

Observation haute résolution permanente de la Terre par synthèse d’ouverture optique

L. Mugnier, G. Rousset, F. Cassaing, B. Sorrente, M.-T. Velluet
ONERA/DOTA, BP72, 92322 Châtillon cedex.

Mél : Laurent.Mugnier@onera.fr

1 Introduction

L’observation permanente à haute résolution d’une région donnée de la Terre serait une percée technologique considérable avec de nombreuses applications. La permanence va de pair avec l’utilisation d’une orbite haute et donc l’augmentation de la résolution angulaire de l’instrument d’imagerie par rapport à un satellite en orbite basse. L’ONERA a récemment achevé une étude sur la faisabilité d’un télescope à Synthèse d’Ouverture Optique (SOO), également appelé Télescope Multi-Pupilles (TMP), en orbite géostationnaire, pour cette application. Les éléments-clés de la définition d’un tel d’un TMP ont été étudiés [1, 2] et sont détaillés plus loin.

2 Pourquoi la synthèse d’ouverture optique ?

La résolution angulaire ultime d’un instrument (donnée par les lois de la diffraction) est déterminée par le rapport de la longueur d’onde d’observation et du diamètre du télescope. Pour atteindre une haute résolution spatiale à grande distance, il est nécessaire d’utiliser des instruments de très grand diamètre. Or la technologie actuelle limite ce diamètre à dix mètres au sol (en astronomie) et quelques mètres dans l’Espace. Une façon de contourner cette limitation est de coupler de manière cohérente la lumière collectée par plusieurs télescopes élémentaires de petite taille afin de synthétiser un télescope beaucoup plus grand. La résolution est déterminée non plus par le diamètre d’un télescope élémentaire mais par la distance les séparant (la base de l’interféromètre). Ceci conduit à définir un instrument d’encombrement beaucoup plus raisonnable qu’une solution mono-télescope.

3 Co-phaser les télescopes élémentaires

Une des problématiques principales de l’approche à SOO est de faire interférer les faisceaux venant des télescopes élémentaires, pouvant être espacés de quelques mètres à plus de 100m (en astronomie par exemple). Pour cela, il faut assurer le « co-phasage » : c’est à dire maintenir une différence de marche résiduelle entre faisceaux petite devant la longueur d’onde d’observation [3]. Pour les télescopes au sol, la turbulence atmosphérique introduit des différences de marche aléatoires qu’il est nécessaire de compenser en temps réel par un « suiveur de frange ». Dans les années 90, l’ONERA a développé une table de recombinaison des faisceaux issus de l’interféromètre à deux télescopes de l’Observatoire de la Côte d’Azur permettant la stabilisation en temps réel des franges d’interférence et des dépointages des télescopes sur des bases décimétriques. La figure 1 présente un résultat obtenu sur étoile démontrant une stabilisation des franges à 80 nm rms pour une perturbation turbulente de 2,6 μm rms [4], et qui a constitué une première en Europe.

