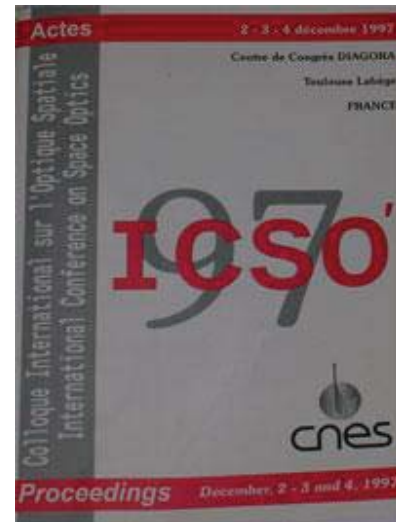


# International Conference on Space Optics—ICSO 1997

Toulouse, France

2–4 December 1997

*Edited by George Otrio*



*Utilisation des fibres optiques dans un interféromètre stellaire: démonstration en laboratoire des possibilités d'imagerie, étude et conception de lignes à retard métrique*

*L. Delage, L. M. Simohamed, F. Reynaud*



icso proceedings



International Conference on Space Optics — ICSO 1997, edited by Georges Otrio, Proc. of SPIE Vol. 10570, 1057024 · © 1997 ESA and CNES · CCC code: 0277-786X/18/\$18 · doi: 10.1117/12.2326630

UTILISATION DES FIBRES OPTIQUES DANS UN INTERFEROMETRE  
STELLAIRE: DEMONSTRATION EN LABORATOIRE DES POSSIBILITES  
D'IMAGERIE. ETUDE ET CONCEPTION DE LIGNES A RETARD METRIQUE.

L. DELAGE, L. M. SIMOHAMED, F. REYNAUD  
*Equipe optique, IRCOM, 123 Ave. Albert Thomas 87060 Limoges.*  
*Email : Reynaud@ircom.unilim.fr*  
UMR 6615

**Résumé :**

Dans le cadre d'une étude globale sur la réalisation d'un instrument interférométrique à fibre optique en silice destinée à l'imagerie à haute résolution, nous présentons des travaux concernant d'une part la faisabilité d'un dispositif de synthèse d'ouverture et d'autre part la réalisation d'une ligne à retard à fibres optiques avec une course de l'ordre du mètre.

Ces deux études démontrent, en particulier, l'importance de la maîtrise de l'état de la polarisation du champ au cours de sa propagation dans la fibre. Des résultats sur la caractérisation du générateur de délais optique à fibres sont présentés ainsi qu'une reconstruction d'image réalisée à l'aide de l'algorithme de restauration Wipe.

**Abstract**

*In the frame of an all silica fibre stellar interferometer breadboarding, we report experimental work focused on image reconstruction using experimental data and the implementation and characterisation of an optical fibre delay line with a metric stroke.*

*In particular, this two studies emphasise the necessity to control the polarisation status of the optical field over its propagation in the fibre arms. The characterisation of the optical fibre delay line and an image reconstruction using WIPE restoration algorithm, are presented.*

**1 INTRODUCTION : CONTEXTE DE L'ETUDE SUR L'UTILISATION DES FIBRES OPTIQUES DANS LE DOMAINE DE L'INTERFEROMETRIE STELLAIRE.**

Dans le domaine de l'astronomie, différents projets à haute résolution angulaire basés sur la synthèse d'ouverture sont en cours de réalisation [Bald 96]. 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 le spectre de la distribution d'intensité de l'objet.

La solution conventionnelle pour permettre le transport cohérent du flux lumineux collecté par les différents télescopes à la station de mélange interférométrique consiste à utiliser des jeux de miroirs. Ces dispositifs sont très complexes à gérer et coûteux lorsque le nombre de télescopes devient important du fait de la grande stabilité demandée. L'utilisation des fibres optiques en silice dans ce domaine est une alternative intéressante et permet de simplifier la structure des bras interférométriques [Froe 81]. Leur flexibilité est un atout majeur dans les projets spatiaux d'interférométrie stellaire.

Dans ce type d'interféromètre où le flux lumineux est très faible, le but est d'obtenir des franges d'interférence fortement contrastées et stables. Les défauts instrumentaux doivent être constants afin de pouvoir étalonner la fonction de visibilité instrumentale de l'interféromètre de manière permanente. Pour cela, plusieurs études ont été menées pour compenser les défauts des fibres optiques dans ce contexte [Reyn 92, Alle 95]. Elles se sont poursuivies dans le cadre d'un contrat avec l'Agence Spatiale Européenne, pour 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 900 nanomètres. Un prototype composé d'un réseau de trois télescopes couplés à trois fibres optiques à maintien de polarisation d'une longueur de 25 mètres [Lago 95] a été conçu. L'objectif était d'obtenir des systèmes de franges stables à fort contraste avec une source ponctuelle. Un asservissement des longueurs optiques des fibres ainsi que la compensation de effets différentiels de dispersion chromatique et de biréfringence était nécessaire. La stabilité des longueurs des fibres optiques, maîtrisée avec une précision de trois nanomètres, et la correction des effets différentiels ont permis d'observer des franges avec des contrastes variant entre 65 et 85%. Devant le succès prometteurs de ces travaux, nous avons débuté deux autres études expérimentales concernant

- la possibilité de générer des retards optiques de l'ordre du mètre par étirement mécanique de la fibre optique en silice.

