

Diversité de phase coronographique (COFFEE) : analyse de front d'onde plan focal pour la détection d'exoplanètes

Baptiste PAUL^{1,2,4}, Laurent M. MUGNIER^{1,4}, Jean-François SAUVAGE^{1,4}, Kjetil DOHLEN^{2,4}, David MOUILLET^{3,4}, Thierry FUSCO^{1,2,4}, Jean-Luc BEUZIT^{3,4}, Marc FERRARI^{1,4}

¹Onera - The French Aerospace Lab,
F-92322 Chatillon France

²Laboratoire d'Astrophysique de Marseille (LAM)
Université Aix-Marseille/CNRS, 13388 Marseille Cedex 13, France

³Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble (IPAG)
BP 53 F-38041 Grenoble Cedex 9, France

⁴Groupement d'intérêt scientifique PHASE (Partenariat Haute résolution Angulaire Sol et Espace) entre l'Onera, l'Observatoire de Paris, le CNRS, l'Université Diderot, le Laboratoire d'Astrophysique de Marseille et l'Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble

baptiste.paul@onera.fr

Résumé – Les performances des systèmes d'imagerie à haut contraste, dédiés à la détection et à la caractérisation des exoplanètes, sont actuellement limitées par la présence d'aberrations dites quasi-statiques, qui donnent naissance à un signal résiduel qui masque l'image de la planète. Afin d'atteindre les performances requises pour pouvoir observer une planète extrasolaire, il est indispensable de mesurer et de compenser ces aberrations. Pour ce faire, nous avons proposé une méthode, baptisée COFFEE (COronagraphic Focal-plane wave-Front Estimation for Exoplanet detection) qui est une extension de la diversité de phase et estime ces aberrations sans aucun instrument supplémentaire, grâce à la résolution d'un problème inverse. Dans cette communication, nous présentons les performances de COFFEE. Le choix d'une carte de pixels comme base utilisée pour l'estimation assortie d'une régularisation appropriée permet la mesure d'aberrations de très hautes fréquences spatiales avec une précision nanométrique. Il est ainsi possible d'optimiser l'extinction obtenue sur le détecteur d'un instrument coronographique tel que SPHERE (Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet Research in Europe), dédié à la recherche de planètes extra-solaires.

Abstract – The final performance of high contrast imaging systems dedicated to exoplanet direct detection and characterization is currently limited by a residual signal in the detector plane, which originates in quasi-static aberrations. In order to reach the instrument ultimate performances, these aberrations must be estimated and compensated for. The estimation method we proposed, named COFFEE (COronagraphic Focal-plane wave-Front Estimation for Exoplanet detection), which is an extension of phase diversity and estimates these aberrations without any dedicated hardware, is based on the resolution of an inverse problem. In this communication, COFFEE's principle and performances are presented. The use of a pixel-wise map basis for the aberration estimation allows the estimation of high-order spatial frequencies with a nanometric precision. Such a measurement can thus be used to optimize the contrast on an instrument such as SPHERE (Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet Research in Europe).

1 Introduction

La recherche de planètes extra-solaires s'est considérablement développée suite à la détection, par des méthodes indirectes, de centaines d'exoplanètes. Observer une exoplanète est extrêmement difficile du fait de l'énorme contraste entre la planète et son étoile (10^6 à 10^9), ainsi que de la faible séparation angulaire entre ces deux corps ($0.1''$ à $1''$). Un tel but peut être atteint en couplant une technique d'imagerie à haute résolution angulaire telle que l'Optique Adaptative (OA), garantissant la séparation des deux objets observés, et la coronagraphie, qui atténue le flux en provenance de l'étoile. Pour pouvoir atteindre les performances requises, l'instrument doit être étalonné avec une précision nanométrique. En effet,

les performances des systèmes d'imagerie à haut contraste sont actuellement limités par la présence d'aberrations quasi-statiques, situées en amont du coronographe, qui sont à l'origine d'un signal résiduel sur le détecteur. Ces aberrations proviennent des défauts de polissage des éléments optiques du banc, des défauts d'alignements des différents éléments ainsi que des divers mouvements lents (dilatation thermique, etc.) qui existent sur un système réel. Dans cette communication, nous nous intéressons à l'étalonnage des ces aberrations, qui consiste à mesurer ces dernières à l'aide d'un Analyseur de Surface d'Onde (ou ASO).

