



Astrophysique/Systèmes extra-galactiques

## Proposition de coronographe achromatique à quatre quadrants

Claude Aime \*, Alexis Carlotti, Gilbert Ricort

UMR 6525, Laboratoire universitaire d'astrophysique de Nice, université de Nice Sophia Antipolis, parc Valrose, 06108 Nice cedex 2, France

Reçu le 20 juillet 2007 ; accepté après révision le 5 octobre 2007

Disponible sur Internet le 7 novembre 2007

Présenté par Françoise Combes

### Résumé

Nous proposons l'utilisation d'un interféromètre de Mach–Zehnder pour rendre achromatique le coronographe quatre quadrants à masque de phase. L'interféromètre sert à produire un déphasage de  $\pi$  achromatique. On utilise deux masques binaires complémentaires de transmission 1 et 0 pour les quadrants de même parité. Ces masques sont placés dans le plan focal formé dans l'interféromètre. Les images des pupilles en sortie montrent une équipartition de l'énergie l'une restant semblable à la pupille d'entrée, l'autre étant coronographiée. Des résultats préliminaires obtenus en lumière cohérente sont présentés. Le rendement actuel de l'expérience n'est que de 25%, mais nous fournissons des indications pour l'augmenter. *Pour citer cet article : C. Aime et al., C. R. Physique 8 (2007).*

© 2007 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

### Abstract

**Proposal of an achromatic four quadrants coronagraph.** We propose to use a Mach–Zehnder interferometer to make achromatic the four quadrants phase mask coronagraph. The interferometer is used to get the achromatic  $\pi$  phase term. Two complementary binary masks of transmission 1 and 0 for quadrants of the same parity are set in the focal plane formed inside the interferometer. There is an equipartition of the energy in the exit aperture images, one being similar to the entrance aperture, the other being coronagraphied. We present preliminary results obtained with a coherent light. The current throughput of the experiment is 25% only, but we give indications on how to improve it. *To cite this article: C. Aime et al., C. R. Physique 8 (2007).*

© 2007 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

*Mots-clés :* Exoplanètes ; Coronographie ; Achromatisme

*Keywords :* Exoplanets ; Coronagraphy ; Achromatism

### Abridged English version

Since the first *indirect* detection of an exoplanet by Mayor and Queloz [1], numerous projects to *directly* detect exoplanets have been considered. The main objective is to deduce from spectral analysis the physical properties of

\* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : [clauda.aime@unice.fr](mailto:clauda.aime@unice.fr) (C. Aime).

these new worlds. A direct observation in the focal plane of a telescope is not sufficient and star light has to be rejected with a dedicated instrument.

We describe in this Note a system for making achromatic the four quadrants phase mask (4QPM) of Rouan et al. [2], which is one of the most original coronagraphs invented for the detection of exoplanets. This coronagraph uses a binary *phase* mask that divides the field of view of the focal plane in four quadrants. The mask is so that its transmission in amplitude is 1 for odd quadrants and  $-1$  for the others. The transmission  $-1$  is obtained introducing a phase shift of  $\pi$ . Such a mask, centered on the Airy pattern of a circular telescope, has the remarkable property to reject all the light outside the image of the entrance aperture, where a Lyot stop can get rid of it to make it possible the observation of the planet. The result is invariant to a rotation of the mask. The planet is almost unaffected by the mask, unless it is unfortunately lying exactly along one of the axis of the mask (according to Rouan et al. [3] it is then attenuated by about 2.15 magnitudes).

The system we propose here makes it possible to obtain a 4QPM coronagraph with an achromatic  $\pi$  phase term by means of a Mach–Zehnder interferometer and two complementary binary *amplitude* masks. The image of the telescope focal plane is formed into the two arms of a Mach–Zehnder interferometer. The star diffraction pattern is centered on the masks. Thanks to the effect of the beam-splitters, one of the focal images takes an achromatic phase shift of  $\pi$ , and the Mach–Zehnder operates as an additive and subtractive device. The additive output reforms an unchanged image of the aperture. The subtractive output is similar to the effect of the 4QPM coronagraph. The principle of the set-up is given in Fig. 1 where the complementarity of the masks can be observed.