- l'aptitude des fibres dans un dispositif imageur de synthèse d'ouverture à effectuer des reconstructions d'images.

Dans la première partie de l'article, nous présentons les résultats expérimentaux relatifs à la ligne à retard à fibres optiques en mettant en évidence la maîtrise de la polarisation, condition indispensable pour l'obtention de signaux interférométriques à contraste élevé.

Dans une seconde partie, un résultat préliminaire de reconstruction d'image utilisant l'algorithme de restauration Wipe [Lann 97] est présenté. L'expérience comprend un ensemble complet d'acquisition et de traitement de données interférométriques testé sur un objet de laboratoire. L'étude expérimentale de synthèse d'ouverture décrite, inclue des fibres optiques à maintien de polarisation pour permettre le transport cohérent et la recombinaison des flux lumineux collectés par un réseau de trois télescopes.

## 2 LE GÉNÉRATEUR DE RETARDS POUR INTERFEROMETRE FIBRE :

Les lignes à retard sont des dispositifs servant à la compensation des différences de chemins optiques entre l'objet observé et la station de mélange interférométriques. Elles sont réalisées de façon classique à partir de trains de miroirs mobiles. Les nombreuses contraintes liées aux applications de l'interférométrie stellaire conduisent à des dispositifs complexes coûteux et encombrants [Fauc 91, Boot 91]. Partant du fait qu'il est possible de moduler un chemin optique en étirant mécaniquement la fibre [Kers 85], nous développons une solution originale proposant le remplacement de ces dispositifs classiques par des lignes à retard constituées de fibres optiques. Les premières investigations pour la réalisation d'une ligne à retard à fibres optiques ont été effectuées avec des fibres unimodales standards à 1.3µm, pour des raisons de coûts et pour faciliter l'étude en travaillant dans une zone où la fibre est peu dispersive [Simo 96]. Elles ont démontré qu'il était possible d'obtenir des courses supérieures à 2 mètres en étirant des guides optiques d'une

longueur de 100 mètres [Simo 97]. Les principaux problèmes constatés résultent des modifications des caractéristiques de dispersion et de biréfringence des fibres standards induites par la contrainte mécanique ainsi que de phénomène de couplages entre les différents modes de polarisation se propageant dans le guide. Le remplacement des fibres standards par des fibres à maintien de polarisation a permis la maîtrise de la polarisation tout le long du processus d'étirement et par conséquent de découpler les effets de dispersion et de biréfringence. Les contrastes de franges, qui pour le cas des fibres standard étaient faibles avec une variation entre 10 et 25%, ont été améliorés de façon significative avec une variation entre 70 et 95%.

Nous décrivons en premier lieu le dispositif expérimental ayant servi à tester la ligne à retard, dans un deuxième temps nous présentons les principaux résultats expérimentaux consistants en :

- L'enregistrement d'interférogrammes à divers états d'étirements.
- Le calcul des contrastes.
- La mesure du chemin optique engendré par l'étirement.
- L'évaluation des pertes.
- L'évaluation du taux de réjection entre les deux modes propres de polarisation.

**Dispositif expérimental :**

Le dispositif expérimental est une version fibrée d'un interféromètre de Mach-Zehnder (figure 1) utilisant des fibres à maintien de polarisation unimodale à la longueur d'onde de  $1.3 \mu\text{m}$ . Une détermination des axes principaux est effectuée et les fibres sont disposées de façon à ce que leurs axes lents soient alignés. La source est une diode Laser alimentée en dessous du courant de seuil dont la longueur d'onde moyenne d'émission est  $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$  et la largeur spectrale  $\Delta\lambda = 40 \text{ nm}$  à mi-hauteur.

