

International Conference on Space Optics—ICSO 1997

Toulouse, France

2–4 December 1997

Edited by George Otrio



Eléments-clés de la conception d'un instrument spatial à synthèse d'ouverture optique

*Frédéric Cassaing, Laurent Mugnier, Gérard Rousset,
Béatrice Sorrente,*



icso proceedings



International Conference on Space Optics — ICSO 1997, edited by Georges Otrio, Proc. of SPIE Vol. 10570, 105700R · © 1997 ESA and CNES · CCC code: 0277-786X/18/\$18 · doi: 10.1117/12.2326465

ÉLÉMENTS-CLÉS DE LA CONCEPTION D'UN INSTRUMENT SPATIAL À SYNTHÈSE D'OUVERTURE OPTIQUE

Frédéric CASSAING, Laurent MUGNIER, Gérard ROUSSET et Béatrice SORRENTE

Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales
BP 72, F-92322 Châtillon cedex, France

Mél : cassaing@onera.fr Tél. : 33 (0)1 46 73 48 54 Fax : 33 (0)1 46 73 41 48

RÉSUMÉ – La synthèse d'ouverture est une technique incontournable pour accroître la résolution des futurs télescopes spatiaux. Nous détaillons ici les trois éléments spécifiques de ces instruments par rapport aux télescopes monolithiques : le cophasage, la configuration pupillaire et la restauration d'image. Nous concluons que l'imagerie grand champ par synthèse d'ouverture est un objectif réaliste.

ABSTRACT – Aperture synthesis is a mandatory technic to increase the resolution of future space telescopes. We discuss here the three specific elements of these instruments compared to monolithic telescopes: cophasing, aperture configuration and image restauration. We conclude that wide field imaging by synthetic aperture is a realistic goal.

1 – INTRODUCTION

La synthèse d'ouverture optique (SOO) est la seule voie ouvrant l'accès à la très haute résolution angulaire. Cependant, les interféromètres au sol sont limités par la turbulence atmosphérique. Dans l'espace, les instruments à SOO (ISOOs) présentent beaucoup d'attraits. La SOO permet d'augmenter la résolution à moindre coût par dilution de la pupille : les pertes éventuelles en surface collectrice peuvent être compensés dans l'espace par augmentation du temps de pose, les pertes en couverture des fréquences spatiales par rotation de l'instrument. Les limitations en volume et en masse de la capacité des lanceurs peuvent donc conduire au choix de la SOO pour les futures missions spatiales. Par ailleurs, la possibilité de pointer globalement l'instrument simplifie considérablement la conception des interféromètres.

Depuis plusieurs années, l'ONERA étudie et développe de l'instrumentation en SOO aussi bien pour des applications au sol que pour des applications spatiales. L'expérience ASSI (Active Stabilization in Stellar Interferometry) [Sorr 91, Robb 97] a consisté à développer une table de recombinaison stabilisant en piston et en direction les faisceaux de l'Interféromètre à deux Télescopes (I2T) perturbés par la turbulence. Par ailleurs, nous avons dirigé une étude théorique portant sur la définition et la simulation d'un instrument imageur grand champ.

2 – LES DIFFÉRENTS TYPES D'INSTRUMENTS ET LEURS BESOINS

Un ISOO est constitué de plusieurs télescopes dont les faisceaux de sortie sont recombinaisonnés. Deux grand types d'ISOO se dégagent :

- les "corrélateurs" (fig. 1a) qui mesurent le degré de cohérence ou visibilité entre les faisceaux issus des télescopes. Il est alors possible de déterminer certains paramètres de l'objet par le

théorème de Zernike-Van Cittert. Les applications sont l'astrométrie, la mesure de diamètres stellaires, la coronagraphie, l'imagerie à faible champ. Ce type de détection, bien adapté aux pupilles lacunaires, est actuellement très employé au sol et a été proposé pour des missions spatiales [Cola 93];

- les "imageurs" (fig. 1b) qui forment directement une image de l'objet dans un plan focal. Leur pupille est souvent compacte.

Un télescope segmenté est un système intermédiaire entre le monolithique et l'ISOO : sa conception optique relève de celle d'un monolithique [Lois 96], mais le cophasage des segments et le filtrage pupillaire utilisent les mêmes techniques que celles employées sur un ISOO.

