

Restauration myope d’images coronographiques pour la détection d’exoplanètes

Marie YGOUF^{1,2,3}, Laurent M. MUGNIER^{1,3}, David MOUILLET^{2,3}, Thierry FUSCO^{1,3}, Jean-Luc BEUZIT^{2,3}

¹ONERA - The French Aerospace Lab
F-92322 Châtillon, France

²UJF-Grenoble 1 / CNRS-INSU, Institut de Planétologie et d’Astrophysique de Grenoble (IPAG) UMR 5274,
Grenoble, F-38041, France

³Groupement d’Intérêt Scientifique PHASE

Marie.Ygouf@onera.fr, Laurent.Mugnier@onera.fr, David.Mouillet@obs.ujf-grenoble.fr,
Thierry.Fusco@onera.fr, Jean-Luc.Beuzit@obs.ujf-grenoble.fr

Résumé – L’imagerie à haut contraste pour la détection et la caractérisation d’exoplanètes est limitée par la présence de tavelures qui proviennent des aberrations résiduelles instrumentales. Sans un traitement d’image adapté, il est impossible de distinguer une planète de ces tavelures. La redondance d’informations offerte par l’imagerie multi-spectrale est utilisée pour améliorer la détectabilité. Les techniques actuelles utilisent simplement l’hypothèse d’évolution lente en fonction de la longueur d’onde en position et en intensité des tavelures, en comparaison de la position fixe d’une planète ; elles n’utilisent pas d’information *a priori* plus avancée sur l’origine de ces tavelures. La méthode que nous développons est fondée sur un modèle de formation d’image et une inversion dans un cadre bayésien. Le modèle lie les aberrations instrumentales à la figure de tavelures observée dans le plan focal image, ce qui nous permet d’estimer conjointement ces tavelures et la carte de l’objet. Des résultats préliminaires constituent une première validation de la méthode d’inversion et montrent la puissance que l’on peut espérer d’une telle méthode. Nous sommes en effet capables de détecter une planète 10^5 fois moins lumineuse que son étoile à une distance angulaire de $0.15''$ en présence de bruit de photons. À terme, les performances seront évaluées sur des données plus réalistes.

Abstract – High contrast imaging for the detection and characterisation of exoplanets rests upon the instrument’s capability to cancel the light of the host star (speckle noise). Without an efficient image post-processing, it is not possible to distinguish a planet from these speckles. The current empirical multi-spectral post-processing methods for calibrating out the residual speckles and detecting the potential exoplanets are not sufficient with respect to the specifications to be reached by the new and future generations of instruments. We develop, in a Bayesian framework, an inversion method that is based on an analytical imaging model. The model links the instrumental aberrations to the speckle pattern in the image focal plane, distinguishing between aberrations upstream and downstream of the coronagraph. This approach allows us to estimate both the speckles and the object map using the fact that the object does not scale with the wavelength as the speckle pattern does. Preliminary results validate and show the power of this inversion method. We are capable of detect a planet 10^5 less bright than its host star with an angular separation of $0.15''$ and photon noise. Later, performances will be evaluated on more realistic data.

1 Détection d’exoplanètes à partir de données multi-spectrales

La détection directe et la caractérisation spectrale d’exoplanètes sont au cœur des préoccupations de l’astrophysique d’aujourd’hui. Même si quelques détections ont été réalisées dans des cas très favorables^{1,2}, l’émergence de l’imagerie directe est rendue difficile par l’important contraste entre le flux d’une étoile et celui d’une planète (10^5 pour une jeune planète géante à 10^{10} pour une planète rocheuse de type terrestre dans l’infrarouge proche), ainsi que la faible séparation angulaire entre ces deux corps ($0.1''$ à $1''$). Une des principales limitations pour

l’imagerie à haut contraste est le bruit de tavelures³. Les tavelures trouvent leur origine dans les aberrations résiduelles et évoluent sur diverses échelles de temps. Distinguer des planètes parmi ces tavelures et les caractériser spectralement est l’ambition d’une nouvelle génération d’instruments. C’est le cas de SPHERE⁴ pour le VLT, qui combine optique adaptative, coronagraphie et imagerie multi-spectrale. L’imagerie multi-spectrale présente un intérêt certain pour la détection d’exoplanètes. La redondance d’informations associée permet de s’affranchir en grande partie du bruit de tavelures. Marois et al. (2000)⁵ et Sparks and Ford (2002)⁶ ont proposé de tirer avantage de la dépendance en longueur d’onde du champ de tavelures afin de le soustraire tout en préservant le flux des