Plusieurs ASO ont récemment été développés dans le but de mesurer ces aberrations. Afin de ne pas introduire d'aber-

rations supplémentaires dans le système, ces derniers utilisent généralement des données plan focal, acquises sur le détecteur scientifique lui-même, et s'appuient sur une approximation portant sur l'amplitude des aberrations à estimer, supposée faible. Les méthodes itératives dites de "speckle nulling" [1], permettent d'optimiser le contraste sur le détecteur lors d'un processus itératif, où les aberrations sont estimées à partir d'au moins trois images acquises sur le détecteur. Une autre méthode, proposée par Baudoz et al. [2], permet de réaliser cette estimation à partir d'une unique image, mais requiert une modification de l'instrument.

Nous avons récemment proposé un nouvel ASO, baptisé COFFEE [3], qui est une extension de la diversité de phase [4], [5] à un système d'imagerie coronographique. COFFEE est fondé sur la résolution d'un problème inverse : à partir de deux images coronographiques, cet estimateur de type MAP mesure les aberrations en amont et en aval du coronographe sans aucune approximation. Nous présentons, dans cette communication, une extension de COFFEE capable d'estimer également les hautes fréquences spatiales (section 2), qui, à terme, permettra d'améliorer les performances de l'instrument SPHERE tout en simplifiant la procédure d'étalonnage, laquelle repose actuellement sur une procédure de mesure différentielle complexe et limitée aux basses fréquences spatiales de la phase. Les premiers résultats obtenus avec COFFEE à partir de données expérimentales acquises sur cet instrument sont également présentés (section 3).

2 COFFEE : principe

2.1 Modèle de formation d'images coronographiques

La figure 1 décrit le principe de fonctionnement d'un système d'imagerie à haut contraste utilisant un coronographe, composé d'un masque coronographique plan focal (situé dans le plan B), qui diffracte la lumière provenant de l'étoile hors d'un masque pupillaire appelé Lyot Stop (plan C). L'intensité de l'image de l'étoile observée sur le détecteur est ainsi considérablement atténuée.

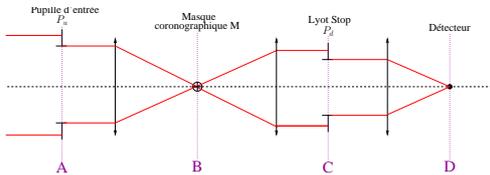


FIG. 1 – Schéma de principe d'un système d'imagerie coronographique

Les aberrations quasi-statiques à estimer sont supposées être introduites dans les plans pupille A (entrée du système) et C (Lyot Stop). COFFEE utilise deux images coronographiques i_c^{foc} et i_c^{div} , enregistrées par le détecteur (plan D) et qui diffèrent, comme en diversité de phase, d'une aberration ϕ_{div} connue pour estimer les aberrations en amont ϕ_u (plan A) et en aval

ϕ_d (plan C) du coronographe (cette phase ϕ_{div} est introduite en amont du coronographe). On considère ici l'étalonnage de l'instrument, réalisé avec une unique source ponctuelle. Le modèle de formation d'image coronographique s'écrit alors :

$$i_c = \alpha \cdot h_{\text{det}} \star h_c(\phi_u, \phi_d) + n + \beta \quad (1)$$

avec α le flux provenant de la source et β un fond uniforme dans l'image. h_{det} est la « Fonction d'Étalement de Point » (FEP) du détecteur, et h_c la FEP coronographique (image d'un point donnée par le détecteur du système d'imagerie coronographique) modélisée numériquement en considérant le modèle de coronographe utilisé. \star représente ici l'opération de convolution discrète. Le bruit associé à la mesure n prend en compte les bruits de photons et de détecteur.

