

Détection d'exo-planètes basée sur une modélisation statistique locale des patches

Olivier FLASSEUR¹, Loïc DENIS¹, Éric THIÉBAUT², Maud LANGLOIS²

¹Univ Lyon, UJM-Saint-Etienne, CNRS, Institut d'Optique Graduate School, Laboratoire Hubert Curien UMR 5516, F-42023, SAINT-ETIENNE, France

²Univ Lyon, Univ Lyon1, Ens de Lyon, CNRS, Centre de Recherche Astrophysique de Lyon UMR5574, F-69230, Saint-Genis-Laval, France

1: {nom.prenom}@univ-st-etienne.fr, 2: {nom.prenom}@univ-lyon1.fr

Résumé – La détection d'exo-planètes par imagerie directe est un problème difficile car les observations sont dominées par les fuites stellaires. Il est donc nécessaire de combiner des poses prises à différents instants (incluant une rotation des exo-planètes) et dans différentes bandes spectrales. A la différence des approches existantes, nous proposons une modélisation statistique localisée (échelle d'un patch de quelques dizaines de pixels de rayon) afin de caractériser les fluctuations dans les données dues à la variabilité des fuites stellaires et des bruits de mesure. Ce modèle conduit à un test de détection efficace et facile à mettre en œuvre.

Abstract – Exo-planet detection by direct imaging is a difficult problem since observations are dominated by stellar leakage. It is then necessary to combine images taken at different times and in different spectral bands. In contrast to existing approaches, we propose a localized statistical modeling (at the scale of a patch of a few tens of pixels) in order to characterize the fluctuations in the data due to the variability of stellar leakage and measurement noise. This model leads to a detection test that is efficient and easy to apply.

1 Introduction

La détection d'exo-planètes par imagerie directe constitue un enjeu actuel important en astronomie [1]. L'imagerie haut-contraste depuis la Terre nécessite une excellente correction de la turbulence atmosphérique (optique adaptative dite "extrême") conjointement à l'utilisation d'un coronographe dont le rôle est de bloquer au mieux le flux issu de l'étoile. Malgré la présence du coronographe, la détection visant des contrastes de l'ordre de 10^{-6} reste difficile et nécessite un traitement élaboré, combinant des informations multi-temporelles et multi-spectrales.

Nous présentons dans le paragraphe 2 le principe d'observation ainsi qu'un bref état de l'art des méthodes de détection d'exo-planètes. Nous présentons ensuite en paragraphe 3 une nouvelle méthode basée sur une modélisation statistique locale. Cette méthode est illustrée dans le paragraphe 4 sur des simulations numériques réalisées à partir de données réelles.

2 Détection d'exo-planètes : principe et état de l'art

2.1 Observation directe avec un coronographe

Afin de séparer la lumière issue de l'étoile hôte et la lumière provenant d'une planète, plusieurs principes sont utilisés dans

un système d'imagerie à haut contraste tel que l'instrument dédié SPHERE¹ du VLT, au Chili. Le premier consiste à masquer autant que possible l'étoile, en plaçant un masque dans un plan focal du télescope associé à un masque pupillaire (coronographe). Du fait de la diffraction et des aberrations optiques résiduelles (c'est à dire, non corrigées par l'optique adaptative), des fuites stellaires (speckles) contaminent les images formées en aval du coronographe. Ces fuites stellaires se traduisent dans les images par un fond structuré et sont plus fortes dans la région la plus proche de l'étoile hôte (située au centre du champ). La stabilité de la correction d'optique adaptative rend le fond relativement constant dans le temps. Un second principe consiste donc à combiner plusieurs poses dans lesquelles la planète présente un mouvement relatif par rapport au fond (rotation du champ au cours des observations). Enfin, les speckles du fond étant dus à des phénomènes diffractifs, ils varient (en première approximation) avec la longueur d'onde d'observation de façon homothétique : ce fond structuré est zoomé lorsqu'on considère une longueur d'onde plus grande. Le troisième principe consiste donc à séparer le signal propre à la planète des fuites de l'étoile en exploitant le fait que la planète est toujours vue à la même position dans le champ (à un instant donné) tandis que les fuites sont zoomées d'une longueur d'onde à l'autre.