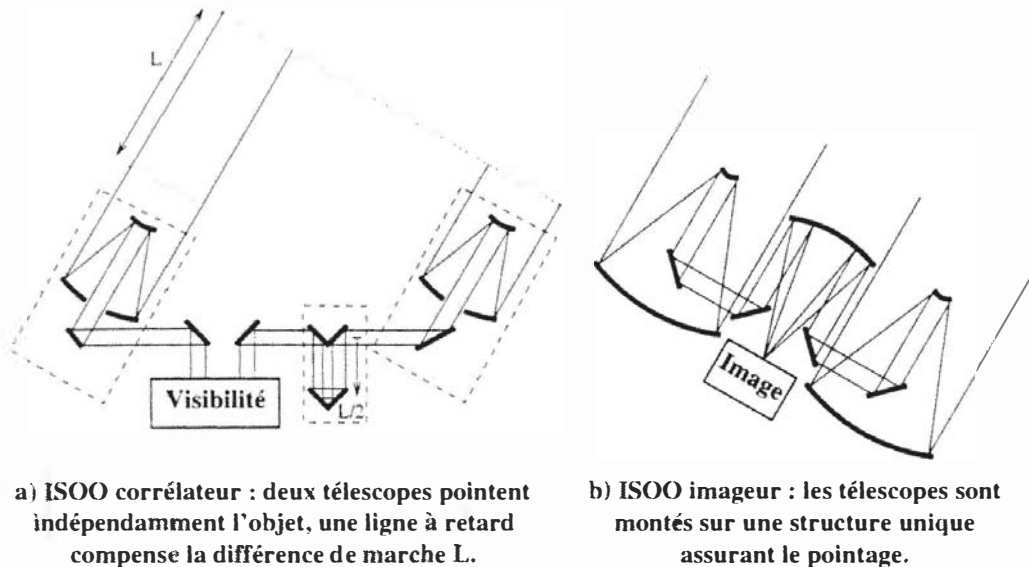


Fig. 1 – Les deux grands types d'ISOOs.

Ces deux types d'ISOOs sont constitués de quatre éléments optiques principaux (fig. 2) :

1. des télescopes collecteurs de l'onde émise par l'objet, le plus souvent afocaux : ils seront donc appelés AITs (Afocal Interferometric Telescope) ;
2. des dispositifs de transport des faisceaux, les périscopes. Ils peuvent inclure des lignes à retard pour corriger la distance L qui apparaît en figure 1 si les télescopes ont un pointage indépendant, ou d'autres systèmes chargés de corriger les déformations de l'instrument (miroir de pointage, imagerie pupillaire) ;
3. un dispositif de recombinaison, classiquement appelé BCT (Beam Combiner Telescope) ;
4. un système de mesure des défauts de l'ISOO pour assurer son cophasage. La non connexité de la pupille nécessite de mesurer les pistons et basculements différentiels entre les AITs, le système de cophasage est alors assez complexe. En plus des capteurs optiques, il faut utiliser une "référence" commune aux AITs, qui peut être soit l'objet observé lui-même (ou un objet voisin), soit une source ou un rétro-réflecteur embarqué sur l'instrument : on parle alors respectivement de cophasage externe ou interne.

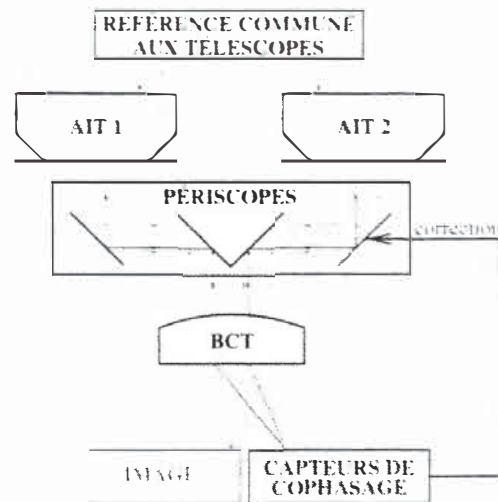


Fig. 2 – Principe de constitution d'un ISOO imageur : des télescopes AITs sont recombinaés via des périscopes dans un télescope BCT formant une image commune. Un système de cophasage, constitué d'une référence, de capteurs et d'actionneurs, corrige les défauts de recombinaison.