A preliminary experiment has been made in laser light using binary masks of not extremely good quality, as it can be seen in Fig. 2. Nevertheless, the expected effect is observed: when the Mach–Zehnder is correctly tuned, the telescope aperture shows the characteristic figure of light rejection of the 4QPM, as shown in Fig. 3. The throughput of the experiment is only 25%, because of the use of the 50% opaque masks and the division of light in the two outputs. The additive outputs may be used for another application of a coronagraphic technique, or for calibration purpose. The use of mirrors for dividing the wave could give an improvement of a factor 2, and a possible set-up for such an experiment is proposed in Fig. 1. We intend to improve our optical components to perform the experiment in white light. This will be reported in a future paper.

## 1. Introduction

Depuis la première détection *indirecte* d'une exoplanète par Mayor et Queloz [1], de nombreux projets d'instruments pouvant permettre l'observation *directe* des exoplanètes ont vu le jour. Le but est de détecter directement le rayonnement de la planète afin de pouvoir en faire une analyse spectrale et d'en déduire ses propriétés physiques. On espère pouvoir détecter des exo-Jupiter depuis le sol et l'on développe pour cela de nouveaux instruments pourvus d'optique adaptative extrême (projets Gemini [4] et Sphere [5]), et les missions spatiales les plus ambitieuses (TPF [6] et Darwin [7]) visent à détecter des exo-Terres.

Le principal problème rencontré est l'énorme différence de brillance entre étoile et planète (plus d'un milliard dans le visible). Quelles que soient les performances des télescopes envisagés, une observation classique directe au foyer de l'instrument ne sera pas suffisante et une instrumentation spécialisée, visant à rejeter la lumière de l'étoile est nécessaire. Un numéro récent des Comptes Rendus de Physique [8] a pour thème la présentation de ces systèmes. Ceux qui opèrent avec un télescope classique sont appelés coronographes, en référence à l'instrument utilisé par Lyot [9] pour observer la couronne solaire. Certains d'entre eux s'en inspirent très directement, avec un masque opaque dans le plan focal (masque de Lyot) et un diaphragme placé au niveau de la pupille (diaphragme de Lyot). D'autres coronographes ont substitué au masque opaque de Lyot un masque de phase (Roddier et Roddier [10]). Parmi ces systèmes, le plus original est certainement le coronographe utilisant un masque de phase à quatre quadrants (4QPM) proposé en 2000 par Rouan et al. [2].

Le 4QPM peut s'écrire comme le masque de transmission 1 sur les quadrants 1 et 3 et  $-1$  sur les quadrants 2 et 4. La transmission  $-1$  peut être obtenue par une variation du trajet optique de  $\lambda/2$  correspondant à un déphasage de  $\pi$ . Un tel masque centré sur la figure de diffraction d'un point source sur l'axe produit une amplitude complexe identiquement nulle à l'intérieur de l'image d'une pupille de télescope circulaire. Ainsi la lumière stellaire peut être complètement annulée par le diaphragme de Lyot. Ce résultat surprenant provient d'une propriété non triviale de la transformée de Fourier. La figure de diffraction de la pupille circulaire étant à symétrie de révolution, il est évident que la réjection reste parfaite pour toute rotation du masque. La planète n'étant pas centrée sur le 4QPM, elle n'est