planètes à chaque longueur d’onde et donc leur spectre. Aucun modèle physique de formation des données n’est utilisé et si des planètes sont effectivement présentes, la soustraction est perturbée, ce qui peut compromettre la détection. C’est pourquoi, nous proposons une méthode alternative basée sur une approche bayésienne qui nécessite un modèle de formation des données. Ce modèle sera inversé afin d’estimer simultanément le champ de tavelures et les caractéristiques des planètes (position et spectre) en tenant compte d’informations *a priori* comme la douceur spectrale de l’objet.

2 Modèle direct d’imagerie coronographique

Nous établissons ici un modèle direct paramétrique d’imagerie coronographique corrigée par optique adaptative. Les données sont modélisées à chaque longueur d’onde λ comme la somme de l’image résiduelle de l’étoile après passage par le coronographe, de l’image de la source circumstellaire (pour lequel l’impact du coronographe peut être négligé) et d’un bruit $b_\lambda(x, y)$:

$$i_\lambda(x, y) = f_\lambda^* \cdot h_\lambda^c(x, y) + [o_\lambda \star h_\lambda^{nc}] (x, y) + b_\lambda(x, y), \quad (1)$$

où $i_\lambda(x, y)$ représente les données, f_λ^* le flux de l’étoile et $h_\lambda^c(x, y)$ représente le champ de tavelures qui correspond à la réponse instrumentale (c pour coronographique) sur l’axe pour un point source, en l’occurrence l’étoile. L’objet $o_\lambda(x, y)$, scène astronomique observée autour de l’étoile centrale, est convolué par la réponse instrumentale hors axe (nc pour non coronographique) $h_\lambda^{nc}(x, y)$, qui peut être estimée par ailleurs.

Sauvage et al. (2010)⁷ ont proposé une expression analytique d’image coronographique longue pose corrigée par optique adaptative qui suppose un coronographe parfait et qui peut être directement utilisée pour décrire la réponse instrumentale sur l’axe $h_\lambda^c(x, y)$. Après avoir obtenu et étudié l’intérêt d’une approximation de ce modèle pour l’inversion⁸, nous avons choisi d’utiliser le modèle exact qui prend en compte à la fois les aberrations résiduelles turbulentes D_{ϕ_r} provenant de l’imperfection de l’optique adaptative et les aberrations statiques provenant des imperfections instrumentales, avec une distinction entre aberrations statiques situées avant le coronographe δ_u (u pour *upstream*) et celles situées après le coronographe δ_d (d pour *downstream*). En supposant les aberrations, exprimées en différences de marche, achromatiques – hypothèse raisonnable dans la bande de longueurs d’onde envisagée : 950 à 1650 nm, il est possible en les estimant de déduire la phase à toutes les longueurs d’onde simplement par :

$$\phi_\lambda(x, y) = \frac{2\pi\delta(x, y)}{\lambda}, \quad (2)$$

et par extension on en déduit la forme du champ de tavelures dans le plan image, pour n’importe quelle longueur d’onde.

3 Estimation conjointe du champ de tavelures et de l’objet

3.1 Critère à minimiser

Résoudre le problème inverse consiste à trouver les inconnues, d’une part les caractéristiques de l’objet $o(x, y, \lambda) = \{o_\lambda(x, y)\}_\lambda$ et d’autre part les paramètres décrivant le champ de tavelures h_λ^c , qui minimisent le critère suivant :

$$\begin{aligned} J(o, \{f_\lambda^*\}, \delta_u, \delta_d, D_{\phi_r}) &= \sum_\lambda \sum_{x, y} \frac{1}{2\sigma_{b, \lambda}^2(x, y)} |i_\lambda - f_\lambda^* \cdot h_\lambda^c(\delta_u, \delta_d, D_{\phi_r}) \\ &\quad - o_\lambda \star h_\lambda^{nc}(\delta_u, \delta_d, D_{\phi_r})|^2(x, y) + R_{x, y, \lambda}(o). \end{aligned} \quad (3)$$

