

# Présentation d'un démonstrateur de synthèse d'ouverture utilisant des liaisons par fibres optiques

L. Delage<sup>(1)</sup>, F. Reynaud<sup>(1)</sup>, E. Thiébaud<sup>(2)</sup>, K. Bouyoucef<sup>(3)</sup>, P. Maréchal<sup>(3)</sup> et A. Lannes<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup>Équipe Optique IRCOM (UMR 6615)  
123, av. Albert Thomas, 87060 Limoges France

<sup>(2)</sup>Observatoire de Lyon, 9 av. Charles André,  
69551 Saint Genis Laval Cedex France

<sup>(3)</sup>Laboratoire d'Astrophysique de Toulouse, OMP et CERFACS  
14 av. Édouard Belin, F-31400 Toulouse France

## RÉSUMÉ

Nous présentons un ensemble complet d'acquisition et de traitement de données interférométriques. Le dispositif expérimental de synthèse d'ouverture, testé sur un objet de laboratoire, inclut des liaisons par fibres optiques permettant le transport cohérent des faisceaux. Ce dispositif a été utilisé pour une première évaluation de diverses méthodes de reconstruction d'image.

## ABSTRACT

We present an end-to-end acquisition and processing device for optical interferometric signals. The experimental aperture synthesis device, tested on a laboratory object, includes an optical fiber linkage for coherent beam propagation. This device was used for a preliminary evaluation of image reconstruction methods.

## 1 Introduction

Dans le domaine de l'astronomie, différents projets à haute résolution angulaire basés sur la synthèse d'ouverture sont en cours de réalisation. Cette technique, éprouvée en radioastronomie, consiste à collecter à l'aide d'un réseau de télescopes l'onde provenant d'un même objet. L'intercorrélation de ces champs optiques permet d'acquérir (par interférences) des informations sur la transformée de Fourier de la distribution d'intensité de l'objet.

La solution conventionnelle permettant le transport cohérent du flux lumineux collecté par les différents télescopes vers la station de mélange interférométrique consiste à utiliser des jeux de miroirs. Ce dispositif devient très complexe à gérer lorsque le nombre de télescopes devient important du fait de la grande stabilité demandée. L'utilisation des fibres optiques en silice dans ce domaine devient une alternative intéressante et permet de simplifier la structure des bras interférométriques [1]. Le travail présenté est une étude préliminaire entrant dans le cadre d'un projet de l'Agence Spatiale Européenne et d'un contrat Ultimatech. Elle consiste à réaliser la maquette d'un réseau de télescopes reliés par fibres optiques, le dispositif devant fournir des images à haute résolution.

L'expérience présentée dans cet article vise essentiellement à qualifier un ensemble complet d'acquisition et de traitement ne négligeant aucune source de perturbation expérimentale (dispersion, polarisation, métrologie). C'est la raison pour laquelle, dans une première étape, nous nous sommes limités

à un dispositif de 'phase pleine', autrement dit à une configuration interférométrique dont l'information de phase peut être calibrée par espacements redondants (Redundant Spacing Calibration). Les méthodes de reconstruction d'image se réduisent alors essentiellement à des procédures de synthèse de Fourier. Nous avons été ainsi conduits à effectuer une évaluation des principales méthodologies pouvant être utilisées à cette fin. Cette étude préliminaire était indispensable avant de s'affranchir des contraintes d'espacements redondants qui pénalisent la couverture fréquentielle.

## 2 Intérêt des fibres optiques pour l'interférométrie stellaire et ses applications

L'Agence Spatiale Européenne (ESA) finance un projet (Optical Aperture Synthesis Technologies) dont l'objectif final est la mise en orbite d'un réseau de douze télescopes couplés par fibres optiques avec des lignes de base d'une longueur maximale de l'ordre de 100 mètres. La flexibilité des fibres dans ce type de projet devient un atout majeur. Un premier contrat a permis de démontrer la possibilité d'effectuer le transport cohérent de la lumière des télescopes à la station de mélange interférométrique, à l'aide de fibres optiques dans la bande spectrale 600 à 800 nanomètres. Le prototype était composé d'un réseau de trois télescopes reliés par trois fibres optiques à maintien de polarisation d'une longueur de