Les mesures sont donc réalisées par un instrument de type

1. <https://www.eso.org/sci/facilities/paranal/instruments/sphere.html>

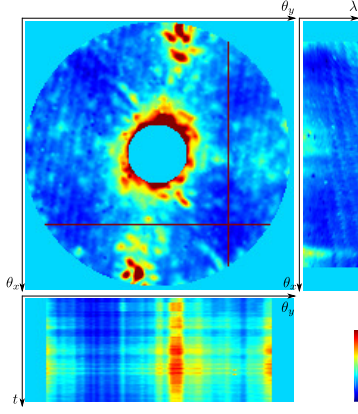


FIGURE 1 – Illustration d’un jeu de données SPHERE (coupes spatiales, spatio-temporelles et spatio-spectrales)

“spectromètre intégral de champ” capable de mesurer un spectre en chaque position spatiale du champ de vue. Ces spectres, enregistrés par des capteurs 2D et entachés d’erreurs de détection (pixels morts/aberrants, bruit de photon) sont ensuite combinés afin de former un cube spatio-spectral. En zoomant chaque tranche spatio-temporelle d’un facteur $\lambda_{\text{ref}}/\lambda$, on peut “aligner” les speckles et ainsi obtenir des pseudo-données ré-interpolées dans lesquelles les fuites stellaires sont quasiment constantes dans les directions temporelles et spectrales. Dans ces pseudo-données, la planète subit un mouvement apparent de rotation par rapport à l’étoile hôte dans la dimension temporelle, et de translation radiale dans la dimension spectrale.

La signature d’un objet ainsi que l’évolution du fond en fonction de la longueur d’onde et du temps d’acquisition sont illustrées Figure 1 dans un cube de pseudo-données enregistré par l’instrument SPHERE sur l’étoile HR8799.

2.2 État de l’art

Les principales méthodes de détection d’exo-planètes décrites dans la littérature tirent partie de la diversité spectrale et temporelle des données enregistrées pour séparer la signature d’une planète des speckles résiduels. Ces méthodes réalisent des transformations différentielles en temps et en longueur d’onde afin d’éliminer une grande partie des fuites stellaires. L’une des stratégies possibles consiste à ajuster une PSF (au sens des moindres carrés) à partir d’une combinaison linéaire d’un jeu polychromatique d’images enregistrées dans des conditions expérimentales proches de celles de l’observation. C’est l’approche retenue par les algorithmes LOCI (Locally Optimized Combination of Images, [2, 3]) et ANDROMEDA [4]. D’autres algorithmes, tel KLIP [5], exploitent une analyse en composantes principales afin de construire un modèle empirique des speckles. Une autre famille de méthodes se propose de fournir une modélisation chromatique des speckles basée sur la physique de la diffraction (PeX) [6]. Ces dernières méthodes ont l’avantage de ne nécessiter aucune transformation d’échelle des images temporelles et chromatiques.

3 Approche proposée : modélisation de la distribution locale des patches

3.1 Modélisation des fuites stellaires et des bruits de mesure

Nous décrivons dans cette section une méthode de détection d’exoplanètes basée sur une modélisation locale des fluctuations du fond (prise en compte des corrélations spatiales), ne requérant aucune transformation différentielle et reposant sur un unique paramètre de réglage. Ces fluctuations sont dues aux erreurs de mesure (bruit de photon, bruits de capteur) ainsi qu’à l’évolution temporelle des speckles créés par les fuites stellaires et aux variations spectrales des speckles au-delà du simple zoom considéré dans la génération des pseudo-données. À la différence des approches décrites en Section 2 visant à modéliser explicitement le fond afin de le soustraire des données pour pouvoir détecter les exo-planètes dans les résidus, nous ne cherchons qu’à caractériser les fluctuations locales du fond afin de décider si une imagerie (un patch) correspond à une fluctuation attendue ou signe la présence d’une exo-planète.

Nous cherchons à détecter dans les données ré-interpolées spatio-temporo-spectrales les exo-planètes présentes et à estimer leur position angulaire θ dans une image à temps et longueur d’onde donnés ainsi que leur spectre $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_L)^t$. Dans les pseudo-données, du fait de la rotation de champ et du zoom spectral qui a été appliqué, la position apparente d’une exo-planète n’est pas la même à tous les instants t ni à toutes les longueurs d’onde λ . Son mouvement apparent est parfaitement connu (composition d’une rotation et d’une homothétie) et représenté dans la suite par la transformation $\mathcal{F}_{\lambda,t} : \theta \mapsto \mathcal{F}_{\lambda,t}(\theta)$ qui transforme une position angulaire exprimée dans l’image de référence ($\lambda_{\text{ref}}, t_{\text{ref}}$) en une position angulaire dans l’image à l’instant t et à la longueur d’onde λ .