On peut voir les ISOOs comme une classe d'instruments dont le télescope monolithique ne serait qu'un cas particulier. Ainsi nous détaillons ici des problèmes peu habituels, spécifiques à la SOO, qui sont à considérer lors de la conception :

1. l'analyse des conditions de recombinaison cohérente des faisceaux dans le champ fait apparaître, en plus des aberrations de champ classiques, de nouvelles formes d'aberrations [Cass 97] qu'il faut corriger par cophasage ;
2. le choix de l'agencement relatif des AITs, la configuration pupillaire, qui échantillonne le front d'onde ;
3. la nécessité d'une restauration d'images en raison de la forme particulière de la fonction de transfert optique (FTO). Même si la FTO contient toutes les fréquences spatiales d'intérêt dans le cas compact, les hautes fréquences sont considérablement atténuées par rapport aux basses fréquences et la FTO présente de fortes variations. La réponse impulsionnelle (\mathbf{RI}) a alors d'importants lobes secondaires, nécessitant une déconvolution des images.

3 – LE COPHASAGE

Plusieurs questions se posent lors de l'implantation du système de cophasage. Il faut tout d'abord évaluer les qualités optiques à atteindre, puis implanter le système de cophasage (séparation des faisceaux d'imagerie et de cophasage, choix du cophasage interne ou externe), enfin déterminer un algorithme de mesure des défauts.

3.1 – Qualités optiques

Une surface d'onde plane incidente Σ donne naissance, après propagation à travers les AITs et les périscopes, à une série de surfaces d'onde Σ_n sur chaque sous-pupille (fig. 3). Selon les caractéristiques géométriques différentielles des AITs (positionnement, grossissement), la surface d'onde

émergente Σ' , constituée de l'ensemble des Σ'_n , diffère *a priori* d'une surface d'onde plane Σ'_0 : il existe des pistons (Φ) et des basculements (θ) différentiels entre les pupilles, pouvant évoluer dans le champ. On appellera cophasage de l'ISOO l'ensemble des moyens à mettre en œuvre pour rétablir la quasi-planéité de Σ' . Lorsque l'ISOO est cophasé dans tout le champ, son comportement est rigoureusement identique à celui d'un monolithique, au filtrage pupillaire près. Pour atteindre cet objectif, il faut établir la liste de toutes les sources de dégradation et attribuer à chacune une amplitude maximale au sein d'un budget d'erreur global de l'ISOO [Harv 95]. Certaines peuvent se contrôler passivement par conception, d'autres nécessitent une correction temps-réel à plus ou moins haute fréquence (dérive thermique, vibrations) par des capteurs et actionneurs spécifiques.

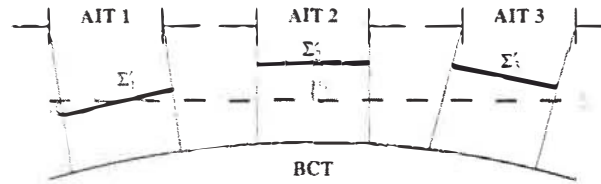


Fig. 3 – Allure d'une surface d'onde entre les périscopes et le BCT.

Nous avons récemment établi une synthèse de ces contraintes selon une nouvelle approche [Cass 97], plus tolérante que les critères habituellement utilisés. Le paramètre dimensionnant du cophasage de l'ISOO est le champ cherché, exprimé en nombre de points résolus (rapport champ sur résolution RCR). Ce nombre est d'autant plus élevé que le nombre de points résolus par le détecteur d'un ISOO imageur ou la quantité d'interpolation à effectuer par un corrélateur, sont élevés. Selon le RCR cherché, les contraintes optiques à respecter sont indiquées dans le tableau 1. L'homothétie pupillaire latérale des bases consiste à positionner homothétiquement les projections, dans la direction du faisceau incident, des centres des pupilles d'entrée et de sortie [Labe 96]. Lorsque les grossissements des AITs sont égaux à ce facteur d'homothétie, les pupilles d'entrée et de sortie sont rigoureusement homothétiques [Trau 86]. Enfin, la distorsion est une contrainte mise à jour plus récemment [Stul 90].

Tab. 1 – Complexité croissante des contraintes optiques en fonction du champ.