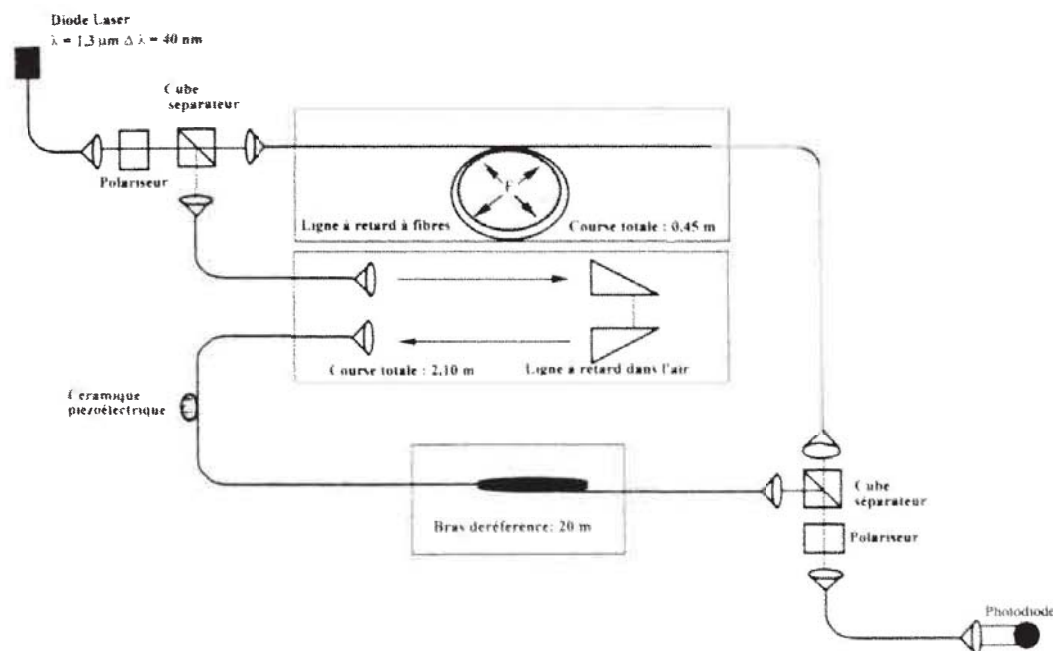


Figure 1 : Dispositif expérimental

La division d'amplitude à l'entrée de l'interféromètre et la recombinaison du flux à la sortie sont assurées par deux cubes séparateurs. Le flux lumineux est polarisé rectilignement à l'entrée de l'interféromètre. Il est injecté suivant l'axe lent des fibres.

Le premier bras interférométrique comprend la ligne à retard optique avec une longueur de fibre de 20m dont 18 sont enroulés autour d'une couronne en caoutchouc. Un dispositif hydraulique commande l'expansion radiale de la couronne en caoutchouc et provoque ainsi un étirement uniforme de la fibre. Le second bras interférométrique se compose de la fibre de référence d'une longueur de 20 mètres ainsi que d'une ligne à retard dans l'air. A la sortie de l'interféromètre, un second cube polariseur sélectionne le flux émergent des axes lents des fibres. La détection est assurée par une photodiode en InGaAs.

**Résultats expérimentaux:**

La largeur spectrale de l'émission ne permet la visualisation de franges d'interférences bien contrastées que pour une égalisation précise des temps de groupe des ondes transitant par les deux voies interférométriques. Cette égalisation est obtenue grâce à la ligne à retard dans l'air et peut être localisée en repérant le maximum de la courbe de visibilité des franges. La pression appliquée à la couronne en caoutchouc est augmentée par paliers de 0.5 bar sur une plage de variation allant de 0 à 6.5 bar. A chaque palier, les franges sont enregistrées et un calcul de contraste est effectué. De plus, nous mesurons le chemin d'air compensé, les pertes induites, et le taux de diaphonie entre les deux modes propres de polarisation. La figure 2 montre un interférogramme enregistré pour une pression appliquée de quatre bar.

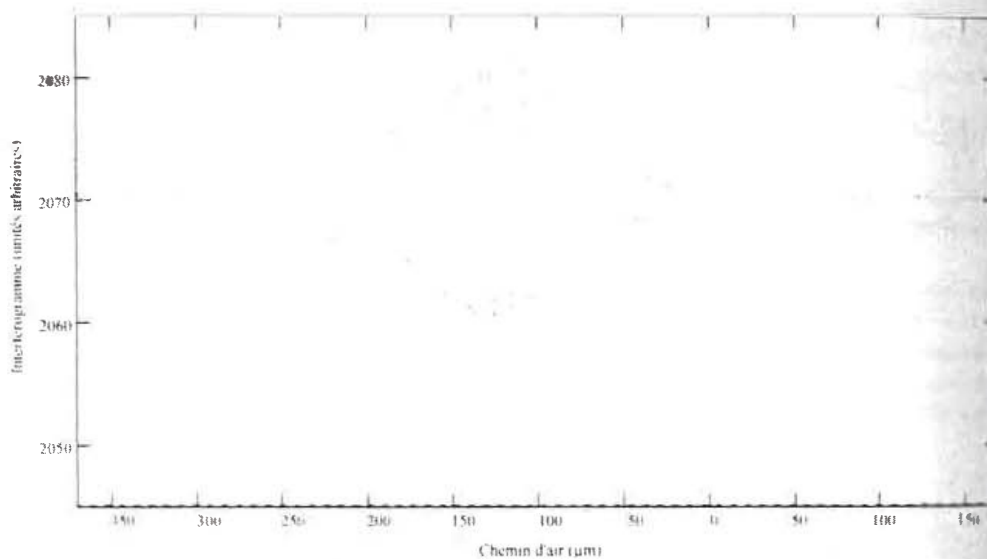


Figure 2 : interférogramme enregistré à une pression de 4 bar.