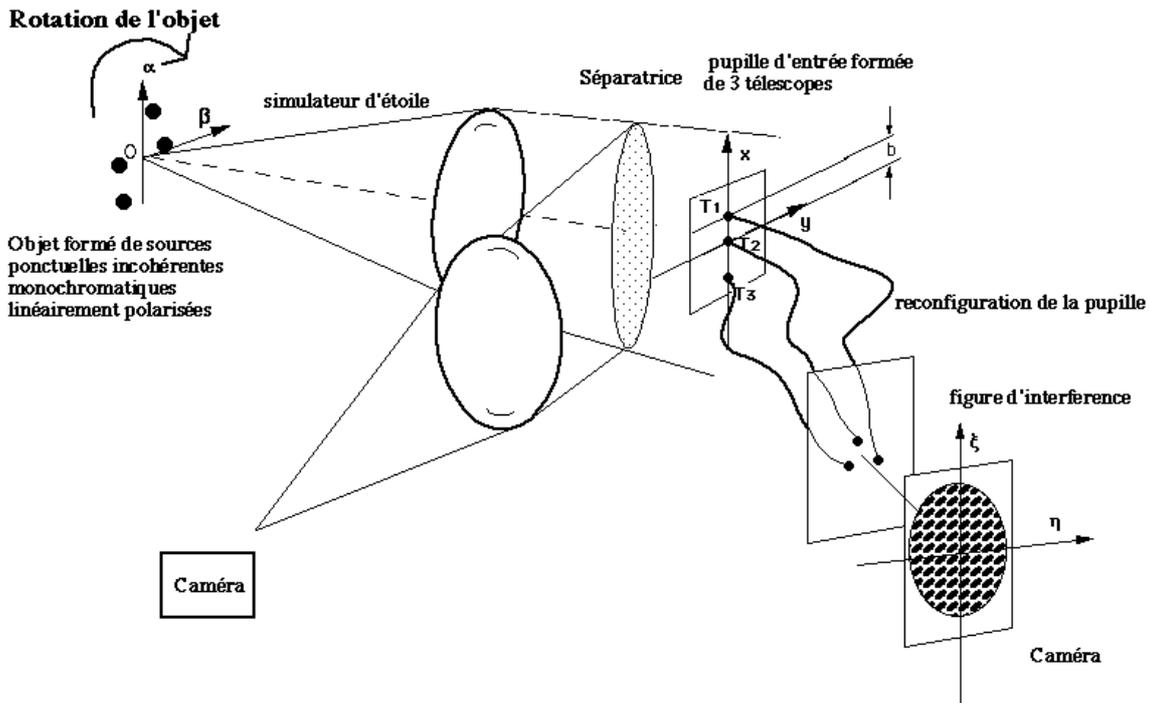


FIG. 1 — Dispositif expérimental.

25 mètres [2, 3]. Le but de cette étude était d'obtenir des systèmes de franges stables à fort contraste. Pour cela, un asservissement des longueurs optiques des fibres ainsi que la compensation différentielle des effets de dispersion chromatique et de biréfringence étaient nécessaires. La stabilité des longueurs des fibres optiques, maîtrisées avec une précision de trois nanomètres, et la correction des effets différentiels ont permis d'observer des franges avec un contraste de 65% à 85%.

Une autre application des fibres optiques dans ce domaine est la réalisation de modulations linéaires de chemins optiques asservies permettant une visualisation temporelle des franges. Cette technique est à la base d'un démonstrateur (Prototype Fringe Sensor Unit) pour le mode interférométrique du VLT, dont la fonction est de mesurer les déviations de la différence de marche nulle entre deux voies interférométriques générées par l'effet de 'piston' de la turbulence atmosphérique. La correction apportée va permettre de stabiliser les systèmes de franges et donc d'augmenter le temps d'intégration du détecteur.

Beaucoup d'aspects techniques sont donc maintenant maîtrisés. Devant les succès prometteurs des méthodes de transport cohérent des ondes, nous avons réalisé une étude dont le but est d'effectuer des reconstructions d'images bidimensionnelles à l'aide d'un réseau de trois télescopes reliés par fibres optiques.