RCR	Désignation	Contrainte optique
1	opération sur l'axe	contrôle des pistons et basculements
≈ 10	petit champ	homothétie pupillaire latérale des bases
≈ 100	moyen champ	homothétie pupillaire latérale complète
≈ 1000	grand champ	homothétie pupillaire longitudinale
≈ 10000	très grand champ	distorsion des télescopes

3.2 – Implantation du cophasage

Quel que soit le mode de cophasage choisi, il faut séparer les faisceaux d'imagerie et de cophasage. Plusieurs séparations sont possibles : spatiale dans un plan focal ou pupille, spectrale, temporelle. Par ailleurs, pour minimiser les dérives entre les perturbations mesurées par le système de cophasage et les perturbations subies par le faisceau d'imagerie, il convient de minimiser les trajets différentiels entre les deux faisceaux. Ainsi une séparation spectrale par lames dichroïques n'est pas souhaitable :

la solution la plus fiable consiste à implanter les capteurs de cophasage au voisinage immédiat du détecteur dans le plan focal. Cependant, l'utilisation de domaines spectraux disjoints évite la pollution mutuelle des deux systèmes dans le cas du cophasage interne. Par ailleurs, le cophasage dans le champ impose de mesurer les pistons et basculements entre AITs dans plusieurs directions de champ. L'avantage d'un ISOO imageur est de permettre une séparation spatiale naturelle dans le plan focal.

La principale différence entre le cophasage interne et externe réside dans la façon de mesurer le piston entre les AITs. En cophasage externe, la seule solution passe par un filtrage spatial si l'objet observé est résolu par l'instrument (ce qui est le but). Par contre, en cophasage interne, la mesure sur chaque bras des pistons et des basculements entre la référence et le plan focal peut être simplement effectuée par des dispositifs métrologiques classiques. Le cophasage interne permet une très bonne réjection des perturbations par utilisation d'une source coopérative, mais il est sujet à divers biais : déformation de la référence qui peut être contrôlée par une métrologie absolue propre, sous échantillonnage pupillaire notamment. Par contre, le cophasage externe permet, par principe même, de mesurer exactement la déformation vue par le faisceau d'imagerie mais le rapport signal à bruit (RSB) peut être insuffisant pour certains objets. Le tableau 2 présente une comparaison des cophasages internes et externes.

Tab. 2 – Comparaison des cophasages internes et externes.

Critère	Cophasage interne	Cophasage externe
Complexité technologique	référence, métrologie systèmes auxiliaires	détecteurs faible flux filtrage spatial
Influence objet	nulle	moyennée zone de champ
Limitation en RSB	pas de limite (source interne)	champ sélectionné
Mesure pleine pupille	difficile \Rightarrow calibration	réalisée par principe
Fiabilité du cophasage	constante, mais biais possible	maximale, mais RSB variable

Il faut ajouter à ce tableau que l'importance des défauts de champ est pondérée par l'angle de champ. Ce sont donc les défauts sur l'axe qui ont le besoin de correction le plus fort (amplitude et fréquence). Par contre, les défauts dans le champ peuvent nécessiter une correction moins rapide. Ainsi, le cophasage interne est la meilleure solution pour la correction sur l'axe, alors que le cophasage externe peut être utilisé en complément, pour recalibrer les dérives du cophasage interne, pour corriger des défauts d'évolution plus lente tels que les défauts dans le champ, ou simplement pour pointer l'ISOO avec une précision compatible avec sa résolution.

3.3 – Algorithmes de cophasage

Que le cophasage soit interne ou externe, il faut un capteur optique et des algorithmes de mesure du piston et des basculements entre les AITs. Ces mesures ne constituent pas une nouveauté, mais leur utilisation pour le cophasage d'un ISOO ajoute quelques spécificités.

Pour l'étude ASSI, nous avons étudié les algorithmes de mesure de phase par modulation temporelle [Cass 97]. Ces algorithmes se prêtent bien à des corrélateurs à deux télescopes [Shao 88] ou à des systèmes de cophasage interne par hétérodynage [Gürs 96]. En particulier, nous avons montré qu'une modulation sinusoïdale, simplifiant le dispositif de modulation, offre des caractéristiques comparables en boucle ouverte et supérieures en boucle fermée aux modulations linéaires classiques. Cependant, ces concepts à base de modulation temporelle se prêtent mal à un ISOO imageur puisque le faisceau d'imagerie ne doit pas être modulé. L'utilisation d'interféromètres auxiliaires induit des risques de dérive et l'hétérodynage ne peut s'appliquer qu'au cophasage interne. Par ailleurs, ces montages sont

rapidement complexes si un nombre élevé de télescopes est utilisé.