pas affectée par celui-ci, sauf si par malchance elle se trouve exactement centrée sur l'un des axes (l'atténuation est alors de 2,15 magnitudes, selon Rouan et al. [3]). La lumière de la planète passe à l'intérieur du diaphragme de Lyot où un deuxième objectif reforme son image dans le plan focal. On a donc ainsi supprimé toute lumière de l'étoile sans affecter la planète et le coronographe 4QPM constitue un système réjecteur parfait. La difficulté principale est la réalisation d'un déphasage de  $\pi$  indépendant de la longueur d'onde afin d'utiliser le coronographe avec une large bande passante. On peut améliorer le résultat en utilisant plusieurs lames de verres [11] ou plusieurs coronographes en série [3], mais ce ne sont que des approximations. Un déphasage achromatique de  $\pi$  est obtenu parfaitement dans le coronographe interférentiel achromatique de Gay et Rabbia [12], par passage au foyer d'une des voies ; leur montage est à mi-chemin entre un interféromètre annulaire de type Bracewell [13] et un coronographe. Ce que nous montrons ici est que ce déphasage de  $\pi$  achromatique peut aussi être obtenu à l'aide d'un interféromètre de Mach-Zehnder.

## 2. Le Mach-Zehnder en tant que déphaseur achromatique

L'interféromètre de Mach-Zehnder fait partie des expériences de référence en optique en tant que variante intéressante à deux sorties de l'interféromètre de Michelson. Il est constitué de deux lames séparatrices et de deux miroirs disposés selon un carré ou rectangle. Une représentation schématique du Mach-Zehnder que nous avons utilisé est donnée dans la Fig. 1.

On note G (gauche) et D (droit) les deux bras du Mach-Zehnder, S1 et S2 les deux sorties. La lumière qui passe par la voie G et arrive en S1 est notée G1. Nous supposons dans ce qui suit que l'interféromètre est parfait et réglé à l'ordre zéro : les 4 parcours (G1, G2, D1 et D2) sont égaux, les lames séparatrices ont une transmission et une réflexion de 50% et les miroirs sont parfaitement réfléchissants.

Pour la sortie S2, les trajets G2 et D2 ont traversé deux fois l'épaisseur de la séparatrice, et les trajets G1 et D1 une seule fois seulement. Le Mach-Zehnder utilisé comportait en plus deux lames compensatrices, qui étaient indispensables pour une autre application que celle que nous présentons ici. Elles s'avèrent très utiles pour un réglage facile de l'instrument, et nous les avons laissées pour la démonstration expérimentale que nous donnons ici.

Quand le Mach-Zehnder est parfaitement réglé, la sortie S1 (résultat de G1 + D1) est brillante et la sortie S2 (résultat de G2 + D2) est obscure, comme résultat de l'addition (voie 1) ou de la soustraction (voie 2) des ondes, à

