



## Programme et publications JRIOA

### Date: Jeudi, 05.07.2018

11:00 - 12:30	<b>O6-A: Session Orale JRIOA #1</b>
Amphi Fermat	Biomédical : présentations et table ronde

### Date: Vendredi, 06.07.2018

8:30 - 10:30	<b>O7-A: Session Orale JRIOA #2</b>
Amphi Fermat	Télécommunications optiques puis Astronomie

11:00 - 12:30	<b>O8-A: Session Orale JRIOA #3</b>
Amphi Fermat	Espace

## Présentations

### O6-A: Session Orale JRIOA #1

Heure: Jeudi, 05.07.2018: 11:00 - 12:30 · Salle: Amphi Fermat

Biomédical : présentations et table ronde

11:00 - 11:15

#### Imagerie haute résolution de la rétine par illumination structurée assistée par optique adaptative

**Y. Lai-Tim**<sup>1,2</sup>, L. Mugnier<sup>1</sup>, R. Baena-Gallé<sup>3</sup>, S. Meimon<sup>1</sup>, E. Gofas-Salas<sup>1</sup>, P. Mecé<sup>1</sup>, M. Paques<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Onera, Châtillon, France; <sup>2</sup>INSERM CIC 1423, Hôpital des Quinze Vingts, Paris, France; <sup>3</sup>Sans organisation; [yann.lai-tim@onera.fr](mailto:yann.lai-tim@onera.fr)

La microscopie par illumination structurée est une technique d'imagerie permettant d'obtenir super-résolution et sectionnement optique. Nous en développons une méthode adaptée à l'imagerie rétinienne récemment proposée. Dans cette communication, nous présenterons les performances en simulation de cette approche en fonction du niveau de bruit.

11:15 - 11:30

#### Capacité de la caméra rétinienne à optique adaptative rtx1 à voir des évolutions morphologiques des structures rétiniennes sur de très courtes échelles temporelles

**X. Levecq, S. Bucourt, N. Chateau**

Imagine Eyes, France; [xlevecq@imagine-eyes.com](mailto:xlevecq@imagine-eyes.com)

Nous montrerons comment, sur la base de sa caméra rétinienne rtx1 intégrant de l'optique adaptative, Imagine Eyes a développé des outils et une méthodologie d'imagerie permettant de mettre en évidence des évolutions morphologiques de structures rétiniennes sur une échelle temporelle de quelques semaines.

11:30 - 11:45

#### APPROCHES MODULAIRES EN OPTIQUE ADAPTATIVE POUR LA MICROSCOPIE – APPLICATIONS A L'IMAGERIE DE MOLECULE UNIQUE ET A LA MICROSCOPIE CONFOCALE PAR SPINNING-DISK

**F. Harms, A. Jasaitis, J. Cantarini, I. Serre, C. Veilly, X. Levecq, G. Dovillaire, S. Bucourt**

Imagine Optic, France; [fharms@imagine-optic.com](mailto:fharms@imagine-optic.com)

Nous présentons ici les méthodes et paramètres clés relatifs à l'implémentation de l'optique adaptative pour la microscopie. Nous illustrons ces éléments par la réalisation de 2 modules d'OA optimisés pour la localisation 3D de molécule unique et la microscopie confocale de type spinning-disk, adaptables à des microscopes existants.

11:45 - 12:00

#### NOUVEAUTES EN IMAGERIE DE PHASE QUANTITATIVE APPLIQUEE A LA MICROSCOPIE

**B. Wattellier, S. Akoun, A. Federici, A. Saintoyant**

PHASICS, France; [bw@phasics.fr](mailto:bw@phasics.fr)

*Nous présentons différentes avancées en imagerie de phase quantitative en microscopie. Celles-ci couvrent l'imagerie des fibres dans les tissus, la métrologie d'indice dans les milieux transparents ainsi que l'imagerie et le contrôle thermique à l'échelle microscopique.*