Un autre solution consiste à utiliser une modulation spatiale, comme celle produite au plan focal commun. La RI est en effet l'interférogramme correspondant à l'interférence entre tous les points de la pupille de tous les faisceaux. Sa forme traduit donc les pistons et les basculements sur chaque pupille. Certains algorithmes ont été développés sur ce principe, à partir d'un échantillonnage de la RI [Aviz 89]. Ces algorithmes sont cependant difficilement extrapolables à un nombre élevé de pupilles car les contributions de chaque paire se mélangent dans la RI. Par ailleurs, réduire la RI à un ensemble de points d'échantillonnage diminue le RSB. Pour accéder à l'espace pupillaire à partir de l'espace focal, une autre solution est de calculer la transformée de Fourier de la RI : la FTO. Cependant la FTO, autocorrélation de la pupille complexe, ne donne pas accès directement aux phases sur les pupilles.

Néanmoins, on peut montrer qu'en présence de faibles aberrations [Cass 97], la fonction de transfert de phase FTP (la phase de la FTO) se détermine facilement à partir de la phase Φ_n sur la pupille P_n de chaque AIT. L'inversion de cette relation permet d'estimer la phase $\hat{\Phi}_n$ sur les pupilles à partir de la FTP. Nous avons donc validé par simulation un algorithme du type :

$$P_n, \Phi_n \xrightarrow{|TF(\sum P_n e^{i\Phi_n})|^2} RI \xrightarrow{\text{Bruit}} RI_b \xrightarrow{TF} FTO \xrightarrow{\text{Argument}} FTP \xrightarrow{\text{Algorithme}} \hat{\Phi}_n$$

Bien que la sensibilité de l'algorithme décroît avec l'ordre des modes de Zernike et que certains modes se replient, cet algorithme permet de bien mesurer les pistons et les basculements qui sont justement les modes d'intérêt en SOO. À titre d'illustration, la figure 4 montre le module et la phase de la FTO en présence d'un piston et d'un basculement appliqués sur un des trois AITs d'une pupille diluée. L'algorithme se complexifie pour une pupille compacte et peut induire des contraintes sur le choix de la configuration pupillaire.

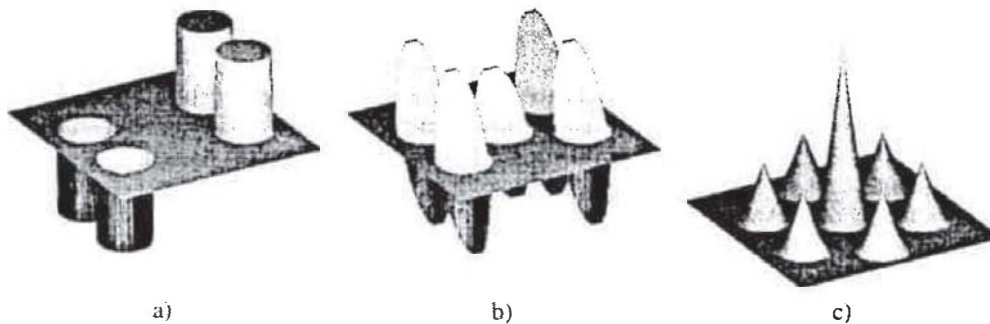


Fig. 4 - Influence sur la phase de la FTO d'un piston (a) et d'un basculement (b) sur une des sous-pupilles ; module de la FTO (c).