Notons $\mathbf{r}_{\lambda,t,\mathcal{F}_{\lambda,t}(\theta)}$ le vecteur des intensités contenues dans le patch circulaire de rayon P pixels, extrait dans la trame t à la longueur d’onde λ , autour de la position $\mathcal{F}_{\lambda,t}(\theta)$ qu’aurait dans cette image une exo-planète hypothétique si elle se trouvait à la position angulaire θ dans l’image de référence ($\lambda_{\text{ref}}, t_{\text{ref}}$). La collection $\mathcal{C}_{\theta} = \{\mathbf{r}_{\lambda_1,t_1,\mathcal{F}_{\lambda_1,t_1}(\theta)}, \dots, \mathbf{r}_{\lambda_L,t_T,\mathcal{F}_{\lambda_L,t_T}(\theta)}\}$ représente par conséquent les $L \cdot T$ patches 2D du cube de données ré-interpolées contenant cette (hypothétique) exo-planète. Du fait du mode de formation des données ré-interpolées, ces différents patches ne sont pas extraits aux mêmes positions spatiales et, par conséquent, ne contiennent pas les mêmes parties du fond. Nous allons donc modéliser la portion du fond comprise dans le patch $\mathbf{r}_{\lambda,t,\mathcal{F}_{\lambda,t}(\theta)}$ par un modèle statistique local (qui sera différent pour tous les patches de la collection \mathcal{C}_{θ}). Ainsi, nous supposons que le patch $\mathbf{r}_{\lambda,t,\mathcal{F}_{\lambda,t}(\theta)}$ est la somme de la réponse de l’exo-planète et d’un fond $\mathbf{f}_{\lambda,t,\mathcal{F}_{\lambda,t}(\theta)}$:

$$\mathbf{r}_{\lambda,t,\mathcal{F}_{\lambda,t}(\theta)} = \alpha_{\lambda} \cdot \mathbf{p}_{\mathcal{F}_{\lambda,t}(\theta)} + \mathbf{f}_{\lambda,t,\mathcal{F}_{\lambda,t}(\theta)}, \quad (1)$$

avec $\mathbf{p}_{\mathcal{F}_{\lambda,t}(\theta)}$ la réponse impulsionnelle hors-axe du système optique (qui est en bonne approximation invariante par translation dans le champ) et α_{λ} le flux de la planète à la longueur

d'onde λ . Afin de tenir compte des fluctuations du fond (dus au bruit comme aux variabilités des speckles avec le temps et la longueur d'onde), nous modéliserons le fond pour le patch extrait à la position $\theta' = \mathcal{F}_{\lambda,t}(\theta)$ dans l'image (λ, t) comme une réalisation d'une distribution gaussienne de moyenne $\mathbf{m}_{\theta'}$ et de matrice de covariance $\mathbf{C}_{\theta'}$. En pratique, nous estimerons $\mathbf{m}_{\theta'}$ et $\mathbf{C}_{\theta'}$ en calculant la moyenne et la covariance empiriques sur la collection de tous les patches extraits à la position angulaire $\theta' : \mathcal{P}_{\theta'} = \{\mathbf{r}_{\lambda_1, t_1, \theta'}, \dots, \mathbf{r}_{\lambda_L, t_T, \theta'}\}$. À la différence de la collection \mathcal{C}_{θ} , les patches de la collection $\mathcal{P}_{\theta'}$ sont tous extraits aux mêmes positions spatiales de sorte qu'ils contiennent toujours la même portion du fond et ne contiennent la planète que dans un seul patch (le patch pour lequel t et λ sont tels que $\theta' = \mathcal{F}_{\lambda,t}(\theta)$).