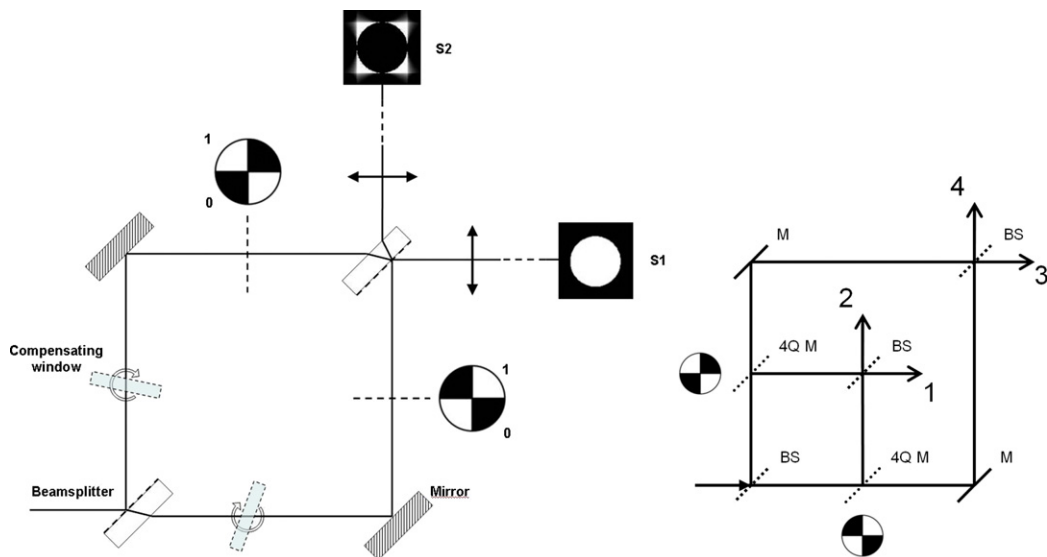


Fig. 1. A gauche : schéma du Mach-Zehnder utilisé en laboratoire pour tester le principe du coronographe 4QPM. L'image de la tache d'Airy du télescope est formée sur les deux masques binaires (0,1) complémentaires. Les sorties ont un flux correspondant à 25% chacune de la lumière incidente. La voie horizontale (additive ou voie 1 dans le texte) reforme une image identique de la pupille de l'instrument, la voie verticale (soustractive ou voie 2) est la voie coronographiée intéressante, comme le montrent les images des pupilles en sortie. A droite : schéma de principe d'un système utilisant des miroirs pour séparer les faisceaux et permettant de gagner un facteur 2 dans le rendement de l'instrument.

cause des déphasages de  $\pi$  des lames séparatrices. Ce résultat est bien connu, mais nous le rappelons très brièvement ici.

Soient  $\phi_r$  et  $\phi_t$  les phases dues à la réflexion et la transmission des lames séparatrices, nous avons :

$$\begin{aligned} \text{voie 1 : } & \frac{A}{2} \exp i(\phi_t + \phi_r) + \frac{A}{2} \exp i(\phi_t + \phi_r) = A \exp i(\phi_t + \phi_r) \\ \text{voie 2 : } & \frac{A}{2} \exp i(\phi_r + 2\phi_t) + \frac{A}{2} \exp i(\phi_t + \phi_t) = A \exp i(2\phi_t)(1 + \exp i\phi_r) \end{aligned} \quad (1)$$

Le facteur  $1/2$  provient de la double traversée ou réflexion des séparatrices, coûtant à chaque fois à l'amplitude un facteur  $\sqrt{2}$ . Quelle que soit la longueur d'onde, la réflexion sur la première séparatrice étant du type vitreux, d'un indice moins élevé à un indice plus élevé, la phase  $\phi_r$  induite est égale à  $\pi$ . Cette conclusion se trouve renforcée par le fait que, l'intensité de la voie 1 étant égale à celle à l'entrée du Mach–Zehnder, la voie 2 doit être nulle et  $(1 + \exp i\phi_r)$  aussi. En conséquence, les ondes s'additionnent dans la sortie S1 et se soustraient dans la sortie S2, et le Mach–Zehnder peut être utilisé comme un dispositif produisant l'addition et la soustraction des amplitudes complexes se trouvant dans les deux bras. Cette propriété est donnée en exercice aux étudiants des premières années d'université ([14]). Nous l'avons utilisée dans l'article Carloti et al. [15] en mettant des masques de phase. Nous l'utilisons ici avec des masques d'amplitude de transmission 1 ou 0. En fait on peut arriver au montage proposé à partir de la recherche de masques achromatiques. Alors que cet article était en cours d'expertise chez l'éditeur, nous nous sommes aperçus que Bloemhof [16] était arrivé à une proposition semblable à partir d'une étude des propriétés de transmission et de réflexion des faisceaux par des lames diélectriques. Cet auteur propose, sans le dire, d'utiliser une version de principe de l'interféromètre de Mach–Zehnder que nous avons réalisé.

### 3. Couplage Mach–Zehnder et coronographe à quatre quadrants

On forme dans le Mach–Zehnder les images du plan focal de l'instrument sur les masques binaires complémentaires  $t_{13}(x, y)$  et  $t_{24}(x, y)$ , tels que :

$$\begin{aligned} t_{13}(x, y) &= 1 \quad \text{si } \text{sign}(x) = \text{sign}(y), \quad 0 \text{ si non} \\ t_{24}(x, y) &= 1 \quad \text{si } \text{sign}(x) \neq \text{sign}(y), \quad 0 \text{ si non} \end{aligned} \quad (2)$$

laissant passer chacun les deux quadrants de même parité du plan (ceux notés en indices). Ces masques, représentés dans la Fig. 1, sont placés chacun dans une des voies de l'interféromètre. Ils y sont représentés de manière à faire apparaître leur complémentarité dans le plan focal.