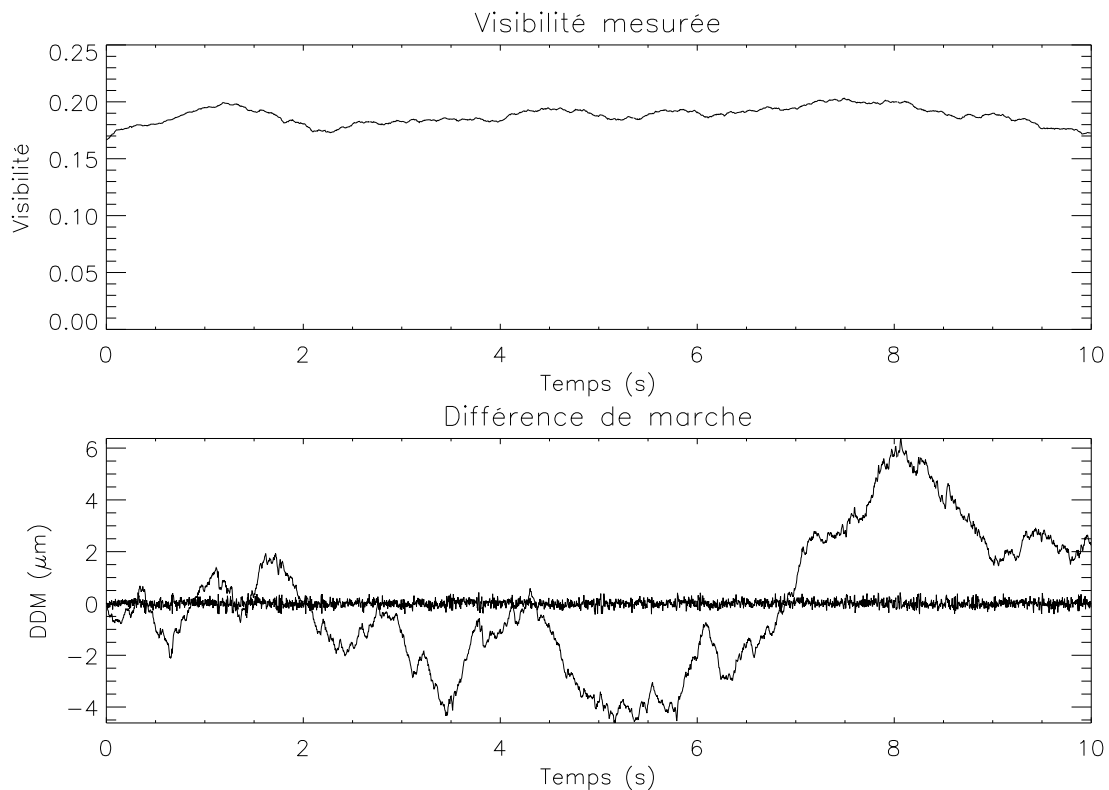


FIG. 1 – Haut : visibilité des franges mesurées sur l’interféromètre à deux télescopes de l’Observatoire de la Côte d’Azur. Bas : différence de marche corrigée par le suiveur de franges (courbe à fortes variations) et résidu mesuré en boucle fermée (courbe proche de zéro).

4 Observation de scènes étendues comme celles de la Terre

À la fin des années 90, l’ONERA a conduit une première étude de concept d’un TMP pour l’observation de la Terre dans le cadre d’un programme Euclid (RTP 9.2, soutenu par la DGA) en collaboration avec des laboratoires belges. Les travaux menés jusqu’alors, essentiellement par des astronomes, n’avaient principalement considéré que l’observation d’objets quasi-ponctuels, il s’agissait de l’interférométrie stellaire. Nous nous sommes donc attachés à démontrer que l’approche multi-télescopes (ou multi-pupilles) pouvait aussi être mise en œuvre sur des scènes très étendues comme celles de la Terre. Tout d’abord, nous avons dû assurer le co-phasage de l’instrument, non seulement sur l’axe mais aussi dans tout le champ d’intérêt par la mise en œuvre d’une conception optique spécifique et de systèmes temps-réel de compensation des vibrations. Nous avons aussi démontré l’importance de la restauration d’images pour de tels instruments. Cette restauration doit être intégrée dès le début de la conception comme un sous-système clef [5, 6] qui permet d’orienter certains choix (configuration pupillaire, surface collectrice). Une vue 3D du concept d’instrument proposé est présentée sur la figure 2. Il s’agit d’un instrument à trois télescopes ayant un rapport champ sur résolution de 10000. Ces travaux se sont poursuivis récemment dans le cadre d’un PEA (études prospectives du SPOTI) et sont présentés ci-dessous.

5 Étude de faisabilité de la synthèse d’ouverture optique pour l’observation permanente de la Terre

Les éléments-clés de la définition d’un TMP ont été analysés en détail dans cette étude. Ce sont en particulier la conception optique, le cophasage sur un grand champ, la configuration pupillaire (c.-à-d. le positionnement relatif des télescopes élémentaires qui interfèrent) et la restauration des images enregistrées par l’instrument. Le cophasage a fait l’objet d’une validation expérimentale.