### 3 Dispositif expérimental de synthèse d'ouverture

Le dispositif expérimental comprend essentiellement deux ensembles : l'un concernant la simulation de l'objet et l'autre celle du réseau de télescopes (cf. figure 1).

L'objet à deux dimensions doit nécessairement être de petite dimension ( $< 500$  micromètres) et posséder une structure spatialement incohérente. Il est réalisé en utilisant des fibres optiques unimodales, collées côte à côte, alimentées par différentes sources. La distribution d'intensité de l'objet est réglée à l'aide de l'injection de lumière dans les fibres. La stabilité en intensité est nécessaire sur toute la durée de l'expérience. Pour limiter les difficultés expérimentales, maîtrisées dans une étude précédente, les sources ponctuelles ainsi créées sont monochromatiques et linéairement polarisées.

Cet objet illumine un réseau de télescopes formés de trois lentilles à gradient d'indice de 1.8 millimètres de diamètre. Le flux lumineux ainsi collecté est couplé à trois fibres à maintien de polarisation de longueur géométrique identique. Les axes neutres des guides optiques ont été alignés à chaque extrémité des fibres. Les ouvertures sont placées le long d'une direction d'analyse ( $x$ ). Deux des télescopes T1 et T2 restent fixes et sont séparés par une distance  $b$  de 3 mm : la (ligne de) base de référence. Le troisième T3 peut se translater le long de la direction ( $x$ ) par décalages successifs égaux à un nombre entier de fois la base de référence. L'utilisation des fibres optiques nous permet de modifier la configuration géométrique du réseau de télescopes, unidimensionnelle et redondante, en une pupille de sortie à deux dimensions non redondante.

La figure de diffraction spatiale ainsi obtenue en sortie correspond à la superposition (en intensité) de trois systèmes de franges, de pas et de directions différents. La mesure de la fonction de visibilité des franges (contraste et position) permet d'obtenir des informations sur le module et la phase de la transformée de Fourier de la distribution angulaire d'intensité de l'objet, aux différentes fréquences spatiales échantillonnées. Pour une mesure correcte du module du spectre de l'objet, il est nécessaire d'étalonner la visibilité instrumentale

des franges et de connaître les différentes intensités collectées par les ouvertures. Relativement au type d'objet considéré, la petite ligne de base de référence permet de calibrer l'information de phase, à ceci près que cet objet ne peut être par là même restauré qu'à une translation près. L'échantillonnage du plan des fréquences spatiales est radial, suivant 6 directions d'analyse espacées d'un angle de 30 degrés. Pour chacune de ces directions nous avons effectué 9 mesures du module et de la phase du spectre de l'objet. Pour contrôler les processus de reconstruction d'image effectués en aveugle, l'image susceptible d'être reconstruite est directement accessible sur une caméra CCD (cf. figure 2).

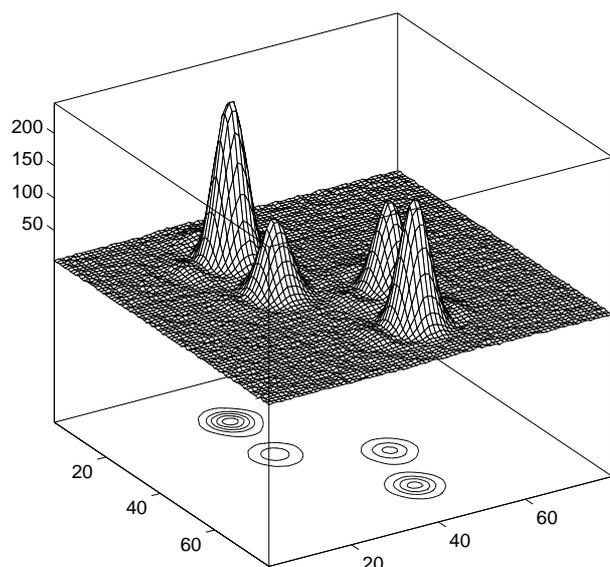


FIG. 2 — L'image représentée ici, qui est obtenue par la caméra CCD de gauche dans la figure 1, définit l'objectif du processus de reconstruction.