Si l'on reforme l'image du plan focal à l'extérieur du Mach–Zehnder, à partir de chaque sortie, on observe la juxtaposition des deux images transmises par les masques (voir Fig. 2). Supposons que l'on ait dans la voie G l'écran  $t_{13}(x, y)$ , et dans la voie D l'écran  $t_{24}(x, y)$ . Les amplitudes complexes  $S_1(x, y)$  et  $S_2(x, y)$  dans les voies de sortie s'écrivent :

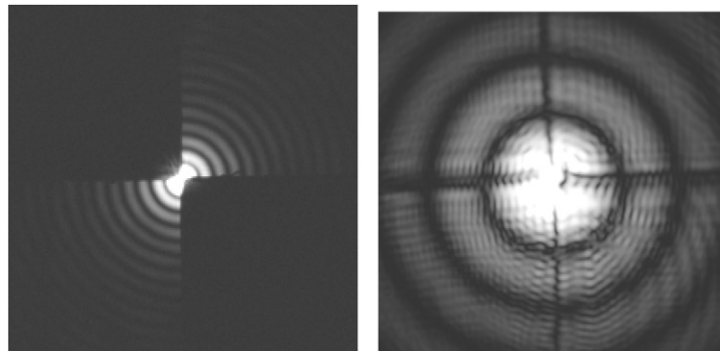


Fig. 2. A gauche : image du plan focal obtenue en obstruant l'une des voies de l'interféromètre. Le premier anneau noir a une taille d'environ  $400 \mu\text{m}$ . A droite : image de la partie centrale du plan focal avec les deux voies. Ces images mettent en évidence les défauts des masques utilisés.

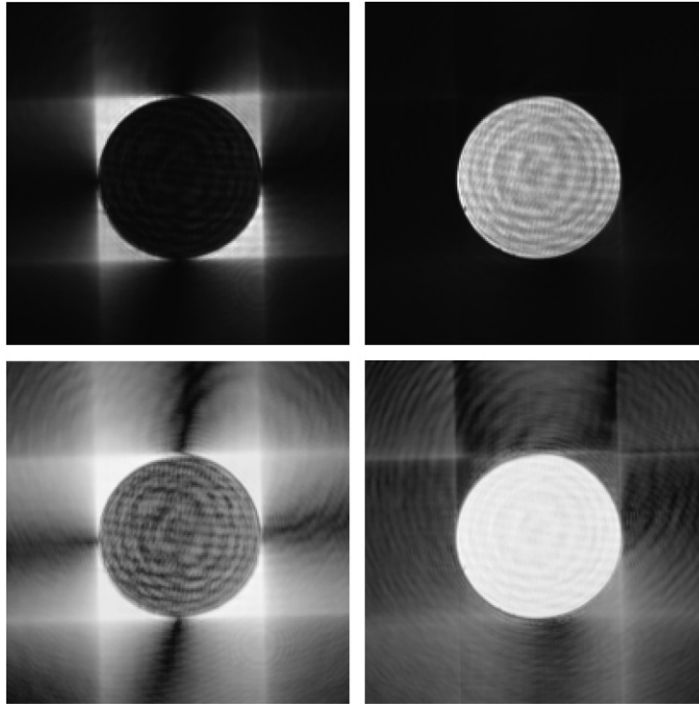


Fig. 3. Images des pupilles en sortie, représentées en échelle linéaire (haut) et en échelle logarithmique (bas), pour la voie coronographiée (gauche) et la voie reconstruite (droite). Malgré la mauvaise qualité des masques utilisés, et les divers défauts de l'optique (poussières, franges) le phénomène de réjection du coronographe 4QPM reste bien marqué. Le diamètre de la pupille utilisée est de 2.1 mm.