2.2 Inversion

COFFEE est fondé sur l'estimation par maximum *a posteriori* : les aberrations ϕ_u et ϕ_d ainsi que le flux α et le fond β sont estimés en maximisant la vraisemblance *a posteriori* des aberrations à estimer. Une telle opération revient à minimiser l'opposé du logarithme de cette quantité (notée ici J), soit :

$$(\hat{\alpha}, \hat{\beta}, \hat{\phi}_u, \hat{\phi}_d) = \arg \min_{\alpha, \beta, \phi_u, \phi_d} J(\alpha, \beta, \phi_u, \phi_d), \quad (2)$$

avec :

$$J = \frac{1}{2} \left\| \frac{i_c^{\text{foc}} - (\alpha_{\text{foc}} \cdot h_{\text{det}} \star h_c(\phi_u, \phi_d) + \beta_{\text{foc}})}{\sigma_n^{\text{foc}}} \right\|^2 + \frac{1}{2} \left\| \frac{i_c^{\text{div}} - (\alpha_{\text{div}} \cdot h_{\text{det}} \star h_c(\phi_u + \phi_{\text{div}}, \phi_d) + \beta_{\text{div}})}{\sigma_n^{\text{div}}} \right\|^2 + \mathcal{R}(\phi_u) + \mathcal{R}(\phi_d) \quad (3)$$

Ici, $\|x\|^2$ représente la somme des valeurs carrées des pixels du tableau x , σ_n^{foc} et σ_n^{div} représentent les cartes des écarts-types des bruits associés à chaque image. L'étalonnage de l'instrument étant fait à fort flux, ce bruit est supposé blanc gaussien, ce qui constitue une bonne approximation d'un mélange de bruits de photons et de détecteur. Sa variance s'écrit comme la somme des variances de ces deux bruits, soit $\sigma_n^2[k] = \sigma_{\text{det}}^2 + \sigma_{\text{ph}}^2[k]$, avec k le pixel considéré. Cette carte de variance peut être estimée à partir des images expérimentales elles-mêmes [6].

L'utilisation des deux images i_c^{foc} et i_c^{div} garantit en pratique l'unicité de la solution de ce problème inverse. En effet, une estimation de la phase en plan pupille à partir d'une unique image serait confrontée à un problème de non-unicité de la solution. Il existe en particulier une indétermination sur le signe de la partie paire de la phase. Comme l'a montré R. Gonsalves [4], l'utilisation d'une seconde image, créée en ajoutant une aberration calibrée ϕ_{div} aux aberrations à estimer, permet de lever cette indétermination, garantissant ainsi l'unicité de la solution du problème inverse. Le lecteur pourra trouver des éléments de preuve de l'unicité de la solution de ce problème dans [7].

Lors d'une précédente étude [8], nous avons mis en évidence les limitations d'une approche non régularisée où COFFEE

n'estimait qu'un nombre de modes limité. Il est en particulier apparu que l'incapacité de COFFEE à estimer des hautes fréquences spatiales, due à une base non adaptée, limitait la qualité de l'estimation des aberrations. Aussi, afin d'étendre la méthode à l'estimation de hauts ordres, la base utilisée pour l'estimation a été modifiée : les aberrations sont désormais estimées de manière régularisée sur une base de pixels, en chaque point de la pupille. Les termes de régularisation $\mathcal{R}(\phi_u)$ et $\mathcal{R}(\phi_d)$ traduisent la fidélité à *a priori* sur les phases à estimer. L'estimation d'un grand nombre d'inconnues rend indispensable l'utilisation de ces *a priori*, qui exploitent les connaissances statistiques dont on dispose sur la décroissance spectrale des aberrations, et dont l'expression est détaillée en section 2.4.