4 - OPTIMISATION DE LA CONFIGURATION PUPILLAIRE

Le choix de la configuration pupillaire est un aspect clé de la conception d'un ISOO imageur. En effet, celle-ci détermine la FTO de l'ISOO et donc sa résolution spatiale. Nous avons développé une méthodologie qui permet de choisir un agencement optimal des AITs, sous des contraintes telles que : la résolution désirée (c'est-à-dire la fréquence maximum d'intérêt), la surface collectrice totale (c'est-à-dire le RSB requis), et la complexité du système (par exemple le nombre maximal de télescopes ou l'encombrement global du réseau). Le point de départ de cette méthodologie est que les images brutes issues d'un ISOO doivent être déconvoluées avant d'être interprétées. Cette déconvolution va d'autant

plus amplifier le bruit d'enregistrement des données que la FTO est faible. On définit la configuration pupillaire optimale comme étant celle qui minimise l'amplification du bruit lors de la déconvolution. On montre alors que la configuration pupillaire optimale est celle maximisant un critère de qualité, qui est le minimum de la FTO sur le domaine fréquentiel d'intérêt. C'est le critère habituel de pupille compacte, sous une forme plus quantitative qui permet de choisir la meilleure configuration pupillaire lors d'une recherche systématique. Dans le cas où l'on connaît le spectre du bruit, on peut raffiner le critère de qualité pour prendre en compte cette connaissance [Mugn 96].

La figure 5 illustre les configurations pupillaires optimales obtenues pour 3, 4 et 5 AITs, pour une résolution et une surface collectrice données. La configuration pupillaire optimale est un polygone régulier pour 3 et 5 AITs ; par contre pour 4 AITs la configuration pupillaire optimale n'est pas un carré, lequel couvrirait moins bien le plan des fréquences spatiales. Dans tous les cas, l'espacement des AITs croît avec la fréquence maximum d'intérêt.

On peut noter que ce genre de critère peut également s'appliquer à des instruments monolithiques et permet donc de comparer la qualité image entre un ISOO et un instrument monolithique.



Fig. 5 – Configurations pupillaires optimales à 3, 4 et 5 AITs. La surface collectrice, constante, correspond à un diamètre de 40 pixels pour 3 AITs. La fréquence maximum d'intérêt est la fréquence de coupure d'un monolithique de diamètre 70 pixels.

5 – EXEMPLE DE RESTAURATION D'IMAGES

On illustre ici la nécessité de considérer l'étape de restauration comme partie intégrante de l'ISOO. Pour cela, on a considéré un objet étendu typique (fig. 6a), dont on a dans un premier temps simulé l'imagerie à travers l'ISOO à trois télescopes (fig. 5) avec prise en compte :

- des défauts optiques de l'ISOO (résidus de cophasage, qualité des surfaces),
- de l'échantillonnage opéré dans le plan focal et d'un défaut de pointage global de l'ISOO pendant l'intégration (fonction de transfert détecteur FTD),
- du bruit de détecteur (gaussien),
- du bruit de photons (poissonnien) dans l'image.

L'image brute correspondante (fig. 6b) illustre clairement la forte atténuation des hautes fréquences. Elle a ensuite été déconvoluée à l'aide de deux filtres : d'une part un filtre inverse classique (fig. 6c), d'autre part un filtre de Wiener [Papo 91] (fig. 6d), qui nécessite une modélisation de la Densité Spectrale de Puissance de l'objet et du bruit. On a choisi pour l'objet un modèle typique en $1/f^p$ ($p \in [2, 4]$) à haute fréquence [Katt 97]. Le filtre inverse parvient à restaurer les hautes fréquences au prix d'une amplification importante du bruit (piqué de l'image). Par contre, l'image obtenue par le filtre de Wiener présente, pour une image semblable, une nette réduction du piqué. La figure 7 montre une coupe de la FTO de l'ISOO, du filtre de Wiener, et de leur produit.