La figure 3 représente la variation de longueur du chemin d'air dans la ligne à retard non fibre en fonction de la pression. Cette variation est linéaire et correspond à la compensation d'un chemin d'air maximal de 45 cm ce qui correspond à une variation relative de 2,5 % de la longueur de la fibre étirée. Ce résultat est en accord avec ceux déjà obtenus avec les fibres standards et permet d'envisager des courses du même ordre de grandeur (2m) pour une fibre de 100 m.

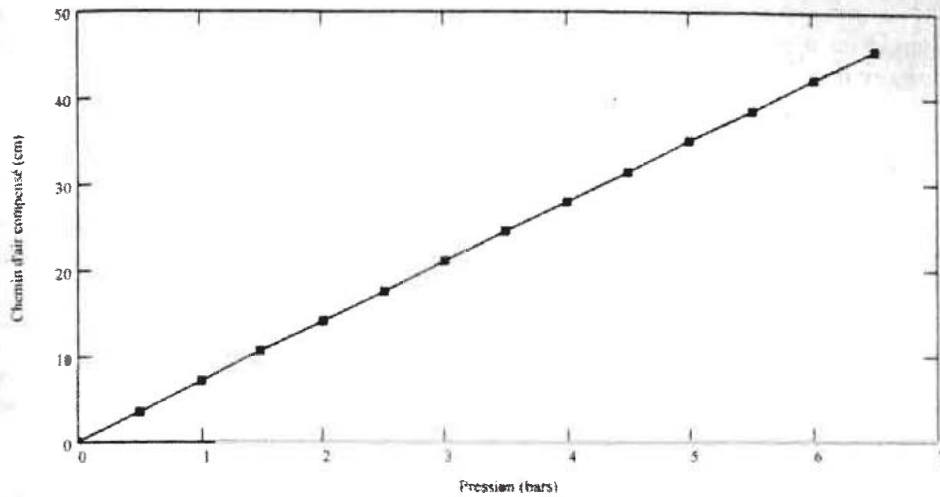


Figure 3 : Chemin d'air modulé en fonction de la pression.

Le taux de réjection caractérisant la diaphonie entre modes de polarisation de la fibre n'est pas affecté par l'étirement et il reste toujours inférieur à 1/200. Les contrastes mesurés sont élevés avec un maximum égal à 95% relevé entre 4.5 et 5 bar (figure 4). La nette amélioration des contrastes par rapport à une expérience utilisant une fibre standard montre l'obligation du contrôle de l'état de la polarisation des ondes tout le long du processus d'étirement et l'effet limité de la variation de dispersion des guides dans ce domaine de longueur d'ondes. Les pertes induites, évaluées à partir de l'évolution du coefficient de transmission, ne sont pas mesurables. Elles sont inférieures aux fluctuations du bruit de détection égales typiquement à 1%(figure 4).

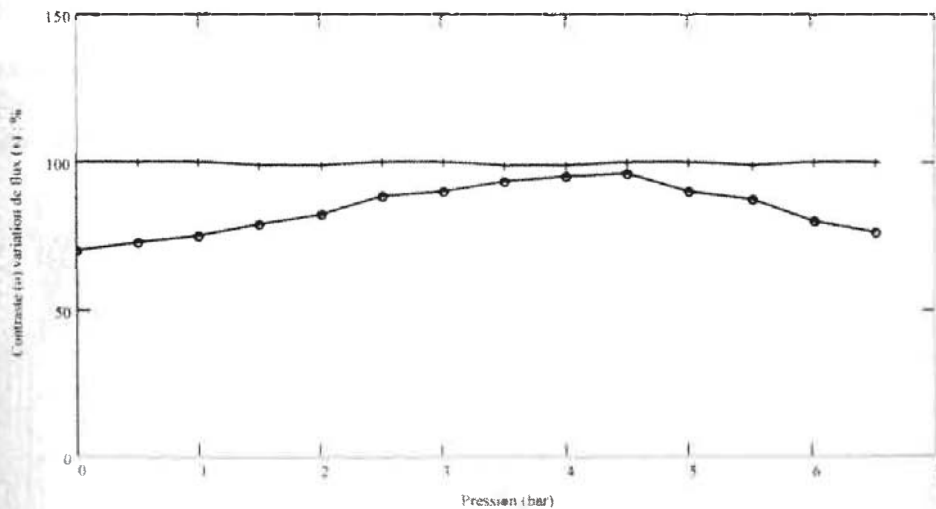


Figure 4 : Contraste (o) et coefficient de transmissions (+) en fonction de la pression.