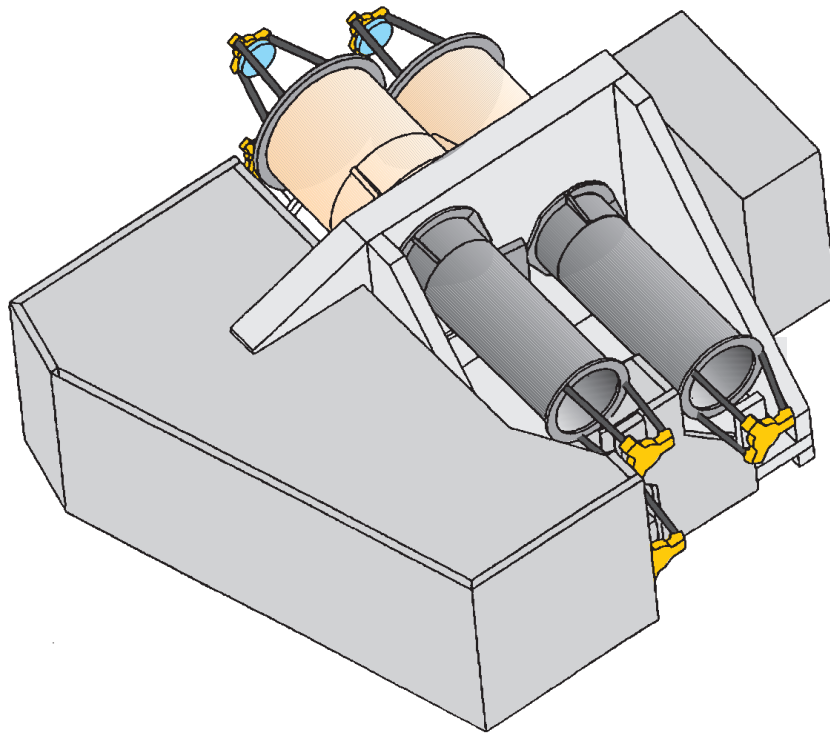


FIG. 2 – Concept opto-mécanique de l’instrument proposé et étudié dans le RTP 9.2 (partenariat ONERA [France] / SBI, CSL et ULB [Belgique]).

Deux familles de concepts optiques peuvent être envisagés pour un TMP : le « Fizeau » et le « Michelson » (Fig. 3). Dans le Fizeau, les segments de la pupille sont des miroirs qui forment des portions d’un miroir primaire commun. L’encombrement longitudinal est de l’ordre de la base maximum B (diamètre du télescope monolithique équivalent). Dans le Michelson, des télescopes indépendants (dits élémentaires) sont recombinaisonnés par un télescope dédié. L’encombrement longitudinal est de l’ordre du diamètre D des télescopes élémentaires, ce qui réduit significativement le moment d’inertie et représente un avantage décisif pour un instrument embarqué.

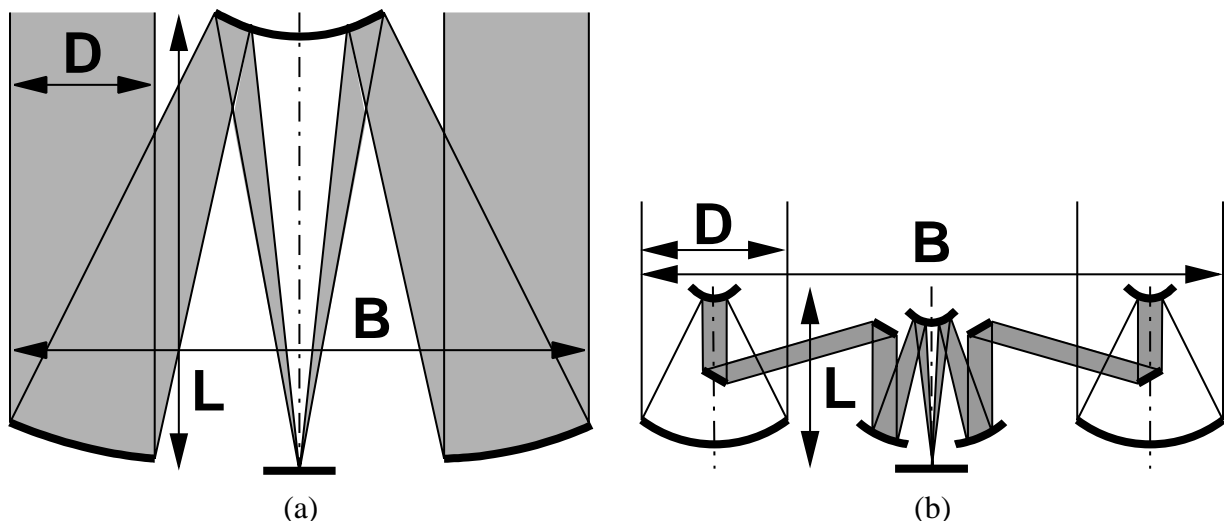


FIG. 3 – Principe des TMPs Fizeau (a) et Michelson (b), pour la même base maximum B et le même diamètre D de segment de pupille.

Des concepts optiques Fizeau bien connus sont les deux télescopes Keck ou le JWST. Le concept Michelson est essentiellement utilisé par les interféromètres stellaires au sol, comme le VLT-I ou le Keck-I. La conception optique de TMP de type Fizeau est identique à celle d’un télescope monolithique (dont on aurait masqué une partie de la pupille) et est donc aisée avec

les outils habituels. La conception d’un TMP de type Michelson est un sujet assez neuf. En effet les interféromètres stellaires de type Michelson utilisés en astronomie n’ont pas de champ. Pour obtenir un grand champ avec un tel instrument, de nombreuses contraintes doivent être prises en compte simultanément (voir [7, 6] et leurs références).