#### 4 Validation de différentes méthodologies de synthèse de Fourier

Les données interférométriques ne permettent naturellement pas de restaurer l'objet dans son intégralité. Présenté en ces termes, il s'agirait d'un problème inverse mal posé. Il est maintenant bien établi que l'opération de synthèse de Fourier, qui est au cœur même des problématiques de synthèse d'ouverture, nécessite l'emploi de techniques de régularisation appropriées. Une récente étude comparative des performances de ces techniques [4] a montré que Wipe [5, 6], une méthodologie apparentée à Clean pour certains de ses aspects [7], s'impose globalement sur les techniques classiques d'entropie, étant bien entendu que l'introduction dans ces dernières d'un 'modèle flottant' [8] va à l'encontre de ses principes fondateurs (voir dans ce contexte la variante 'GCEb' présentée au paragraphe 6 de [4]). Tout semble donc indiquer que l'approche retenue dans Wipe, qui associe un processus de poursuite [7] à un principe de régularisation fondé sur le concept de résolution, est la plus à même de faire la part entre l'a priori et l'information expérimentale. Elle permet par ailleurs de bien

contrôler la stabilité de l'image ainsi obtenue. Ce qui se dégageait des simulations numériques s'est trouvé confirmé par le traitement de nos données, qui étaient fortement entachées d'erreurs (figures 2,3 et 4).

Le principe de régularisation de Wipe résulte de considérations élémentaires d'analyse harmonique [5]. L'image reconstruite est définie comme une fonction positive  $\phi_r(\mathbf{x})$  minimisant un certain critère hybride  $c(\phi)$ , dans lequel les données de Fourier, d'une part, et les notions de champ et de résolution, d'autre part, jouent un rôle clé.

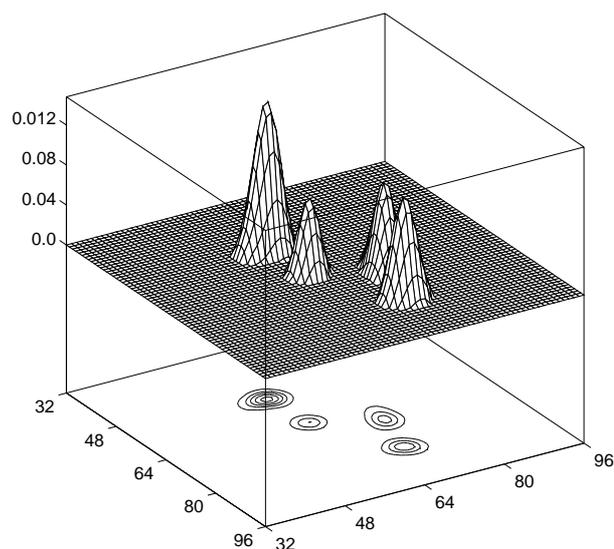


FIG. 3 — Reconstruction par Wipe.

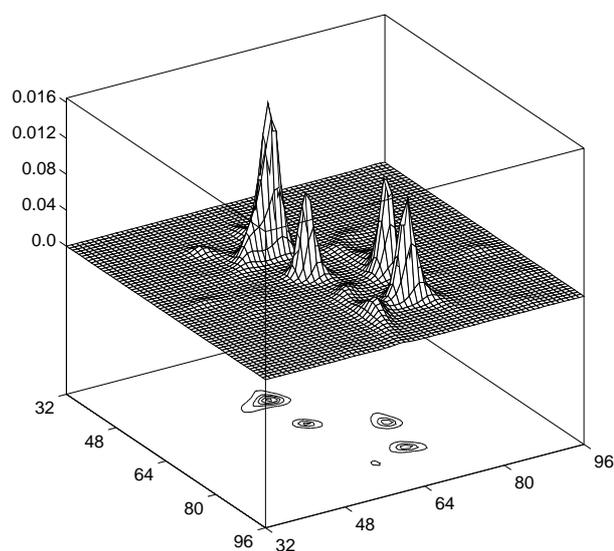


FIG. 4 — Reconstruction par la méthode du maximum d'entropie.