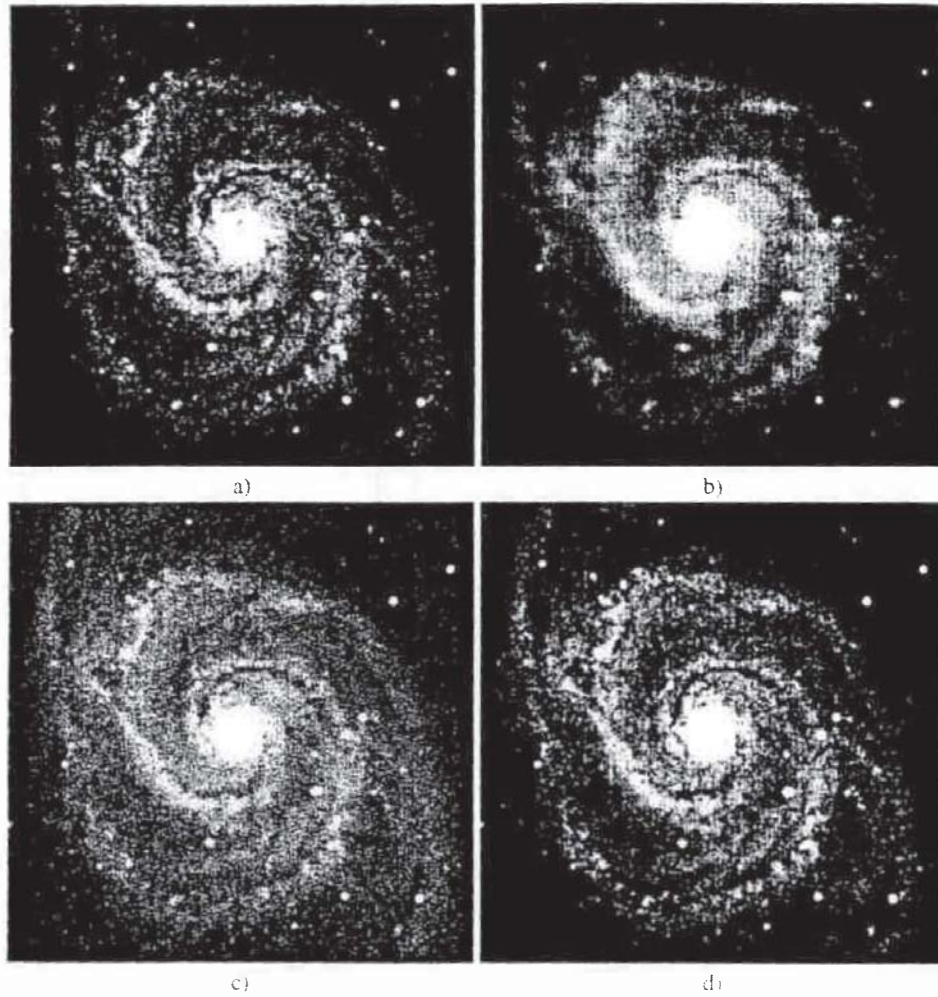


Fig. 6 - Objet initial (a), image brute (b) et images restaurées par filtre inverse (c) et de Wiener (d).

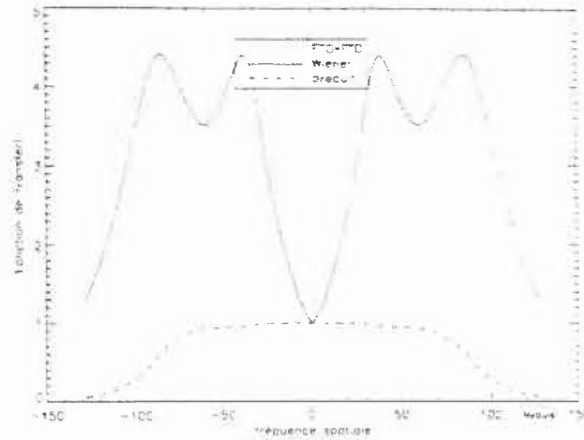


Fig. 7 – Coupes de la fonction de transfert d'imagerie ($FTO*FTD$), du filtre de restauration (Wiener) et du produit des deux.

Le filtre de Wiener est le filtre linéaire optimal au sens d'un écart quadratique moyen minimal. D'autres algorithmes plus complexes peuvent également être utilisés, comme des algorithmes non linéaires (permettant en particulier de mieux restaurer les bords de l'objet) ou myopes (prise en compte d'une RI mal connue). Par ailleurs, en présence d'aberrations ou de résidus de cophasage, l'évolution de la RI dans le champ doit être considérée (pseudo-déconvolution).