Nous avons exploré en détail la conception et l’optimisation d’un TMP composé de télescopes élémentaires recombinaés dans un plan focal commun : cette étude s’est fondée sur le calcul analytique des aberrations d’un tel instrument [8]. Le résultat essentiel démontre qu’il est possible d’obtenir un très grand champ (typiquement 15000 éléments résolus) avec des concepts optiques relativement simples comportant des télescopes élémentaires à deux miroirs, essentiellement en utilisant un rapport D/B petit.

Les éléments de la pupille d’un TMP doivent être co-phasés avec une tolérance d’une fraction de la longueur d’onde. Pour un TMP, les degrés de liberté à contrôler sont avant tout le piston différentiel (différence de chemin optique entre télescopes élémentaires) et les tilts différentiels (différences de direction de ligne de visée entre télescopes élémentaires). Nous avons comparé les concepts de capteurs de co-phasage candidats fonctionnant sur un objet très étendu comme une scène terrestre ; le concept le plus prometteur est la diversité de phase (DP) [1]. La DP est une technique de mesure plan focal fondée sur l’enregistrement de deux images simultanées du même objet, la deuxième image étant entachée, par rapport à la première, d’une aberration supplémentaire connue comme la défocalisation. Ces deux images permettent d’estimer sans ambiguïté non seulement les pistons et les tilts différentiels mais aussi les aberrations propres de chaque télescope élémentaire. Nous avons conçu, réalisé et testé un prototype de capteur de co-phasage par DP [2]. Les tests ont été faits sur un banc dédié appelé BRISE (Fig. 4) dont on a limité au maximum les perturbations environnementales : turbulence, vibrations, dilatations thermiques. Un capteur dit de référence, fondé également sur la DP mais fonctionnant sur point-