Le critère J est minimisé par une méthode de type Quasi-Newton (BFGS) à mémoire limitée, [9], [10], faisant appel à l'expression analytique des gradients $\frac{\partial J}{\partial \phi_u}, \frac{\partial J}{\partial \phi_d}, \frac{\partial J}{\partial \alpha}, \frac{\partial J}{\partial \beta}$. Notez ici que les flux $\alpha_{\text{foc}}, \alpha_{\text{div}}$ et les fonds $\beta_{\text{foc}}, \beta_{\text{div}}$ sont estimés dans chacune des deux images. La recherche de pas optimal lors de la minimisation est quant à elle effectuée en utilisant la méthode de Wolfe [9]. L'utilisation d'une phase de diversité composée de défocus et d'astigmatisme permet de maximiser la taille de l'intervalle dans lequel le critère J est convexe, garantissant ainsi l'absence de minima locaux [3]. La précision de l'estimation est limitée par la précision avec laquelle la phase de diversité est connue : en effet, toute imprécision sur la connaissance de cette dernière dégrade la qualité de la solution, dans la mesure où l'on ne minimise plus exactement le bon critère J . Aussi, afin d'optimiser la qualité de l'estimation des aberrations, COFFEE a été adapté pour estimer, en plus des autres paramètres, une erreur faite sur la phase de diversité, permettant ainsi une estimation non dégradée dans le cas où la phase de diversité n'est pas parfaitement connue.

2.3 Performances

Afin d'illustrer les performances de COFFEE, considérons le cas d'un système d'imagerie coronographique entaché d'aberrations en amont (50 nm RMS) et en aval (20 nm RMS) du coronographe. On suppose par ailleurs la phase de diversité mal connue (erreur de 5% sur l'amplitude de cette dernière). Sans estimation conjointe de diversité, l'écart entre les phases simulées et reconstruites est de 6,9 nm RMS en amont et 8,8 nm RMS en aval du coronographe. En estimant conjointement aux aberrations une erreur sur la phase de diversité, ces écarts sont notablement réduits, et valent 2,6 nm RMS en amont et 5,2 nm RMS en aval du coronographe.

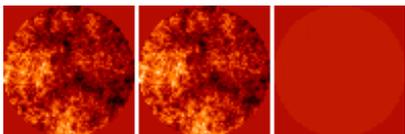


FIG. 2 – Performances de COFFEE : simulation. De gauche à droite : aberrations ϕ_u simulées (50 nm RMS), aberrations $\hat{\phi}_u$ estimées par COFFEE, différence $\phi_u - \hat{\phi}_u$ (2,6 nm RMS). La dynamique est la même pour toutes les images.

La figure 2 témoigne de la qualité de l'estimation $\hat{\phi}_u$ des aberrations en amont du coronographe, très proche de la phase simulée ϕ_u lorsqu'une erreur est estimée conjointement. Remarquez pour finir que les performances obtenues en estimant conjointement une erreur sur la phase de diversité sont identiques à celles obtenues lorsque la reconstruction est faite avec une diversité parfaitement connue.

2.4 Régularisation

Le choix d'une base de pixels pour l'estimation des aberrations permet, comme il a été mentionné précédemment, l'estimation de hautes fréquences spatiales. Toutefois, le grand nombre d'inconnues à estimer (soit l'ensemble des pixels situés dans la pupille) rend l'utilisation d'un terme de régularisation indispensable, ceci afin de réduire la sensibilité de l'estimateur au bruit. Ce terme de régularisation est fondé sur la connaissance *a priori* de la densité spectrale de puissance (DSP) des aberrations ϕ_u et ϕ_d à estimer. Il est en effet raisonnable de supposer que ces dernières sont gaussiennes, homogènes et de moyenne nulle, possédant une DSP \mathcal{S}_{ϕ_k} ($k \in \{u, d\}$) ayant, dans les hautes fréquences spatiales, la forme suivante : $\mathcal{S}_{\phi_k}(\nu) \propto 1/\nu^n$, avec ν la fréquence spatiale, et $n \in \mathbb{R}^+$. Le terme de régularisation $\mathcal{R}(\phi_k)$ s'écrit alors, dans le plan de Fourier :

$$\mathcal{R}(\phi_k) = \frac{1}{2} \sum_{\nu} \frac{|\mathcal{F}[\phi_k](\nu)|^2}{\mathcal{S}_{\phi_k}(\nu)} \quad (4)$$