$$S_1(x, y) = \frac{1}{2}(t_{13}(x, y) + t_{24}(x, y)) \times f(x, y) = \frac{1}{2}f(x, y)$$

$$S_2(x, y) = \frac{1}{2}(t_{13}(x, y) - t_{24}(x, y))f(x, y) = \frac{1}{2}Q(x, y) \times f(x, y) \quad (3)$$

où  $f(x, y)$  représente l'amplitude complexe diffractée par le télescope dans son plan focal. Les écrans  $t_{13}(x, y)$  et  $t_{24}(x, y)$  étant complémentaires, leur somme correspond à un écran de transmission 1, et leur différence à l'effet du 4QPM  $Q(x, y)$  :

$$Q(x, y) = \text{sign}(x) \text{sign}(y) \quad (4)$$

de transmission 1 sur les quadrants impairs et  $-1$  sur les quadrants pairs. L'orientation des masques est arbitraire : on peut les faire tourner d'un angle quelconque, à condition de garder la complémentarité de leurs images.

Il y a équitpartition de l'énergie lumineuse entre les voies. Elles ne transmettent chacune que 25% de la lumière, car les masques binaires ont obturé la moitié du faisceau. Le lecteur notera enfin qu'en enlevant les masques, c'est à dire en faisant  $t_{13}(x, y) = t_{24}(x, y) \equiv 1$  dans l'Eq. (3), on retrouve bien tout le flux dans la voie brillante (sortie 1), la sortie 2 étant obscure.

Lorsqu'on reforme les images du plan focal à travers ce dispositif, on ne voit pas de différence entre les deux voies de l'interféromètre, car l'oeil ne perçoit évidemment pas le déphasage de  $\pi$ . La Fig. 2 donne une illustration du plan focal lorsqu'on l'on utilise qu'une seule des deux voies de l'interféromètre (figure de gauche), ou avec les deux voies (figure de droite). Ces figures mettent bien en évidence les défauts de nos masques. Ils ont été réalisés en laboratoire en approchant sous un microscope des lames métalliques. A l'échelle de la réponse impulsionnelle, les pointes sont émoussées, les angles droits ne sont pas parfaitement respectés et la superposition des images reste approximative.

En dépit de ces défauts, l'effet du coronographe à quatre quadrants reste bien visible. La Fig. 3 montre les images des pupilles obtenues dans les deux voies de l'interféromètre, avec une voie coronographiée et une voie non modifiée par le Mach-Zehnder. La représentation se fait en échelle linéaire ainsi qu'en échelle logarithmique. Il y a environ 25 fois moins de flux à l'intérieur qu'à l'extérieur de la pupille coronographiée. En fait ces images ont été obtenu dans une seule voie, en faisant varier artificiellement le déphasage grâce aux lames compensatrices, et ce essentiellement

parce que nous ne disposons que d'une seule caméra. Cette opération n'est possible que parce que nous avons opéré en lumière cohérente. A l'ordre zéro en lumière blanche, les deux voies ne peuvent pas être échangées. Le réglage est plus délicat, et nous montrerons les résultats dans un futur article, après amélioration de notre dispositif expérimental.

#### 4. Discussion et conclusion

Nous avons montré dans cette Note qu'une achromatisation du coronographe à quatre quadrants peut être obtenue en utilisant un interféromètre de Mach–Zehnder et des masques binaires adaptés. Ce sont des masques *d'amplitude* et non de phase. L'interféromètre permet d'obtenir le déphasage de  $\pi$  *achromatique*, et les masques effectuent les découpages en quadrants.

On connaît le fonctionnement du coronographe 4QPM mais on peut remarquer que la lumière de l'étoile passe par les deux voies de l'interféromètre, alors que celle de la planète, que nous supposons contenue dans un seul quadrant, ne passe que par l'un des bras. On peut donc plus facilement concevoir qu'il n'y aura aucun effet de l'interféromètre sur la planète. Le montage a un rendement en flux de 25%, que ce soit pour l'étoile ou la planète. En effet, on perd 50% du flux sur l'un des masques, et à nouveau 50% du flux restant dans la voie non coronographiée. Cette dernière peut être utilisée à des fins diverses (guidage, correction des speckles résiduels, etc.), ou être reprise pour une autre application du coronographe à quatre quadrants, ou d'un autre coronographe.