6 – CONCLUSION

Nous avons examiné les trois points spécifiques de la conception d'un ISOO. Tout d'abord, l'examen de la formation d'image dans le champ montre que, bien que de conception radicalement différente aux monolithiques, le domaine isoplanétique des ISOOs peut couvrir plusieurs dizaines de milliers de points résolus si certaines règles optiques, de complexité croissante avec le champ, sont respectées. Ensuite, le cophasage grand champ de l'ISOO nécessite des concepts spécifiques. Une solution mixte, basée sur un mélange de cophasage interne et externe, permet de répondre au besoin en tirant parti de la taille du domaine isoplanétique. Enfin, la méthodologie de choix de la configuration pupillaire est maintenant comprise, permettant une recherche systématique selon les besoins de la mission. Ainsi, bien qu'actuellement peu considérés par les astronomes, des ISOOs imageurs à grand RCR semblent parfaitement réalisables et sont une alternative pour assurer la relève d'Hubble.

7 – REMERCIEMENTS

Nous remercions la Direction des Recherches, Études et Techniques de la DGA pour le soutien apporté à ces études.

ASSI est une coopération entre l'ONERA et l'Observatoire de la Côte d'Azur.

BIBLIOGRAPHIE :

- [Aviz 89] P.V. Avizonis, J. Fender, and R. Butts. Effect of piston and tilt bias errors in multiple wavefront interference. *Opt. Eng.*, 28(12):1260-1266, décembre 1989.
- [Cass 97] F. Cassaing. *Analyse d'un instrument à synthèse d'ouverture optique : méthodes de co-phasage et imagerie à haute résolution angulaire*. Thèse de doctorat (en préparation), Université Paris XI, 1997.
- [Cola 93] M. M. Colavita, M. Shao, and M. D. Rayman. Orbiting stellar interferometer for astrometry and imaging. *Appl. Opt.*, 32(10):1789-1797, avril 1993.
- [Gürs 96] Y. Gürsel. Metrology for spatial interferometry III. In P. Y. Bely and J. B. Breckinridge, editors, *Space telescopes and instruments III*, volume 2807, pages 148-161. Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., août 1996.
- [Harv 95] J. E. Harvey and C. Ftacfas. Field-of-view limitations of phased telescope arrays. *Appl. Opt.*, 34(25):5787-5798, septembre 1995.
- [Katt 97] A. P. Kattinig and J. Primot. Model of the second-order statistic of the radiance field of natural scenes, adapted to system conceiving. In *Aeorosense '97 - Visual information processing VI*, volume 3074, Washington, 1997. SPIE, Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.
- [Labe 96] A. Labeyrie. Resolved imaging of extra-solar planets with future 10-100 km optical interferometric arrays. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 118:517-524, septembre 1996.
- [Lois 96] S. Loiseau and S. Shaklan. Optical design, modelling and tolerancing of a Fizeau interferometer dedicated to interferometry. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 117:167-178, May 1996.
- [Mugn 96] Laurent Marc Mugnier, Gérard Rousset, and Frédéric Cassaing. Aperture configuration optimality criterion for phased arrays of optical telescopes. *J. Opt. Soc. Am. A*, 13(12):2367-2374, décembre 1996.
- [Papo 91] A. Papoulis. Probability, Random Variables, and Stochastic Processes. McGraw-Hill, New-York, troisième édition, 1991.
- [Robb 97] S. Robbe, B. Sorrente, F. Cassaing, Y. Rabbia, and G. Rousset. Performance of the angle of arrival correction system of the I2T+ASSI stellar interferometer. *Astronomy and Astrophysics*, 125:1-21, octobre 1997.
- [Sorr 91] B. Sorrente, F. Cassaing, D. Beal, E. Prieto, Y. Rabbia, and M. Dugue. Active phase stabilization with ASSI: results and perspectives. In *High-Resolution Imaging by Interferometry II*, pages 1133-1142, Garching, Germany, 1991. ESO.
- [Shao 88] M. Shao, M. M. Colavita, B. E. Hines, D. H. Staelin, D. J. Hutter, K. J. Johnston, D. Mozurkewich, R. S. Simon, J. L. Hershey, J. A. Hughes, and G. H. Kaplan. The mark III stellar interferometer. *Astron. Astrophys.*, 193:357-371, 1988. SPIE-MS139.
- [Stul 90] T. W. Stuhlinger. All-reflective phased array imaging telescopes. In *International lens design conference*, volume 1354, pages 438-446. Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., 1990.
- [Trau 86] W. A. Traub. Combining beams from separated telescopes. *Appl. Opt.*, 25(4):528-532, février 1986.