On considère ici le cas d'une DSP suivant une décroissance en $1/\nu^2$, ce qui correspond au défauts de polissage des miroirs utilisés par les systèmes optiques. Afin de pouvoir travailler avec des pupilles de forme quelconque, ainsi que pour optimiser la rapidité de la minimisation, ce terme de régularisation est calculé dans l'espace réel plutôt que dans l'espace de Fourier. Le terme $\mathcal{R}(\phi_k)$ est alors donné par l'expression :

$$\mathcal{R}(\phi_k) = \frac{\mu_k}{2} \sum_{x,y} \|\nabla \phi_k(x,y)\|^2, \quad (5)$$

où la somme sur x, y est limitée aux pixels à l'intérieur de la pupille, non masqués par l'occultation centrale ou l'araignée du télescope. L'identification de $\mathcal{R}(\phi_k)$ avec l'anti-log-probabilité *a priori* sur les aberrations permet d'obtenir l'expression théorique de l'hyperparamètre μ_k , donnée par $\mu_k = 1/\sigma_{\nabla \phi_k}^2$, avec $\nabla \phi_k$ le gradient de ϕ_k . $\sigma_{\nabla \phi_k}^2$ est défini tel que $\sigma_{\nabla \phi_k}^2 = \sigma_{\nabla_x \phi_k}^2 + \sigma_{\nabla_y \phi_k}^2$, avec $\sigma_{\nabla_x \phi_k}^2$ et $\sigma_{\nabla_y \phi_k}^2$ les variances de $\nabla \phi_k$ dans les directions x et y . Notons que la valeur de μ_k peut être calculée à partir de la variance de la phase et sa DSP.

3 Application de COFFEE à l'instrument SPHERE

3.1 Estimation d'aberrations

SPHERE est un projet européen réunissant un consortium de douze laboratoires européens dont l'objectif est d'imager et

caractériser des planètes extrasolaires. Cet instrument, actuellement en cours d'intégration, sera installé sur le Very Large Telescope (VLT) en 2013. Nous présentons dans cette communication les premiers traitements de données acquises sur cet instrument réalisés avec COFFEE. Comme évoqué plus haut, l'étalonnage des aberrations statiques et quasi-statiques de ce type d'instrument est indispensable pour pouvoir espérer voir des exoplanètes. Afin de démontrer l'intérêt de COFFEE pour un tel étalonnage, nous avons estimé une aberration artificiellement introduite sur l'instrument. Le résultat présenté sur la figure 3 correspond à l'introduction d'un « poke ».

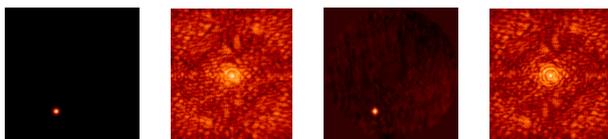


FIG. 3 – Reconstruction d'aberration à partir de données acquises sur SPHERE. De gauche à droite : aberration introduite (amplitude : 144 nm RMS), image coronagraphique acquise sur le détecteur, aberration reconstruite par COFFEE dans la pupille d'entrée du système (amplitude : 148 nm RMS), image calculée par COFFEE à partir des aberrations estimées.

Après minimisation du critère, on retrouve l'aberration introduite, nettement visible sur la figure 3. La qualité de la reconstruction de l'aberration introduite se traduit par la proximité des structures entre l'image expérimentale et calculée à partir de l'estimation faite par COFFEE.

3.2 Optimisation du contraste sur le détecteur

Dans cette section sont présentés les premiers résultats obtenus lors de la compensation des aberrations ϕ_u sur l'instrument SPHERE à partir de la mesure effectuée par COFFEE. Le but est de supprimer le signal résiduel associé à ces aberrations présentes en plan focal afin d'optimiser le contraste sur le détecteur scientifique.