12:00 - 12:15

#### Vers la sismologie cellulaire

**S. Catheline**<sup>1</sup>, A. Zorgani<sup>1</sup>, P. Grasland-Mongrain<sup>1,2</sup>, S. Nakagawa<sup>2</sup>, S. Bernard<sup>2</sup>, G. Cloutier<sup>2</sup>, G. Fitzharis<sup>2</sup>

<sup>1</sup>INSERM, Université de Lyon, France; <sup>2</sup>LBMU, Université de Montreal, Quebec; [stefan.catheline@inserm.fr](mailto:stefan.catheline@inserm.fr)

Pour élaborer une image d'élasticité cellulaire sous microscope par une approche ondulatoire quantitative, il fallait lever trois verrous technologiques : - générer des vibrations au moyen d'une micropipette, - les détecter par une méthode optique, - enfin en extraire des cartes d'élasticité. L'élastographie cellulaire est née (PNAS Janvier 2018).

12:15 - 12:30

#### Table ronde

**V. Michau**<sup>1</sup>, S. Bucourt<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ONERA, France; <sup>2</sup>IMAGINE-OPTIC, France; [Vincent.Michau@onera.fr](mailto:Vincent.Michau@onera.fr)

Table ronde sur le biomédical

## 07-A: Session Orale JRIOA #2

Heure: Vendredi, 06.07.2018: 8:30 - 10:30 · Salle: Amphi Fermat

Télécommunications optiques puis Astronomie

8:30 - 8:45

### Caractérisation temporelle d'un canal atmosphérique urbain pour les communications optiques sans fil

**C. Sauvage<sup>1,2</sup>, C. Robert<sup>1</sup>, B. Sorrente<sup>1</sup>, D. Erasme<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>DOTA, ONERA, Université Paris Saclay, France; <sup>2</sup>LTCI, Télécom ParisTech, Université Paris-Saclay, France;

[chloe.sauvage@onera.fr](mailto:chloe.sauvage@onera.fr)

Les télécommunications sans fil sont fragiles sous certaines conditions météo en particulier le brouillard. Nous avons donc cherché à savoir quelle longueur d'onde se transmet le mieux à faible visibilité. La caractérisation d'un canal de propagation nébuleux urbain réel a permis d'extraire un temps caractéristique d'évolution de l'intensité reçue.

8:45 - 9:00

### Impact du canal sur les transmissions satellites - sol corrigées par optique adaptative en détection cohérente.

**L. Paillier<sup>1</sup>, J.-M. Conan<sup>1</sup>, N. Védrenne<sup>1</sup>, R. Le Bidan<sup>2</sup>, G. Artaud<sup>3</sup>, Y. Jaouen<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>DOTA, ONERA, Université Paris Saclay F-92320 Châtillon, France; <sup>2</sup>IMT-Atlantique, UMR CNRS 6285 Lab-STICC

Technopôle Brest Iroise, CS 83818, 29238 Brest, France; <sup>3</sup>CNES, 18 Avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France; <sup>4</sup>LTCI, Télécom ParisTech, Université Paris-Saclay, 75013 Paris, France; [laurie.paillier@onera.fr](mailto:laurie.paillier@onera.fr)

Pour répondre au besoin croissant en débit posé par les liens optiques satellites - sol, l'exploitation de la modulation cohérente est envisagée. Elle permet de bénéficier d'une meilleure efficacité spectrale, mais est potentiellement sensible à l'influence du canal. Ces effets sont étudiés pour un signal descendant corrigé par optique adaptative.