Ce critère est la somme de deux termes : le terme d’attache aux données et un terme de régularisation $R_{x, y, \lambda}(o)$. Le terme d’attache aux données mesure l’écart entre les données et le modèle de formation des données. Le critère est quadratique par rapport au flux de l’étoile f_λ^* , il peut donc être estimé analytiquement à chaque longueur d’onde, tous les paramètres étant fixés par ailleurs. La variance du bruit $\sigma_{b, \lambda}^2$ est supposée connue dans un premier temps et peut par ailleurs être estimée comme $\hat{\sigma}_{b, \lambda}^2 = \hat{\sigma}_{ph, \lambda}^2 + \hat{\sigma}_{det, \lambda}^2$ ⁹ où $\hat{\sigma}_{ph, \lambda}^2 = \max(i_\lambda, 0)$ est le bruit de photons et $\hat{\sigma}_{det, \lambda}^2$ est le bruit de détecteur (calibré à l’avance).

3.2 Informations *a priori* sur les aberrations et sur l’objet

La régularisation est basée sur la redondance d’informations offerte par l’imagerie multi-spectrale et prend en compte les *a priori* spatiaux et spectraux que l’on a sur l’objet.

3.2.1 Régularisation sur les phases inconnues

La paramétrisation parcimonieuse des phases inconnues $\phi_\lambda(x, y)$ via la différence de marche achromatique $\delta(x, y)$ (cf. équation (2)) permet d’exploiter conjointement les images à toutes les longueurs d’onde pour estimer les aberrations de manière efficace : la carte des différences de marche inconnues $\delta(x, y)$ est commune à toutes les longueurs d’onde, ce qui permet de limiter le nombre d’inconnues et de régulariser le problème. D’autre part, la phase étant inversement proportionnelle à λ , la figure de tavelures évolue avec la longueur d’onde alors que la position de la planète reste fixe d’une longueur d’onde à une autre comme le montre la figure (1), ce qui aide à discriminer l’objet des tavelures.

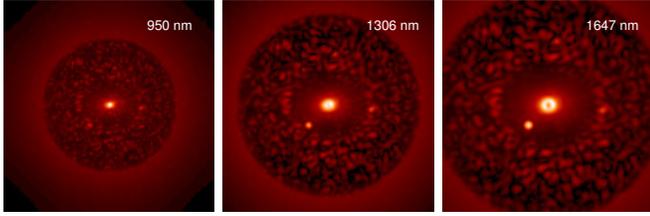


FIGURE 1 – Images simulées à différentes longueurs d’onde pour un contraste flux étoile sur flux planète de 10^3 .

Une connaissance *a priori* sur les aberrations (étalonnage de l’instrument pendant la journée qui précède l’observation par exemple) nous permettra par la suite de régulariser l’estimation de la phase en introduisant un terme $R'(\delta)$ dans le critère à minimiser.

3.2.2 Régularisation sur l’objet

Le terme de régularisation $R_{x,y,\lambda}(o)$ porte sur les *a priori* spatiaux et spectraux que l’on a sur l’objet. L’*a priori* spatial sur l’objet est l’indépendance entre les pixels et l’*a priori* spectral est fondé sur la douceur du spectre de l’objet. Dans cette communication, nous considérons pour l’instant un objet gris (c’est-à-dire à spectre constant). La régularisation spatiale est de type L1-L2 blanche (c’est-à-dire indépendante entre pixels)¹⁰ tandis que la régularisation est infinie spectralement. A terme, nous utiliserons une régularisation spectrale de type L2 corrélée sur les longueurs d’onde voisines en chaque pixel¹¹ qui fera intervenir les différences entre longueurs d’ondes et imposera donc une douceur sur le spectre de l’objet.

3.3 Mise en œuvre

La structure du terme d’attache aux données suggère de réaliser l’estimation conjointe à l’aide d’un algorithme itératif qui estime en tout premier lieu les aberrations en supposant l’objet connu (*phase retrieval*) et, dans un deuxième temps, l’objet en supposant les aberrations connues (déconvolution non coronographique).

L’étape de *phase retrieval*¹² est extrêmement difficile à cause de dégénérescences et de la présence de nombreux minima locaux. Pour minimiser efficacement et rapidement ce critère fortement non convexe, plusieurs solutions numériques astucieuses issues de la compréhension physique des phénomènes sont nécessaires.