On peut envisager de remplacer ces masques opaques par des systèmes identiques à miroirs. Nous avons donné le principe d'une telle réalisation dans la Fig. 1. Ceci complique certainement le montage, mais double le rendement de l'expérience. Une étude fine d'un tel système est nécessaire. En effet, les masques-miroirs ne peuvent plus séparer les faisceaux exactement dans le plan focal, puisque les arêtes des miroirs sont en biais par rapport au faisceau. Ce défaut n'est peut être pas rédhibitoire si l'on utilise des très grandes focales et des angles plus fermés pour le Mach–Zehnder.

Les résultats que nous avons montré ici sont tout à fait préliminaires. Ils ont été obtenus en lumière cohérente, avec des masques dont la qualité n'est pas satisfaisante. En dépit de cela, le phénomène attendu est bien retrouvé. La réalisation de masques plus performants est à l'étude. A cette occasion, nous pourrions également tester les masques à 8 secteurs préconisés par Rouan et al. [3]. On envisage également de tester un tel dispositif dans le cas du coronographe de Roddier et Roddier [10] que l'on pourrait alors utiliser dans un mode apodiseur avec un masque de grand diamètre, comme décrit dans Ferrari et al. [17].

Il nous faut maintenant améliorer le dispositif expérimental pour le faire fonctionner en lumière blanche, et tester les performances en divers points, et par exemple mesurer les possibles effets de polarisation instrumentale induits par le montage. Un système permettant un équilibrage précis en intensité des voies de l'interféromètre devra probablement être introduit pour compenser les défauts en transmission et réflexion des lames séparatrices. Ces travaux feront l'objet d'une publication future.

#### Références

- [1] M. Mayor, D. Queloz, *Nature* 378 (1995) 355.
- [2] D. Rouan, P. Riaud, A. Boccaletti, A. Clénet, Y. Labeyrie, *Publ. Astron. Soc. Pacific* 112 (777) (2000) 1479–1486.
- [3] D. Rouan, et al., *C. R. Physique* 8 (2007) 298.
- [4] B. Macintosh, et al., *C. R. Physique* 8 (2007) 365.
- [5] J.-L. Beuzit, et al., in: *Proceedings of the Conference in the Spirit of Bernard Lyot: The Direct Detection of Planets and Circumstellar Disks in the 21st Century*, 2007.
- [6] W.A. Traub, et al., *Proc. SPIE* 6268 (2006) 62680T.
- [7] A. Karlsson, L. d'Arcio, R. den Hartog, M. Fridlund, *Proc. SPIE* 6265 (2006) 62651O.
- [8] C. Aime (Ed.), *C. R. Physique* 8 (2007).
- [9] B. Lyot, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 99 (1939) 580.
- [10] F. Roddier, C. Roddier, *Publ. Astron. Soc. Pacific* 109 (1997) 815–820.
- [11] P. Riaud, A. Boccaletti, D. Rouan, F. Lemaquis, A. Labeyrie, *Publ. Astron. Soc. Pacific* 113 (2001) 1145.
- [12] J. Gay, Y. Rabbia, *C. R. Acad. Sci. Paris, Sér. IIB* 322 (1996) 265–271.
- [13] R.N. Bracewell, *Nature* 274 (1978) 780.
- [14] P. Perez, *Optique : Fondements et applications*, 7ème édition, 2004.
- [15] A. Carlotti, C. Aime, G. Ricort, *Astron. Astrophys.* (2007), sous presse.
- [16] E.E. Bloemhof, *Opt. Express* 13 (25) (2005) 10055–10060.
- [17] A. Ferrari, R. Soummer, C. Aime, *C. R. Physique* 8 (2007) 277.