Les perspectives futures vont consister à étudier les effets de dispersion différentielle au cours de l'allongement de la fibre. L'analyse détaillée se fera grâce à la méthode du spectre cannelé [Reyn

92] en utilisant la bande spectrale [600nm:900nm] avec des fibres à maintien de polarisation unimodales à 600nm. Cette étude sera d'autant plus démonstrative que dans ce domaine de longueur d'ondes les effets dispersifs sont très importants.

### 3 DISPOSITIF EXPERIMENTAL DE SYNTHÈSE D'OUVERTURE :

L'étude expérimentale décrite ici est une étape intermédiaire de développement d'un dispositif de synthèse d'ouverture imageur utilisant des fibres optiques pour le transport et la recombinaison des champs lumineux. Pour permettre le contrôle de l'interféromètre et montrer la possibilité d'utiliser des fibres optiques dans ce type d'instrument, nous utilisons une méthode robuste d'acquisition des données du spectre de Fourier de la distribution d'intensité de l'objet [Dela 97]. Cette méthode d'acquisition n'est pas optimisée en terme de temps d'observation et de nombre de configurations pupillaires du fait de l'aspect redondant des informations nécessaires à l'acquisition des données.

#### Description du dispositif

Le dispositif expérimental (figure 5) est composé de deux sous-ensembles. Le premier constitue l'objet spatialement incohérent possédant une distribution d'intensité ajustable. Cela nous permet de ne pas nous restreindre à des objets ayant une distribution d'intensité binaire. Le second comprend un réseau de trois lentilles couplé à des fibres optiques à maintien de polarisation.

#### Rotation de l'objet

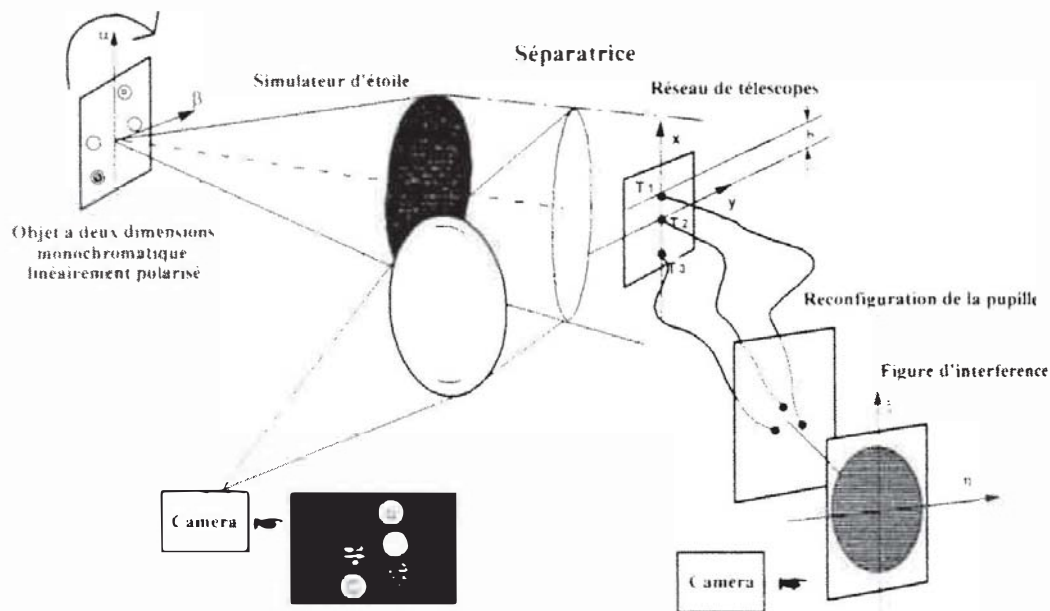


Figure 5 Dispositif expérimental de synthèse d'ouverture

Pour satisfaire aux conditions d'incohérence spatiale, l'objet de laboratoire est réalisé en utilisant des fibres optiques unimodales, collées côte à côte, alimentées par différents lasers He Ne incohérents émettant à une longueur d'onde moyenne de 633nm. La distribution d'intensité de l'objet, stable tout le long de l'expérience, est contrôlée de manière précise en intervenant sur les conditions d'injection de la lumière dans les fibres.