Plus précisément, en désignant par  $\psi(\mathbf{u}) \triangleq \widehat{s}(\mathbf{u})\psi_e(\mathbf{u})$  les données de Fourier amorties par la transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle synthétique (relative au niveau de résolution considéré ; voir plus loin), ce critère est de la forme

$$c = c_e + c_r$$

où

$$c_e(\phi) \triangleq \sum_{\mathbf{u} \in \mathcal{L}_e} |\psi(\mathbf{u}) - \widehat{\phi}(\mathbf{u})|^2 K(\mathbf{u})$$

et

$$c_r(\phi) \triangleq \sum_{\mathbf{u} \in \mathcal{L}_r} |\widehat{\phi}(\mathbf{u})|^2 K(\mathbf{u});$$

$K$  est ici une fonction poids appropriée (cf. [4]). Le critère expérimental  $c_e$  contraint le modèle  $\phi$  à être compatible avec les données sur la liste fréquentielle  $\mathcal{L}_e$ , alors que le critère  $c_r$  limite la résolution du processus de reconstruction via la liste fréquentielle de régularisation  $\mathcal{L}_r$ . En effet, cette dernière définit une couverture fréquentielle virtuelle au delà de la couverture fréquentielle à synthétiser  $\mathcal{H}_s$ , jusqu'à la fréquence de coupure des fonctions splines-cubiques engendrant l'espace de travail objet  $E_0$ . La fonction  $\widehat{s}(\mathbf{u})$  n'est autre que la transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle synthétique  $s(\mathbf{x})$ , dont la définition dépend du choix de  $\mathcal{H}_s$ .

Le domaine de la fonctionnelle objectif  $c$  est l'espace de représentation objet  $E$ . En synthèse de Fourier mono-résolution, ce sous-espace de  $E_0$  est simplement défini par le choix d'une région objet  $\mathcal{D}$  dans laquelle  $\phi$  est confiné. Cet espace se construit de façon progressive dans un processus de poursuite adaptative [7].

Wipe peut être également utilisé sans son processus de poursuite en imposant la contrainte de non-négativité sur l'ensemble du champ de l'espace de travail objet  $E_0$ . On obtient alors des résultats semblables à ceux fournis par la méthode du maximum d'entropie classique (figure 4). Cela dit, Wipe révèle alors que l'ajustement aux données est trop serré, ce qui n'est pas satisfaisant : le support de l'image reconstruite est trop grand.

## Références

- [1] C. Froehly. Coherence and interferometry through optical fiber, *Proc. ESO Conf., High Angular Resolution*, Eds. Ulrich and Kjr, 1981, 285.
- [2] J.-J. Alleman, F. Reynaud and P. Connes. Fiber-linked telescope array : description and laboratory tests of a two channel prototype, *Appl. Opt.*, **34**, 1995, 2284–2294.
- [3] H. Lagorceix. Application des fibres optiques unimodales à l'interférométrie stellaire, *Thèse de l'université de Limoges*, 1995.
- [4] P. Maréchal and A. Lannes. Unification of some deterministic and probabilistic methods for the solution of linear inverse problems via the principle of maximum entropy on the mean, *Inverse Problems*, 1996.
- [5] A. Lannes, E. Anterrieu and K. Bouyoucef, 'Fourier Interpolation and Reconstruction via Shannon-type Techniques ; Part I : Regularization principle,' *J. Mod. Optics*, **41**, 1994, 1537–1574.
- [6] A. Lannes, E. Anterrieu and K. Bouyoucef, 'Fourier Interpolation and Reconstruction via Shannon-type Techniques ; Part II : Technical developments and applications,' *J. Mod. Optics*, **43**, 1996, 105–138.
- [7] A. Lannes, E. Anterrieu and P. Maréchal. Clean and Wipe, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1997.
- [8] K. Horne. Images of accretion discs – I. The eclipse mapping method, *MNRAS*, **213**, 1985, 129–141.