3.2 Critère de détection

Nous proposons d'exploiter ce modèle local gaussien pour exprimer le problème de détection de la présence d'une exo-planète à la position θ dans l'image de référence $(\lambda_{\text{ref}}, t_{\text{ref}})$ sous forme d'un test d'hypothèses :

$$\begin{cases} \mathcal{H}_0 : \forall \lambda, \forall t, \mathbf{r}_{\lambda,t,\mathcal{F}_{\lambda,t}(\theta)} = \mathbf{f}_{\lambda,t,\mathcal{F}_{\lambda,t}(\theta)} \\ \mathcal{H}_1 : \forall \lambda, \forall t, \mathbf{r}_{\lambda,t,\mathcal{F}_{\lambda,t}(\theta)} = \alpha_\lambda \cdot \mathbf{p}_{\mathcal{F}_{\lambda,t}(\theta)} + \mathbf{f}_{\lambda,t,\mathcal{F}_{\lambda,t}(\theta)} \\ \text{avec } (\alpha_{\lambda_1}, \dots, \alpha_{\lambda_L})^t \neq \mathbf{0}. \end{cases} \quad (2)$$

Sous l'hypothèse \mathcal{H}_0 , chaque patch de la collection \mathcal{C}_{θ} est expliqué comme étant une réalisation du processus aléatoire local modélisant le fond et aucune planète n'est présente à la position θ . Sous l'hypothèse \mathcal{H}_1 , les patches de la collection \mathcal{C}_{θ} sont décrits comme somme d'un fond local et de l'image de la planète à la longueur d'onde correspondante. Pour réaliser ce test d'hypothèses, nous proposons d'utiliser le rapport de vraisemblance généralisé (GLR) :

$$\Lambda(\theta) = \log \frac{\mathbb{P}(\mathcal{C}_{\theta} | \{\hat{\mathbf{f}}_{\lambda,t,\mathcal{F}_{\lambda,t}(\theta)}\}, \{\hat{\alpha}_\lambda\}, \mathcal{H}_1)}{\mathbb{P}(\mathcal{C}_{\theta} | \{\hat{\mathbf{f}}_{\lambda,t,\mathcal{F}_{\lambda,t}(\theta)}\}, \mathcal{H}_0)}. \quad (3)$$

La comparaison de $\Lambda(\theta)$ à un seuil τ permet de décider en faveur de l'hypothèse \mathcal{H}_1 de présence d'une exo-planète à la position θ ($\Lambda(\theta) > \tau$) ou de l'hypothèse \mathcal{H}_0 d'absence d'exo-planète.

Dans le cadre du modèle gaussien introduit au paragraphe précédent, le GLR peut être exprimé en fonction du spectre de planète $\{\hat{\alpha}_\lambda\}$:

$$\Lambda(\theta) = \sum_{\lambda} \hat{\alpha}_\lambda \cdot (2b_\lambda - a_\lambda \cdot \hat{\alpha}_\lambda) \quad (4)$$

avec :

$$\begin{cases} a_\lambda = \sum_t (\mathbf{p}_{\mathcal{F}_{\lambda,t}(\theta)})^t (\mathbf{C}_{\mathcal{F}_{\lambda,t}(\theta)})^{-1} (\mathbf{p}_{\mathcal{F}_{\lambda,t}(\theta)}) \\ b_\lambda = \sum_t (\mathbf{p}_{\mathcal{F}_{\lambda,t}(\theta)})^t (\mathbf{C}_{\mathcal{F}_{\lambda,t}(\theta)})^{-1} (\mathbf{r}_{\lambda,t,\mathcal{F}_{\lambda,t}(\theta)} - \mathbf{m}_{\mathcal{F}_{\lambda,t}(\theta)}). \end{cases} \quad (5)$$

3.3 Estimation du flux de l'exo-planète

Le flux de l'exo-planète peut être estimé pour chaque longueur d'onde au sens du maximum de vraisemblance, sous la contrainte physique d'un flux non négatif :

$$\hat{\alpha}_\lambda = \arg \min_{\alpha \geq 0} \sum_t \|\mathbf{r}_{\lambda,t,\mathcal{F}_{\lambda,t}(\theta)} - \mathbf{m}_{\mathcal{F}_{\lambda,t}(\theta)} - \alpha \mathbf{p}_{\mathcal{F}_{\lambda,t}(\theta)}\|_{\mathbf{W}}^2 \quad (6)$$

avec $\mathbf{W} = \mathbf{C}_{\mathcal{F}_{\lambda,t}(\theta)}^{-1}$ et la notation $\|\mathbf{u}\|_{\mathbf{W}}^2$ désignant $\mathbf{u}^t \mathbf{W} \mathbf{u}$. L'expression de $\hat{\alpha}_\lambda$ est obtenue en seuillant l'estimateur des moindres carrés pondérés :

$$\hat{\alpha}_\lambda = \frac{[b_\lambda]_+}{a_\lambda}. \quad (7)$$

où $[b]_+ = \max(0, b)$. En substituant cette expression dans celle du GLR, équation (4), on obtient l'expression simplifiée :

$$\Lambda(\theta) = \sum_{\lambda} \frac{[b_\lambda]_+^2}{a_\lambda}. \quad (8)$$