Premièrement, il est très utile de se placer, en début de convergence, dans le cadre d’un modèle approché d’imagerie coronographique⁸ : dans le cas faibles phases le modèle d’image est quadratique en la phase ce qui rend le critère plus facile à minimiser en introduisant de la non convexité de manière graduelle. Par ailleurs, plusieurs phases de départ, dont les symétries aboutissent presque à la même image, sont explorées afin de déterminer celle qui permet de converger vers la bonne solution. Enfin, toujours dans

une approximation faibles phases, il existe une indétermination entre le flux de l’étoile et la valeur *rms* de la phase estimés. Ainsi, lorsque la solution trouvée pour la phase est une valeur *rms* trop faible, ceci est compensé par un fort flux de l’étoile. En imposant une régularisation sur le flux de l’étoile, la valeur *rms* de la phase estimée est ramenée à une valeur plus physique. La difficulté ici est de régler la régularisation (pas trop brutale sinon on introduit une non convexité dans le critère).

4 Résultats

4.1 Hypothèses de simulation

À partir de cubes d’images simulées (une, deux et six images) avec le modèle de formation des données de l’équation (1) et l’expression analytique d’image coronographique longue pose de Sauvage et al.⁷, nous avons estimé conjointement le champ de tavelures et les caractéristiques (position et flux) de la planète. Les hypothèses sont typiques des situations attendues pour les instruments de nouvelle génération comme SPHERE : aberrations *upstream* δ_u et *downstream* δ_d simulées avec des écarts-types de 35 nm et 100 nm respectivement, séparation angulaire étoile-planète de $0.15''$, contraste entre flux de l’étoile et flux de la planète de 10^5 , flux maximum de 10^6 photons par pixel en présence de bruit de photons et bande spectrale comprise entre 950 nm et 1647 nm. Le flux total dans chaque cube d’images est constant quelque soit le nombre d’images. La taille des images étant de 128×128 pixels, l’ordre de grandeur du nombre d’inconnues à estimer est de 2×10^4 . Dans un premier temps, nous supposons que la fonction de structure des aberrations résiduelles turbulentes D_{ϕ_r} peut être calibrée à l’aide des mesures prises par l’analyseur de surface d’onde de l’optique adaptative¹³. De même, nous supposons que les aberrations statiques *downstream*, qui ont un impact moindre sur l’image que les *upstream* et sont plus stables dans le temps, sont calibrées et donc connues.

4.2 Résultats avec une seule image

Dans ces conditions, nous avons estimé conjointement les aberrations statiques *upstream* et les caractéristiques de la planète pour un contraste de flux de l’étoile sur flux de la planète de 10^5 (cf. figures (2) et (3)). La phase estimée est comparée à la phase simulée en figure (4). La phase est correctement reconstruite et la planète est détectée à la bonne position avec une erreur relative sur le flux estimée à 13% (erreur relative de la valeur du pixel où se situe la planète dans la carte objet estimée par rapport à la carte simulée). Ce résultat démontre la capacité de convergence de notre critère, en dépit des difficultés de dégénérescence et des minima locaux.

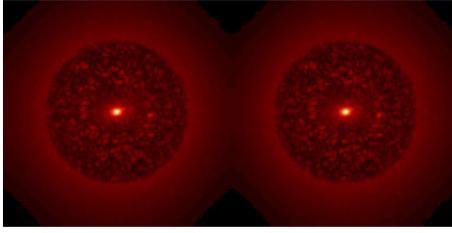


FIGURE 2 – De gauche à droite : image simulée à 950 nm et image de aberrations *upstream* estimées en présence d’aberrations résiduelles turbulentes et statiques *downstream* supposées connues, avec la même dynamique.

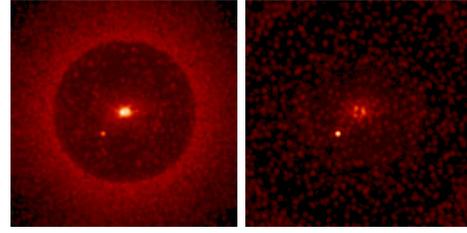


FIGURE 3 – Images estimées de l’objet $[o_\lambda \star h_\lambda^{nc}](x, y)$, à 950 nm et avec la même dynamique : [gauche] une seule image utilisée à 950 nm, [droite] un cube de deux images à 950 nm et 1647 nm utilisé.