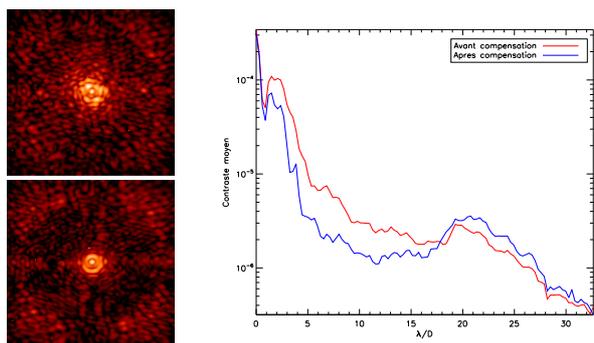


FIG. 4 – Optimisation du contraste sur l'instrument SPHERE. A gauche : images expérimentales acquises via le détecteur scientifique avant (haut) et après (bas) compensation des aberrations ϕ_u . A droite : tracé de l'intensité moyenne circulaire normalisée avant (rouge) et après (bleu) compensation (1 : pas de coronagraphe) calculée à partir des deux images de gauche.

Le gain en contraste est visible sur la figure 4 : en effet, dans les images expérimentales, certains speckles situés près du centre de l'image ont disparus, menant à une optimisation du contraste (défini ici comme une intensité moyenne normalisée) entre 0 et $18 \lambda/D$ (distance au centre dans le plan focal mesuré en λ/D). Remarquez toutefois qu'au-delà de $18 \lambda/D$, le contraste semble légèrement augmenter après compensation. Ce phénomène, qui provient de la méthode utilisée pour appliquer la mesure réalisée par COFFEE au système, est en cours d'étude, ceci afin d'effectuer une compensation optimale des aberrations.

Dans cette communication, nous avons présenté l'extension de COFFEE, la diversité de phase coronagraphique. L'utilisation d'une base de pixels régularisée dans la minimisation permet désormais une estimation des aberrations avec une précision nanométrique, hauts ordres compris. Par ailleurs, l'estimation conjointe d'un terme d'erreur sur la phase de diversité permet de prendre en compte la connaissance imparfaite de cette dernière, améliorant ainsi la robustesse de COFFEE, qui a pu être validé avec succès sur l'instrument SPHERE.

Références

- [1] P. J. Bordé and W. A. Traub *High contrast imaging from space : speckle-nulling in a low-aberration regime* *Astrophys. Journal*, 2006
- [2] P. Baudoz and A. Boccaletti and J. Baudrand and D. Rouan *The self-coherent camera : a new tool for exoplanet detection* *Proc. IAU Colloquium*, 2012
- [3] J.-F. Sauvage, L. M. Mugnier, B. Paul et R. Villedcroze *Coronagraphic phase diversity : a simple focal-plane sensor for high-contrast imaging* *Opt. Letters*, 2012
- [4] R. A. Gonsalves *Phase retrieval and diversity in adaptive optics* *Opt. Eng.*, 1982
- [5] L. M. Mugnier, A. Blanc et J. Idier *Advances in imaging and electron physics* ed. P Hawkes, 2006
- [6] L. M. Mugnier and T. Fusco and J.-M. Conan *MISTRAL : a Myopic Edge-Preserving Image Restoration Method, with Application to Astronomical Adaptive-Optics-Corrected Long-Exposure Images* *J. Opt. Soc. Am. A.*, 2004
- [7] J. Idier, L. M. Mugnier et A. Blanc *Statistical behavior of joint least square estimation in the phase diversity context*, *IEEE Trans. Image Processing*, 2005
- [8] B. Paul, J.-F. Sauvage et L. M. Mugnier *Coronagraphic phase diversity : performance study and laboratory demonstration*, *Astron. Astrophys.*, 2013
- [9] W. H. Press and S. A. Teukolsky and W. T. Vetterling and B. P. Flannery *Numerical Recipes : the art of scientific computing*, Cambridge University Press, 2007
- [10] Thiébaud, E. *Optimization issues in blind deconvolution algorithms*, *Astronomical Data Analysis II*, 2002