L'estimation du flux peut être améliorée en exploitant la continuité spectrale (le spectre des planètes est relativement lisse pour l'échantillonnage spectral de SPHERE). On estime alors la densité spectrale d'intensité $\alpha = (\alpha_{\lambda_1}, \dots, \alpha_{\lambda_L})^t$ au sens du maximum *a posteriori* (MAP) avec un *a priori* de corrélation spectrale de α :

$$\hat{\alpha} = \arg \min_{\alpha \geq 0} \sum_{t,\lambda} \|\mathbf{r}_{\lambda,t,\mathcal{F}_{\lambda,t}(\theta)} - \mathbf{m}_{\mathcal{F}_{\lambda,t}(\theta)} - \alpha_\lambda \mathbf{p}_{\mathcal{F}_{\lambda,t}(\theta)}\|_{\mathbf{W}}^2 + \mu \cdot \|\mathbf{D}\alpha\|_2^2, \quad (9)$$

avec \mathbf{D} l'opérateur linéaire de différences finies et μ un hyperparamètre contrôlant la force du lissage imposé par l'*a priori*. Du fait du couplage entre les longueurs d'ondes, le problème d'optimisation (9) nécessite d'appliquer un algorithme itératif. Nous montrons à la section 4 que la régularisation spectrale améliore sensiblement la qualité des spectres estimés. Elle peut également permettre d'améliorer la détection [7].

La covariance d'estimation du spectre estimé $\hat{\alpha}$ peut être approchée par la covariance en l'absence de contrainte de positivité :

$$\text{Cov}[\hat{\alpha}] \approx \mathbf{M}^{-1} \text{diag}(a_\lambda) \mathbf{M}^{-1} \quad (10)$$

avec $\text{diag}(a_\lambda)$ la matrice diagonale dont les éléments diagonaux sont égaux à $a_{\lambda_1}, \dots, a_{\lambda_L}$ et $\mathbf{M} = \text{diag}(a_\lambda) + \mu \cdot \mathbf{D}^t \mathbf{D}$.

3.4 Algorithme de détection

Nous avons implémenté un algorithme précalculant les différents termes apparaissant dans les sommes de l'équation (5) afin de recycler les calculs pour les différentes positions angulaires de planète considérées. Si K est le nombre de pixels compris dans un patch et N est le nombre de positions angulaires considérées dans le champ de vue, la complexité de l'algorithme représente $N \cdot L \cdot T$ produits de vecteurs à K éléments ainsi que la résolution de N systèmes linéaires de taille $K \times K$. Le traitement d'un cube de $290 \times 290 \times 55 \times 39$ nécessite moins de 10 minutes sur un coeur (processeur i7-4800MQ@2.70GHz $K = 49$).

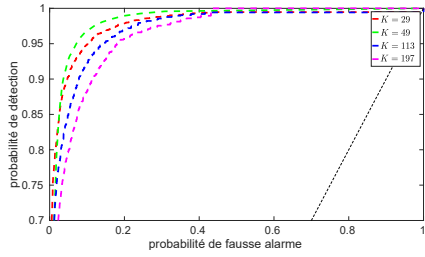


FIGURE 2 – Influence de la taille des patches – courbes ROC

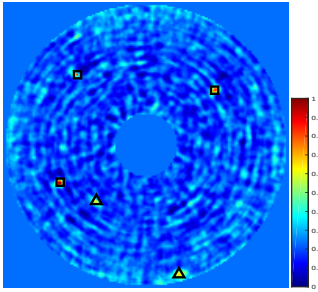


FIGURE 3 – Détection sur données synthétiques et réelles basées sur les résidus typiques d’observation de SPHERE

4 Analyse qualitative et quantitative des performances de la méthode

La méthode de détection proposée possède l’avantage de ne posséder que peu de paramètres de réglages : taille K des patches considérés et hyper-paramètre μ si une contrainte de continuité spectrale est appliquée. Nous évaluons l’influence du paramètre K par des courbes ROC présentées en Figure 2 donnant la probabilité de détection en fonction de la probabilité de fausse alarme pour différentes valeurs de K . A noter que ces courbes, purement qualitatives, ont été obtenues en considérant un problème de détection simplifié à une unique longueur d’onde et une unique trame t . Il apparaît que le choix $K = 49$ offre un bon compromis de description locale des speckles, car il permet de maximiser l’aire sous la courbe ROC.