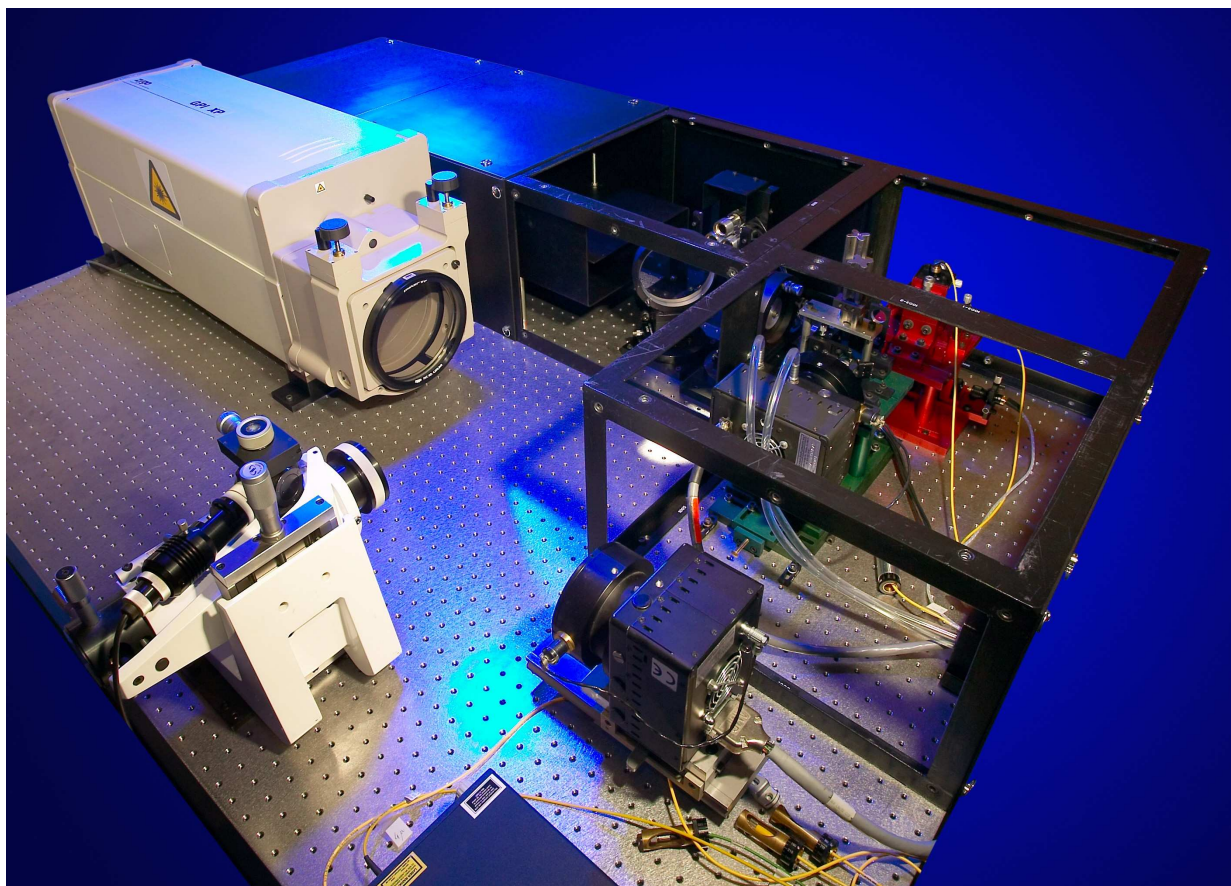


FIG. 4 – Photographie du banc BRISE.

source et à fort flux, a été implanté sur un trajet optique très proche et enregistre ses données sur

le même capteur CCD. Il permet d’étalonner les mesures du capteur de co-phasage. La figure 5 montre une image expérimentale produite par les capteurs de co-phasage et de référence. Une

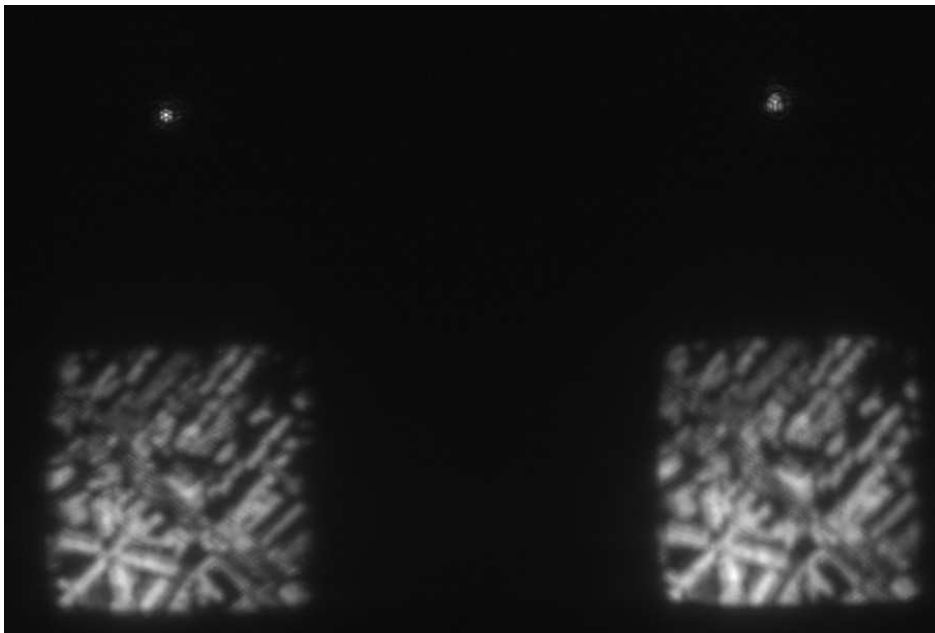


FIG. 5 – Images expérimentales du banc de test de co-phasage BRISE, acquises simultanément. En haut, image d’un point source de référence (à g. : focalisé, à d. : défocalisé). En bas, image d’un objet étendu (scène urbaine, à g. : focalisée, à d. : défocalisée).

répétabilité nanométrique des mesures de piston a été atteinte avec le capteur de co-phasage pour des scènes étendues représentatives de scènes terrestres (Fig. 6).

Nous avons également amélioré et étendu [1] une méthode d’optimisation de la configuration pupillaire [9]. L’approche utilisée est celle de la planification d’expérience : l’optimisation prend en compte la chaîne complète d’acquisition et de traitement, et fournit la configuration donnant une erreur d’estimation minimale en moyenne après restauration de l’image enregistrée. Les paramètres importants de l’optimisation sont la résolution visée, le niveau de bruit, la surface collectrice et le nombre de segments de la pupille. La figure 7 montre un résultat obtenu pour douze segments. La fonction de transfert de la configuration pupillaire optimale présente un pic basse fréquence entouré d’un plateau assez bas mais s’étendant jusqu’à la fréquence spatiale maximum d’intérêt correspondant à la résolution visée. Cette fonction de transfert est typique d’un TMP.