Afin de simplifier la mise en œuvre expérimentale de l'interféromètre, les sources monochromatiques ponctuelles ainsi créées émettent un champ linéairement polarisé. Ce choix ne constitue pas une limitation du dispositif expérimental, dès lors que les fonctions de compensation des effets de dispersion et de birefringence ainsi que les méthodes d'asservissements des chemins optiques, maîtrisées par ailleurs [Reyn 92; Alle 95; Lago 95], peuvent être intégrées à un instrument final.

Cet objet illumine le réseau de télescopes simulé par trois lentilles à gradient d'indice de 1,8 millimètres de diamètre. Le flux lumineux collecté par les trois ouvertures est couplé à trois fibres à maintien de polarisation de longueurs géométriques identiques. Les axes neutres des guides birefringents sont alignés à chaque extrémité des fibres. Cette précaution garantit l'unicité du chemin optique dans chaque bras interférométrique et permet de déterminer la phase relative des champs se propageant dans les fibres [Dela 97].

Les lentilles sont disposées le long d'une direction d'analyse parallèle au vecteur unitaire  $\hat{x}$ . Les télescopes  $T_1$  et  $T_2$  restent fixes et sont séparés par une distance " $b=3\text{mm}$ " appelée base de référence. La fréquence spatiale  $\frac{b}{\lambda} N$  ainsi échantillonnée à l'aide de cette base, ne peut pas résoudre l'objet (module=1, phase=0). Le troisième télescope  $T_3$  est déplacé le long de la direction  $(x)$  par pas successifs égaux à la base de référence. L'utilisation des fibres optiques nous permet de modifier la configuration géométrique unidimensionnelle et redondante du réseau de télescopes, en une pupille de sortie à deux dimensions non redondante.

#### Exploitation des interférogrammes :

La figure de diffraction (fig. 6a) obtenue à la sortie de l'interféromètre est la superposition en intensité de trois systèmes de franges de périodicités et de directions différentes. La mesure de la fonction de visibilité des franges (contraste et position) permet d'obtenir le module et la phase de la transformée de Fourier de la distribution angulaire d'intensité de l'objet aux différentes fréquences spatiales  $\frac{b}{\lambda} N$  (avec  $N \in \mathbb{N}$ ) échantillonnées à l'aide du réseau de télescopes. Cette mesure est effectuée à partir de la transformée de Fourier des enregistrements de la figure de diffraction (fig. 6b).

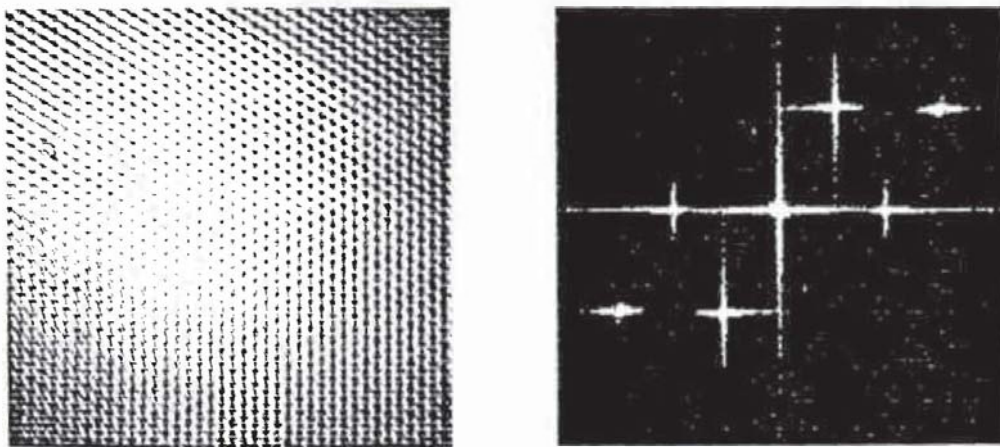


Figure 6 - Figure de diffraction (gauche 6a) et sa transformée de Fourier (droite 6b)

La mesure du module du spectre de l'objet nécessite l'étalonnage de la visibilité instrumentale des franges et la mesure des différentes intensités collectées par les ouvertures  $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$ . Les défauts



de phase introduits par la turbulence atmosphérique et les instabilités interférométriques sont annulés par la technique de clôture de phase [Roggs 1968 ; Gree 82]. L'analyse redondante des fréquences spatiales de l'objet permet d'obtenir pas à pas la phase du spectre de l'objet. On suppose que pour la base de référence, la phase du spectre de Fourier de la distribution d'intensité de l'objet est nulle. Cette dernière condition ne modifie pas la morphologie de l'objet reconstruit, mais ajuste le centre de gravité de la distribution d'intensité de l'objet à l'origine du repère des coordonnées de l'espace objet.

