A&A* 633, A63 (2020).
- [3] J. Tinbergen, "Astronomical polarimetry," *Astronomical Polarimetry*, 2005.
- [4] L. Denneulin, J.-F. Sauvage, J. Milli, et al., "RHAPSODIE : Reconstruction of High-contrast Polarized Sources and Deconvolution for Circumstellar Environments," *A&A*, 2021.
- [5] O. Flasseur, J.-F. Sauvage, J. Milli, et al., "REXPACO : An algorithm for high contrast reconstruction of the circumstellar environment by angular differential imaging," *A&A*, 2021.
- [6] P. Charbonnier, L. Blanc-Féraud, G. Aubert, and M. Barlaud, "Deterministic edge-preserving regularization in computed imaging," *IEEE TIP* 6(2), 298–311 (1997).
- [7] A. N. Tikhonov, "Regularization of incorrectly posed problems," *Soviet Mathematics Doklady*, 1963.
- [8] J. Olofsson, J. Milli, A. Bayo, Th. Henning, and N. Engler, "The challenge of measuring the phase function of debris discs. Application to HR 4796 A," *A&A* 640, A12 (2020).
- [9] M. J. D. Powell, "The NEWUOA software for unconstrained optimization without derivatives," *Large-scale nonlinear optimization*, Springer, 255–297 (2006).
- [10] A. Müller, M. Keppler, Th. Henning, M. Samland, G. Chauvin, H. Beust, A.-L. Maire, K. Molaverdikhani, R. van Boekel, M. Benisty, A. Boccaletti, M. Bonnefoy, F. Cantalloube, B. Charnay, J.-L. Baudino, M. Gennaro, Z. C. Long, A. Cheetham, S. Desidera, M. Feldt, T. Fusco,

J. Girard, R. Gratton, J. Hagelberg, M. Janson, A.-M. Lagrange, M. Langlois, C. Lazzoni, R. Ligi, F. Ménard, D. Mesa, M. Meyer, P. Mollière, C. Mordasini, T. Moulin, A. Pavlov, N. Pawellek, S. P. Quanz, J. Ramos, D. Rouan, E. Sissa, E. Stadler, A. Vigan, Z. Wahhaj, L. Weber, and A. Zurlo, "Orbital and atmospheric characterization of the planet within the gap of the PDS 70 transition disk," *A&A*, vol. 617, pp. L2, 2018. DOI : 10.1051/0004-6361/201833584.