Enfin, nous avons développé une méthode de traitement des données adaptée à un tel instrument. Elle diffère des méthodes de reconstructions à partir de données interférométriques utilisées en astronomie [10] du fait qu’un TMP enregistre un continuum de fréquences de l’objet observé et non un ensemble discret. Ce traitement est une restauration d’image, qui a pour but de compenser la FTM intrinsèquement basse d’un tel instrument (Fig. 7) tout en restituant les bords francs de l’image, éléments informatifs présents sur les constructions humaines (scènes urbaines, etc.). Cette méthode de restauration est adaptée de développements effectués pour l’observation de l’Espace et peut gérer une connaissance imparfaite de la fonction de transfert de l’instrument [11]. La figure 8 montre la simulation de la chaîne complète instrument et restauration. La comparaison de l’image qu’on obtiendrait à travers un seul télescope élémentaire (Fig. 8b) et de celle obtenue à travers l’instrument complet (figure 8c) montre à la fois la présence dans cette dernière d’informations à hautes fréquences spatiales et l’atténuation de ces hautes fréquences par l’instrument. La figure 8d montre que le traitement effectué permet de restaurer une image très proche de l’objet initial (Fig. 8a), en retrouvant les bords francs de celui-ci tout en évitant l’amplification du bruit.

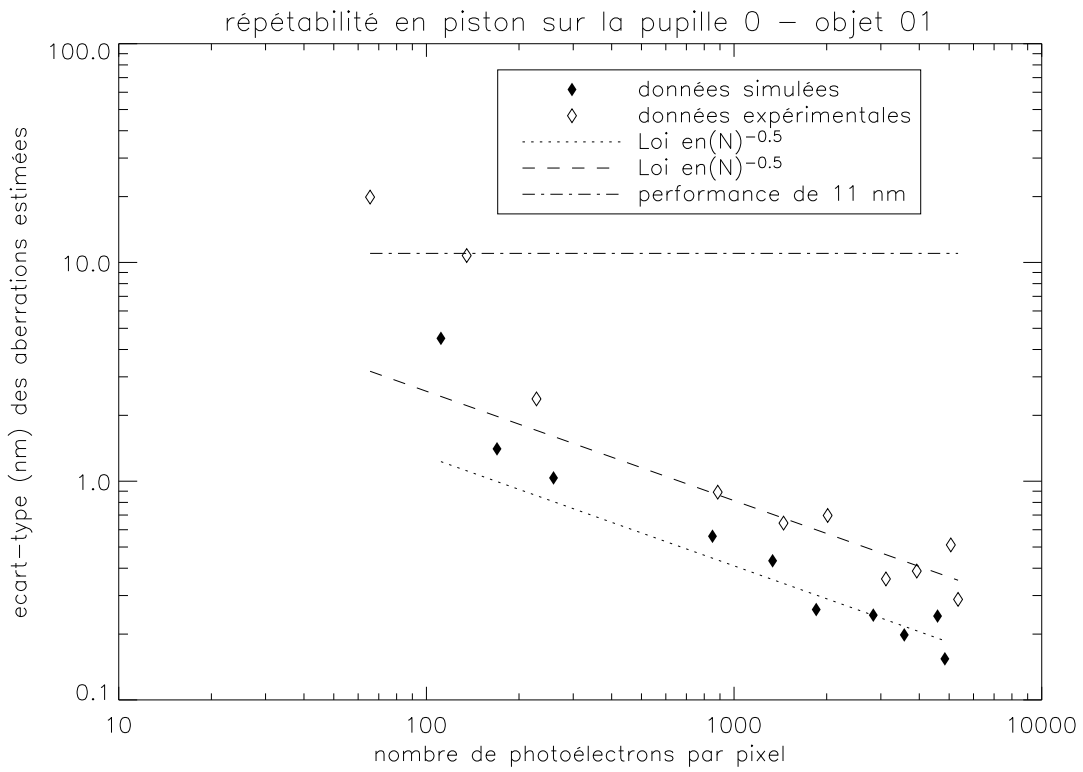


FIG. 6 – Répétabilité expérimentale de la mesure de piston par le capteur de co-phasage sur objet étendu et comparaison avec la simulation.