La restauration de l'image, nécessite une analyse suivant plusieurs directions afin d'obtenir une couverture du plan des fréquences spatiales de l'objet suffisante (méthode équivalente à la tomographie en imagerie médicale [Barr 81]). Pour simplifier l'expérience, nous avons réalisé une rotation de l'objet. L'échantillonnage du plan des fréquences spatiales est radial suivant 6 directions d'analyse espacées d'un angle de 30 degrés. Neuf mesures de module et de phase du spectre de l'objet sont effectuées par direction. Pour valider les processus de reconstruction d'image, un enregistrement direct de l'objet susceptible d'être reconstruit est effectué à l'aide d'une caméra CCD. La résolution de cette image est équivalente à celle obtenue avec la plus grande base utilisée dans le dispositif de synthèse d'ouverture.

### Reconstruction de l'image

Les données interférométriques ne permettent pas de restaurer dans son intégralité l'objet non seulement à cause du bruit, mais aussi du fait de l'échantillonnage lacunaire du spectre de l'objet. Présenté en ces termes, il s'agit d'un problème inverse mal posé qui nécessite l'emploi de techniques de régularisation appropriées. Nous présentons sur la figure 7b un exemple de reconstruction d'image à l'aide de l'algorithme Wipe [Lann 97] comparativement à l'image accessible à la mesure directement enregistrée (fig. 7a).

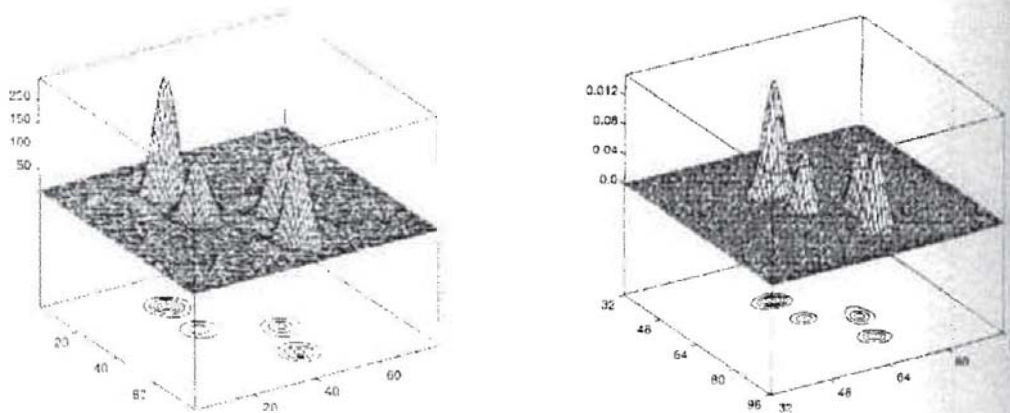


Figure 7 : Objet accessible à la mesure (gauche 7a) ; image reconstruite (droite 7b)

#### 4 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.

Ces études préliminaires démontrent les possibilités offertes par l'utilisation des fibres optiques dans le domaine de l'interférométrie stellaire.

Des retards importants peuvent être générés par étirement mécanique de fibres optiques. Une course reproductible de deux mètres a été obtenue avec des fibres de type standards et nous pouvons envisager des courses analogues avec des fibres hautement biréfringentes. L'emploi de fibres à maintien de polarisation a permis de découpler les effets de biréfringence et de dispersion. Les contrastes mesurés sont élevés et varient de 70 à 95%. Les pertes induites ne sont pas mesurables expérimentalement. Le taux de couplage entre les modes propres de polarisation n'est pas affecté par l'étirement.

La maîtrise du transport cohérent du flux lumineux dans des fibres à maintien de polarisation permet de réaliser la mesure et l'étalonnage de la fonction de visibilité instrumentale de l'interféromètre (module et phase). Une reconstruction précise d'un objet à deux dimensions dont la distribution d'intensité était quelconque a pu ainsi être réalisée.

Les futurs développements entamés dans le cadre d'un contrat avec l'Agence Spatiale Européenne ont pour objectif de réaliser un démonstrateur imageur basé sur la synthèse d'ouverture comprenant 4 réseaux de trois télescopes indépendants. L'association des différentes études effectuées à l'IRCOM (imagerie et contrôle du transport cohérent de la lumière) nous ont conduit à concevoir un interféromètre à trois bras entraînant une analyse temporelle des franges d'interférences. Ce type d'interféromètre concilie la possibilité d'utiliser des techniques d'asservissement des chemins optiques maîtrisées et de transposer temporellement l'acquisition des données du spectre de Fourier de la distribution d'intensité de l'objet à reconstruire. Dans ce cas, l'utilisation de détecteurs monopixels simplifie la mise en oeuvre du dispositif expérimental et le traitement des données interférométriques. Le développement du démonstrateur se focalisera principalement sur deux points :

- une technique d'asservissement de la modulation linéaire de chemin optique d'une fibre [Dela 93] doit être réalisée. Cette technique est également utilisée dans le démonstrateur de détection et compensation de l'effet piston de la turbulence atmosphérique (PFSU) réalisé conjointement par l'IRCOM et l'Observatoire de la Côte d'Azur dans le cadre d'un contrat ESO [Rabb 96].