9:00 - 9:15

### Première lumière du système d'optique adaptative CIAO au Pic du midi

**G. Dovillaire<sup>1</sup>, F. Colas<sup>2</sup>, J.-L. Dauvergne<sup>3</sup>, M. Delcroix<sup>4</sup>, J. Lecacheux<sup>5</sup>, C. Rondeau<sup>1</sup>, R. Juvénal<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Imagine Optic, France; <sup>2</sup>S2P, IMCCE, CNRS, Observatoire de Paris, France; <sup>3</sup>Association T1M – S2P, France; <sup>4</sup>Association T1M – S2P - SAF, France; <sup>5</sup>S2P, LESIA, Observatoire de Paris, France; [gdovillaire@imagine-optic.com](mailto:gdovillaire@imagine-optic.com)

Le télescope T1M du Pic du midi est connu mondialement pour la qualité des images planétaires obtenues. Afin d'améliorer les techniques d'imagerie, nous développons un système d'optique adaptative innovant. Ce système compact et abordable financièrement pourrait intéresser de nombreux observatoires équipés de télescopes entre 0.5 et 2m de diamètre.

9:15 - 9:30

### Low light level quadriwave lateral shearing interferometer for in-situ wavefront sensing in flight

**B. Wattellier**

PHASICS, France; [bw@phasics.fr](mailto:bw@phasics.fr)

The balloon-based GHAPS telescope is designed to correct for rigid body motion of the secondary mirror based upon wavefront sensing from reference stars. A study was conducted to determine the feasibility to use a quadriwave interferometer in low light conditions. We demonstrate a precision of 5 nm RMS with an irradiance of a magnitude 7 star.

9:30 - 9:45

### Optimisation de systèmes à miroirs déformables multiples pour la correction des aberrations de phase et d'amplitude

**P. Baudoz**

LESIA - Observatoire de Paris, France; [Pierre.Baudoz@obspm.fr](mailto:Pierre.Baudoz@obspm.fr)

L'imagerie à Très Haute Dynamique (ITHD) est indispensables pour obtenir des images de planètes. Elles requiert cependant la correction des aberrations d'amplitude et de phase. Nous présenterons une méthode pour corriger phase et amplitude simultanément ainsi que des résultats de laboratoire obtenus sur le banc de R&D du LESIA (banc THD2).

9:45 - 10:00

### MYOPIC DECONVOLUTION OF PARTIALLY AO-CORRECTED IMAGES USING PARAMETRIC PSF MODEL

**T. Fusco<sup>1</sup>, R. Fetick<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ONERA, France; <sup>2</sup>LAM, France; [romain.fetick@lam.fr](mailto:romain.fetick@lam.fr)

We show and quantify the great improvement on deconvolution using parametric PSF, and we exhibit the stability of deconvolution with respect to the PSF's parameters. We apply this approach to SPHERE images acquired in the visible. Such a new deconvolution process is also essential for high resolution LEO satellite imaging.

**10:00 - 10:15**

### **COMPENSATION MODALE DU GAIN OPTIQUE POUR LES ANALYSEURS PYRAMIDE**

**V. Deo<sup>1</sup>, E. Gendron<sup>1</sup>, G. Rousset<sup>1</sup>, F. Vidal<sup>1</sup>, T. Buey<sup>1</sup>, M. Cohen<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>LESIA, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, Univ. Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, 5 place Jules Janssen, 92195 Meudon, France; <sup>2</sup>GEPI, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, 5 place Jules Janssen, 92195 Meudon, France; [vincent.deo@obspm.fr](mailto:vincent.deo@obspm.fr)

Les analyseurs de front d'onde Pyramide subissent une baisse de sensibilité en conditions opérationnelles par rapport au régime de calibration, appelée le Gain Optique. Nous proposons et étudions la performance d'une approche modale, linéaire, pour la mesure et la compensation de ce gain optique en fonction des conditions atmosphériques.

**10:15 - 10:30**

### **ETOILES LASER DU TELESCOPE EUROPEEN « E-ELT »**

**N. Moussaoui, F. Djaidri, S. Boufas, Z. Ouanoufi**

Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Algérie; [nmoussaoui@usthb.dz](mailto:nmoussaoui@usthb.dz)

Nous présentons nos travaux de recherche dans le domaine des étoiles artificielles: sodium LGS<sup>s</sup>. Ces étoiles sont générées par l'interaction de faisceaux laser avec les atomes de sodium présents dans la mésosphère. Nous allons nous intéresser en particulier, dans le cadre de ce travail, au cas du futur télescope européen : l'E-ELT.