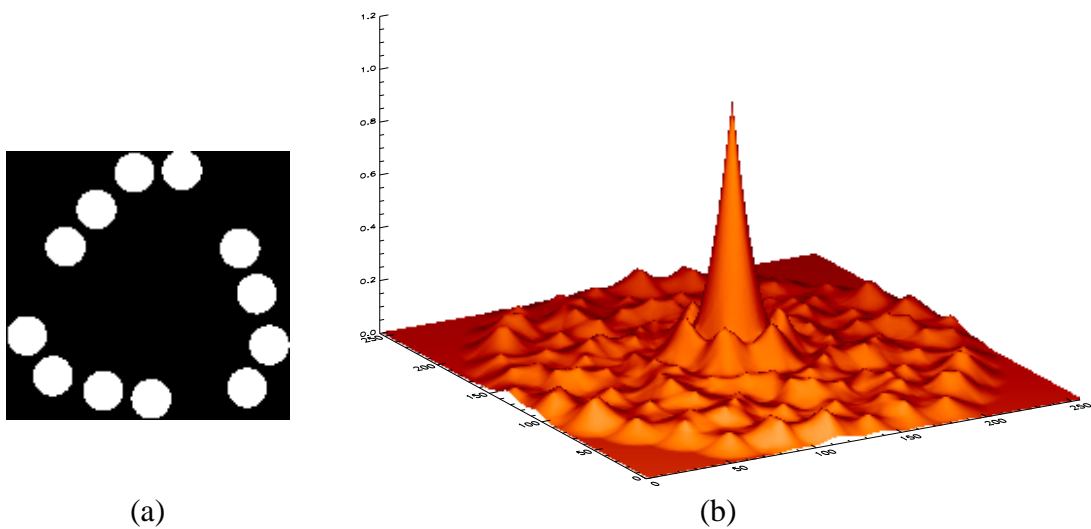


FIG. 7 – configuration pupillaire optimisée (a) et fonction de transfert correspondante (b).

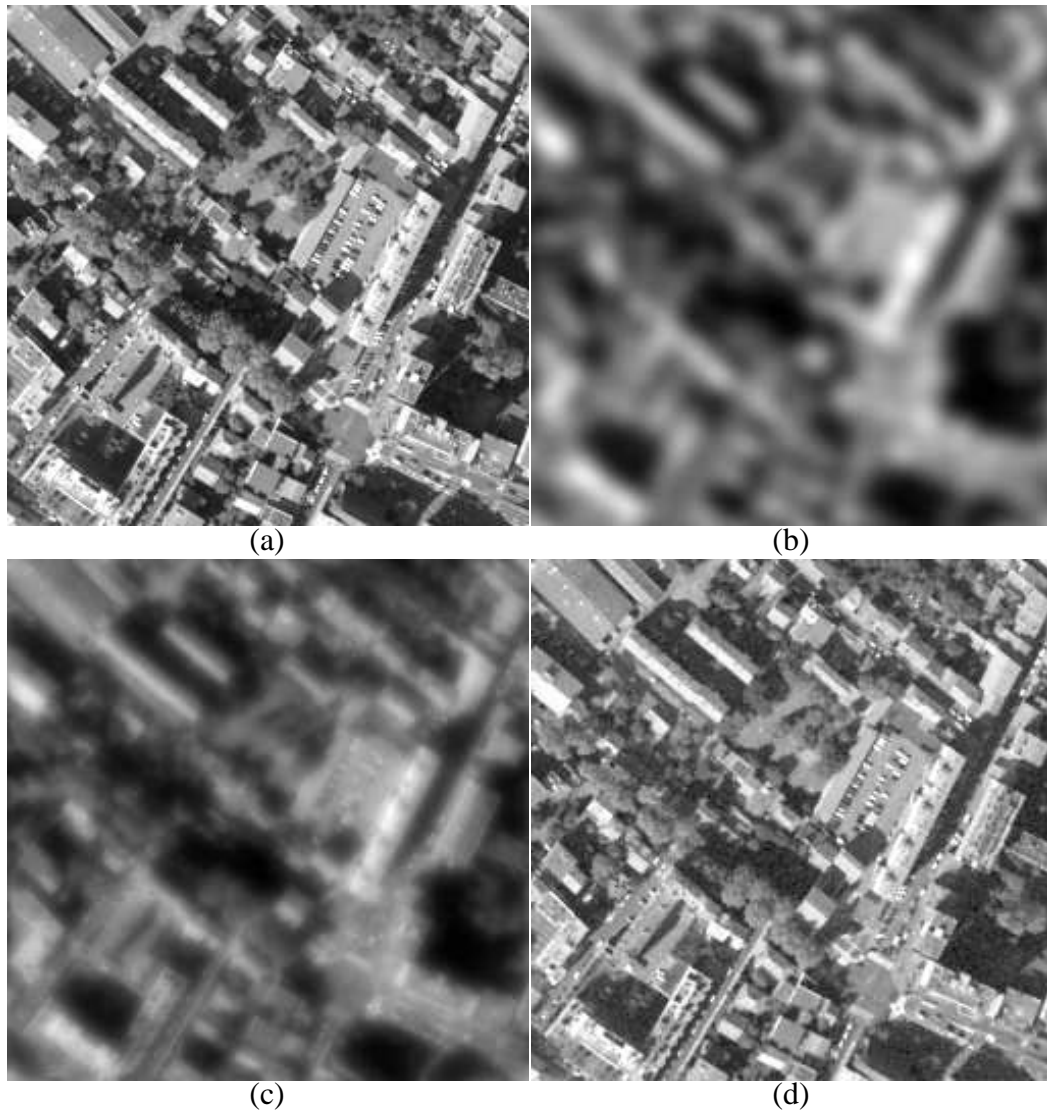


FIG. 8 – Objet observé (a), image vue par un télescope élémentaire (b), image vue par l’interféromètre (c) et image restaurée (d).