- Une optimisation de la méthode d'acquisition redondante des données du spectre de Fourier de l'objet par une nouvelle configuration des pupilles proposée par A. Lannes (Contrat ESA, Optical Aperture Synthesis Technologies 2) est prévue pour diminuer le temps d'observation de l'objet.

D'autre part, nous envisageons dans le cadre d'un contrat Ultimatech, de remplacer les systèmes de recombinaison classique jusqu'alors utilisés dans nos interféromètres par des coupleurs d'optique planaire. L'intérêt est de résoudre le problème d'alignement et de recouvrement des faisceaux rencontré lors de leur recombinaison. L'instrument à caractériser comprendra deux voies interférométriques, avec une ligne à retard à fibre par voie et un recombineur en optique planaire.

REFERENCES :

- [Alle 95] J.J. Alleman, F. Reynaud, P. Connes, "Fiber-linked telescope array: description and laboratory tests of a two-channel prototype". *Applied Optics*, Vol. 34, N° 13, 2284-2294, 1995.
- [Bald 96] J. E. Baldwin et al., "The first images from an optical aperture synthesis array - mapping of Capella with COAST at two epochs". *A & A*, 306, L13-L16, 1996
- [Barr 81] H. H. Barrett and W. Swindell, "Radiological Imaging: Theory and image formation". *Detection and Processing*, Academic, New York, Vols. 1 and 2, 1981
- [Boot 91] A.J. Boot, Y.A. Gillian, J. Davis, W.J.Tango, S.M.Owens and N.Bown, "SUSI's path compensator system" *Proceedings of the ESO Conference "High Resolution imaging by interferometry II"*, Ed Merkle and Beckers, 1127, 1991.
- [Dela 93] E. Delaire, F. Reynaud, "Linear optical path modulation with  $\lambda/200$  accuracy using a fibre stretcher". *Elec. Lett.*, Vol. 29, N° 19, 1718-1719, 1993.
- [Dela 97] L. Delage, F. Reynaud, "Analysis and control of polarisation effects on image acquisition in a fibre linked three telescopes stellar interferometer", submitted for publication in *Opt. Com.*, 1997.
- [Dela 97] L. Delage, F. Reynaud and E. Thiébaud, "Regularized image restoration from fiber optics interferometer", submitted for publication in *A&A*, 1997
- [Fauc 91] M. Faucherre, "Method for optical pathlength compensation". *Proceedings ESO Conference "High Resolution imaging by interferometry II"* Ed Merkle and Beckers, 1179, 1991.
- [Froe 81] C. Froehly, "Coherence and interferometry through optical fiber". *Proceedings ESO Conference "High Angular Resolution"*, Eds. Ulrich and Kjör, 285, 1981.
- [Kers 85] A.D.Kersey, A Dandridge, B Tventen and T.G. Giallorenzi, *Electron Letter*, Vol 21, 463, 1985.
- [Gree 82] A. H. Greenaway, "Diffraction-limited pictures from single turbulence-degraded images in astronomy". *Opt. Com.*, Vol. 42 No. 3, p. 157-161, 1982.
- [Lago 95] H. Lagoreeix, "Application des fibres optiques unimodales a l'interférométrie stellaire". These, Université de Limoges, 1995
- [Lann 97] A. Lannes, E. Anterrieu and P. Marechal, "clean and wipe" *A&A Suppl. Ser.*, 1997
- [Rabb 96] Y. Rabbia, S. Ménardi, F. Reynaud, L. Delage, "The ESO-VLT Fringe Sensor". *Proceedings of the Conf. Astr096 Integrated optics for astronomical interferometry*, p. 175, 1996.
- [Rash 83] S.C. Rashleigh, "origins and control of polarization effects in single-mode fibers". *Journal of Lightwave Technology*, Vol. LT-1, n 2 p 312, 1983
- [Reyn 92] F. Reynaud, J.J. Alleman, P. Connes, "Interferometric control of fiber lengths for a coherent telescope array". *Applied Optics*, Vol. 31, N° 19, 3736-3743, 1992
- [Rogs 68] D. H. Rogstad, "A technique for measuring visibility phase with an optical interferometer in the presence of atmospheric seeing" *Applied Optics*, Vol. 7, No. 4, 585-588, 1968.
- [Simo 96] L.M. Simohamed, L. Delage, F. Reynaud, "An optical fiber delay line with a 318 m stroke". *Pure and Applied optics*, Vol 5, 1005, 1996.
- [Simo 97] L.M. Simohamed, F. Reynaud, "A two meter stroke optical fiber delay line". *Pure and Applied optics*, Vol 6, 37, 1997.