## O8-A: Session Orale JRIOA #3

Heure: Vendredi, 06.07.2018: 11:00 - 12:30 · Salle: Amphi Fermat

Espace

**11:00 - 11:30**

Invitée

### Active optics as enabling technology for future large missions: current developments for Astronomy and Earth Observation at ESA

**P. Hallibert**

European Space Agency, Pays Bas; [pascal.hallibert@esa.int](mailto:pascal.hallibert@esa.int)

A trend for higher resolution has recently increased the entrance apertures of future space optical payloads, resulting in new optomechanical challenges. Active Optics constitutes an enabling technology for large optical space instruments. We present here an overview of our activities and perspectives on technological maturity and future missions.

**11:30 - 11:45**

### DEVELOPPEMENTS TECHNOLOGIQUES POUR LES FUTURES MISSIONS NASA WFIRST ET ETUDES LUVOIR/HABEX DU DECADAL 2020

**M. Ferrari**

Laboratoire d'Astrophysique de Marseille, France; [marc.ferrari@lam.fr](mailto:marc.ferrari@lam.fr)

L'instrument CGI de la mission WFIRST servira de démonstrateur technologique pour les futures missions de caractérisation d'exo-Terres, telles que LUVOIR et HabEx étudiées dans le Decadal NASA 2020. Nous présenterons le contexte des ces missions, les technologies clés, leurs niveaux de maturité et les feuilles de route de développements envisagées.

**11:45 - 12:00**

### Miroir déformable électro-mécanique pour application spatiale

**S. Theis<sup>1</sup>, L. Ropert<sup>1</sup>, V. Costes<sup>2</sup>, L. Cadiergues<sup>2</sup>, P. Sauvageot<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ISP SYSTEM, ZI de la Herray, 65500 Vic-en-Bigorre, France; <sup>2</sup>CNES, 18 Avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France; [sebastien.theis@isp-system.fr](mailto:sebastien.theis@isp-system.fr)

ISP SYSTEM a réalisé un miroir déformable à actionneurs mécaniques pour applications spatiales de type télescope d'observation. Il permet la correction de front d'onde et la compensation des aberrations dues à la réalisation et l'alignement des optiques, et aux effets thermo-mécaniques liés à l'orbite. Le design et les performances sont présentés.

**12:00 - 12:15**

### L'optique active au CNES

**V. Costes**

CNES, France; [vincent.costes@cnes.fr](mailto:vincent.costes@cnes.fr)

Le CNES prépare la future génération de satellite optique à très haute résolution angulaire. Présentation sur l'intérêt de l'optique active et les développements technologiques menés par le CNES.

**12:15 - 12:30**

### ÉTUDE DE LA DEGRADATION DE SYSTEMES OPTIQUES DUE AU CHANGEMENT D'INDICE DE REFRACTION INDUIT PAR RADIATIONS IONISANTES AU MGY

**C. Muller<sup>1,2</sup>, T. Lépine<sup>2</sup>, T. Allanche<sup>2</sup>, P. Paillet<sup>1</sup>, V. Goiffon<sup>3</sup>, Y. Ouerdane<sup>2</sup>, A. Boukenter<sup>2</sup>, S. Girard<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>CEA DIF, France; <sup>2</sup>Univ-Lyon, Laboratoire Hubert Curien; <sup>3</sup>ISAE Supaero; [cyprien.muller@institutoptique.fr](mailto:cyprien.muller@institutoptique.fr)

Les radiations ionisantes peuvent induire un changement d'indice des verres, donc une défocalisation, qu'on ne peut corriger car il n'existe aucun système motorisé résistant aux radiations. Il faut donc étudier la tenue d'un objectif aux changements d'indices dès sa conception. Nous étudions aussi le wavefront coding comme solution à ce problème.