6 Conclusion

Cette étude a permis d’identifier et de lever les principaux points durs liés à la faisabilité d’un instrument imageur à SOO. L’ensemble des résultats montre que l’observation permanente à haute résolution de notre planète est un objectif accessible avec la technologie d’aujourd’hui. Les travaux réalisés placent l’ONERA dans une position privilégiée pour participer au développement d’un futur système d’observation à haute résolution en orbite haute, qui constituerait un projet enthousiasmant et fédérateur pour l’Europe.

Les travaux présentés ont aussi ouvert des opportunités de valorisation des moyens et des compétences acquises dans le cadre Défense. En effet à la suite de plusieurs appels d’offres concluants, l’ONERA participe actuellement au programme DARWIN de l’ESA (détection et analyse de planètes extra-solaires de type Terre par un TMP de type Michelson) en développant par exemple un concept original de suiveur de frange d’une précision meilleure que le nanomètre, performance démontrée en laboratoire tout récemment.

Références

- [1] Mugnier (L.), Cassaing (F.), Sorrente (B.), Baron (F.), Velluet (M.-T.), Michau (V.) et Rousset (G.). Multiple-aperture optical telescopes : some key issues for Earth observation from a GEO orbit. Dans : *5th International Conference On Space Optics*. CNES/ESA. Toulouse, France, 2004.
- [2] Sorrente (B.), Cassaing (F.), Baron (F.), Coudrain (C.), Fleury (B.), Mendez (F.), Michau (V.), Mugnier (L.), Rousset (G.), Rousset-Rouvière (L.) et Velluet (M.-T.). Multiple-aperture optical telescopes : cophasing sensor testbed. Dans : *5th International Conference On Space Optics*. CNES/ESA. Toulouse, France, 2004.
- [3] Cassaing (F.). Optical path difference sensors. *C. R. Acad. Sci. Paris*, vol. Série IV, tome 2, n° 1, janvier 2001, pp. 87–98.
- [4] Sorrente (B.), Cassaing (F.), Rousset (G.), Robbe-Dubois (S.) et Rabbia (Y.). Real-time optical path difference compensation at the Plateau de Calern I2T interferometer. *Astron. Astrophys.*, vol. 365, 2001, pp. 301–313.
- [5] Mugnier (L. M.), Cassaing (F.), Rousset (G.) et Sorrente (B.). Earth observation from a high orbit : pushing the limits with synthetic aperture optics. Dans : *Space-based observation techniques*. NATO/RTO-SET. Samos, Greece, octobre 2000.
- [6] Rousset (G.), Mugnier (L. M.), Cassaing (F.) et Sorrente (B.). Imaging with multi-aperture optical telescopes and an application. *C. R. Acad. Sci. Paris*, vol. Série IV, tome 2, n° 1, janvier 2001, pp. 17–25.
- [7] Cassaing (F.). *Analyse d’un instrument à synthèse d’ouverture optique : méthodes de cophasage et imagerie à haute résolution angulaire*. Thèse de Doctorat, Université Paris XI Orsay, décembre 1997.
- [8] Cassaing (F.), Sorrente (B.), Fleury (B.) et Laubier (D.). Optical design of a Michelson wide-field multi-aperture telescope. Dans : *Optical System Design*. Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. Saint-Etienne, France, 2003.
- [9] Mugnier (L. M.), Rousset (G.) et Cassaing (F.). Aperture configuration optimality criterion for phased arrays of optical telescopes. *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 13, n° 12, décembre 1996, pp. 2367–2374.
- [10] Meimon (S. C.), Mugnier (L. M.) et Le Besnerais (Guy). A novel method of reconstruction for weak-phase optical interferometry. Dans : *New frontiers in stellar interferometry*, éd. par Traub (Wesley A.). Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., pp. 909–919. Date conférence : juin 2004, Glasgow, UK.
- [11] Mugnier (L. M.), Fusco (T.) et Conan (J.-M.). MISTRAL : a myopic edge-preserving image restoration method, with application to astronomical adaptive-optics-corrected long-exposure images. *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 21, n° 10, octobre 2004, pp. 1841–1854.