4.3 Apport de l’aspect multi-spectral

Des cubes de deux et six images sont utilisés pour réaliser l’inversion. La phase est bien estimée et la planète est détectée dans les deux cas (cf. figure (3) pour le résultat avec un cube de deux images) : pour des raisons de visualisation, ce sont les objets convolués par la réponse impulsionnelle qui sont représentés et non les cartes objet. Les résidus du halo turbulent dans l’image estimée de l’objet, très visibles avec une seule image, sont fortement atténués par l’utilisation de plusieurs images. Les résultats sur l’erreur de flux estimé de la planète sont alors seulement de 1.2% et 0.5% respectivement. L’utilisation de cubes d’images multi-spectrales permet ainsi d’améliorer considérablement l’estimation du flux de la planète.

5 Conclusions

Ces résultats préliminaires, dans le cadre d’images simulées avec un coronographe parfait, sont très encourageants pour l’extraction du signal planétaire à des niveaux devant astrophysiquement très intéressants. Ils démontrent l’efficacité de l’approche *estimation conjointe alternée des aberrations et de l’objet* même avec une seule image et illustrent l’apport de la redondance multi-spectrale. L’approche multi-spectrale sera à notre avis déterminante lors de la confrontation à des données simulées plus réalistes (coronographe de Lyot). Un des grands intérêts de la démarche est la possibilité de régler le poids des *a priori* selon la connaissance de l’objet et des aberrations et la stabilité de l’instrument. La méthode sera ensuite appliquée sur les images de l’instrument SPHERE dont l’intégration à l’IPAG et la mise en service sur le ciel au VLT est en cours en 2011 et prévue pour 2012 respectivement.

Références

- [1] A.-M. Lagrange et al. A Giant Planet Imaged in the Disk of the Young Star β Pictoris. *Science*, 329 :57–, July 2010.
- [2] C. Marois et al. Direct Imaging of Multiple Planets Orbiting the Star HR 8799. *Science*, 322 :1348–, November 2008.
- [3] C. Aime et al. The Usefulness and Limits of Coronagraphy



FIGURE 4 – De gauche à droite : phase simulée, phase estimée et résidus de phase (différence entre les deux phases $\times 50$) avec la même dynamique.

- in the Presence of Pinned Speckles. *Astrophys. J.*, 612 :L85–L88, September 2004.
- [4] J.-L. Beuzit et al. SPHERE : a planet imager for the VLT. In *Telescopes and Systems*. Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., 2010.
- [5] C. Marois et al. Efficient Speckle Noise Attenuation in Faint Companion Imaging. *Pub. Astron. Soc. Pacific*, 112 :91–96, January 2000.
- [6] W. B. Sparks et al. Imaging Spectroscopy for Extrasolar Planet Detection. *Astrophys. J.*, 578 :543–564, October 2002.
- [7] J.-F. Sauvage et al.. Analytical expression of long-exposure AO-corrected coronagraphic image. First application to exoplanet detection. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2010.
- [8] M. Ygouf et al. Approximate analytical expression for AO-corrected coronagraphic imaging in preparation of exoplanet signal extraction. In *SF2A-2010*, pages 97–+, December 2010.
- [9] L. M. Mugnier et al. MISTRAL : a myopic edge-preserving image restoration method, with application to astronomical adaptive-optics-corrected long-exposure images. *J. Opt. Soc. Am. A*, 21 :1841–1854, October 2004.
- [10] S. Meimon et al. Self-calibration approach for optical long-baseline interferometry imaging. *J. Opt. Soc. Am. A*, 26 :108–+, December 2008.
- [11] E. Thiébaud et al. Maximum a posteriori planet detection and characterization with a nulling interferometer. In C. Aime & F. Vakili, *IAU Colloq. 200 : Direct Imaging of Exoplanets : Science & Techniques*, pages 547–552, 2006.
- [12] J. R. Fienup. Phase retrieval algorithms : a comparison. *Appl. Opt.*, 21 :2758–2769, August 1982.
- [13] J.-P. Véran et al. Estimation of the adaptive optics long exposure point spread function using control loop data. *J. Opt. Soc. Am. A*, 14(11) :3057–3069, 1997.