Nous évaluons les performances de détection et d’estimation spectrale de la méthode proposée par ajout de 3 planètes synthétiques de spectre donné en Figure 4 (correspondant à une intensité $40\times$ plus faible que le speckle le plus brillant) à un jeu de données réel issu d’observations faites par l’instrument SPHERE. La Figure 3 donne la carte de GLR $\Lambda(\theta)$ obtenue par la méthode proposée. La position centrale des planètes synthétiques (repérées par des carrés) est détectée sans erreur au pixel près. A noter que les planètes proches du centre optique conduisent à une valeur du GLR plus faible que pour les planètes plus éloignées de l’étoile hôte du fait d’un RSB plus faible et d’un déplacement réduit de l’objet au cours du temps. Il est également possible d’observer deux maxima locaux supplémentaires (repérés par des triangles) qui ont également été détectés par d’autres méthodes de l’état de l’art du type KLIP. Des tests de détection ont également été conduits sur un autre jeu de données pour lesquelles toutes les planètes ayant un contraste (rapport entre l’intensité maximale de la pla-

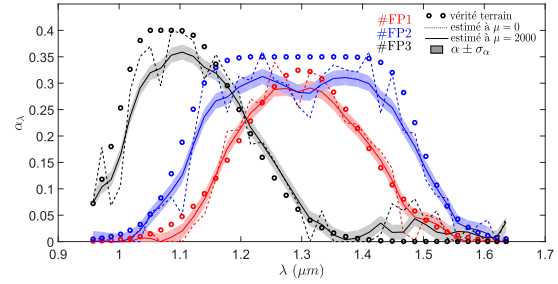


FIGURE 4 – Estimation du spectre des objets synthétiques.

nète et intensité de l’étoile hôte) supérieur ou égal à 10^{-5} ont été détectées sans fausse alarme, quelle que soit leur position dans le champ.

Les spectres des objets synthétiques estimés par la méthode proposée en l’absence de régularisation (équation 6) et en présence de régularisation (équation 9) avec $\mu = 2000$ sont représentés Figure 4 ainsi qu’une approximation de la variance (équation 10). Il apparaît que les spectres reconstruits sont en bon accord avec les spectres injectés. Le léger biais résiduel (sous-estimation du flux), observé pour les planètes les plus proches de l’étoile, est dû au faible déplacement entre les différentes poses. La contrainte de régularité spectrale permet d’améliorer l’estimation des spectres.

5 Conclusion

Nous avons présenté une méthode de détection d’exoplanètes basée sur une modélisation locale de la variabilité des patches selon les dimensions spectrales et temporelles. Cette modélisation permet également d’estimer le spectre des objets détectés sans modélisation explicite des fuites stellaires. Les travaux en cours portent sur la comparaison quantitative avec les autres méthodes de l’état de l’art et l’intégration de la régularisation spectrale dans le critère de détection.

Références

- [1] C. MAROIS et al. “Direct imaging of multiple planets orbiting the star HR 8799”. In : *Science* (2008).
- [2] D. LAFRENIERE et al. “A new algorithm for point-spread function subtraction in high-contrast imaging : A demonstration with angular differential imaging”. In : *ApJ* (2007).
- [3] C. MAROIS, B. MACINTOSH et J.-P. VÉRAN. “Exoplanet imaging with LOCI processing : photometry and astrometry with the new SOSIE pipeline”. In : *SPIE Astr. Tel. + Instrum.* 2010.
- [4] F. CANTALLOUBE et al. “Direct exoplanet detection and characterization using the ANDROMEDA method : Performance on VLT/NaCo data”. In : *A & A* (2015).
- [5] R. SOUMMER, L. PUEYO et J. LARKIN. “Detection and characterization of exoplanets and disks using projections on Karhunen-Loève eigenimages”. In : *ApJ Lett.* (2012).
- [6] É. THIÉBAUT et al. “Exploiting physical constraints for multi-spectral exo-planet detection”. In : *SPIE Astr. Tel. + Instrum.* 2016.
- [7] E. THIÉBAUT et L. MUGNIER. “Maximum a posteriori planet detection and characterization with a nulling interferometer”. In : *Proc. Int. Astron. Union* (2005).