# Active optics as enabling technology for future large missions: current developments for astronomy and Earth observation at ESA

Pascal Hallibert\*

ESA/ESTEC, Keplerlaan 1, NL-2200 AG, Noordwijk, The Netherlands

\*pascal.hallibert@esa.int; [www.esa.int](http://www.esa.int)

## 1 INTRODUCTION

The current trend for higher image resolution, and therefore larger entrance apertures for space optical systems, has prompted the study of novel technologies that can improve the imaging performance beyond what is currently achievable by classical optical systems.. Based on the synergy between 3 key technological building blocks, Active Optics is a prime example of such enabling technologies for large optical instruments, articulated around the following elements:

- Corrective element (e.g. deformable mirror, tip/tilt mirror),
- Wave front sensing system,
- Algorithms for correction calculation (based on wave front sensing results) and control of the correction element.

The clear and decisive advantages of Active Optics for optical space systems have been listed and covered in previous literature (see [10]). From correction of in-flight effects (e.g. thermo-elastic deformations, radiation effects on optical materials, gravity release of ultra-lightweighted mirrors, etc.) and reduction of manufacturing complexity (e.g. compensating residual surface figuring errors, relaxing requirements on structure stability), Active Optics is identified by ESA as a key enabler for the improvement of high-resolution imaging capabilities of future missions (namely for optical systems involving large mirrors, either monolithic or segmented) and constitutes a crucial generic technology able to find applications in all classes of optical instruments.

In terms of technological developments at the European Space Agency, concepts and demonstrators for corrective components (e.g. deformable mirrors) for space applications have already been initiated and presented, both for correction directly on the primary mirror and at a conjugate plane of the primary mirror (see [1][2][3][4]).

Furthermore concepts for the complete active correction chain in the frame of either large science missions (typ. L2 UV-VIS-NIR telescope) or geostationary Earth observation applications (ie: maritime security, environmental survey,...) are currently been explored at the Optics Section of ESA's Directorate of Technical and Quality Management (D/TEC) in the frame of 2 parallel TRP ("basic Technology Research Program") contracts ("Active Correction Chain for large monolithic mirror"), exploring namely the technology performing the sensing of the aberrated wave front, and the strategy to pilot the corrective elements based on the wave front sensing results. The current status of these 2 parallel contracts is presented below.

## 2 ACTIVE CORRECTION CHAIN FOR LARGE MONOLITHIC MIRRORS

In 2014, a TRP activity was initiated in order to develop and demonstrate an active optics correction chain for large monolithic mirrors comprising the three key technological building blocks of active optics: corrective element (e.g. deformable mirror), wave front sensing technique and correction&control algorithm.

We remind hereafter the goals of this activity labelled "Active Correction Chain for large monolithic mirror":

- Trading off strategies and concepts for wavefront or PSF sensing inside an optical space instrument (e.g. through a dedicated wave front sensor chain or through the PSF information from the instrument sensor itself by use of e.g. phase diversity), therefore enabling wave front correction by active optics for typical large mirror deformations in space environment,
- Identify and trade-off novel or upgraded deformable element concepts in order to develop the next generation of corrective elements for large monolithic mirrors and to increase the technological offer regarding deformable components,
- Identification and development of algorithms to efficiently pilot the deformable component based on the chosen wavefront/PSF sensing strategy,
- Development of a complete wave front correction chain based on the findings regarding the 3 chain components,.
- Validation of the whole Active Optics chain through a breadboard combining all selected technologies/strategies.

Two parallel contracts were issued in 2015 for this activity, allowing the benefits of 2 different approaches for this vast promising topic.

After the first step of both studies (leading to the System Requirement Review) it was decided to fit each chosen concepts to relevant applications: Earth Observation from geostationary orbit (linked to GEO-HR mission study requirements) and L2 Space telescope mission, both constituting the typical cases where very large mirrors would be needed, therefore requiring active optics as mission enabler. A summary of their current status is presented below.

## 2.1 ACTIVE OPTICS CORRECTION CHAIN FOR SPACE MISSIONS

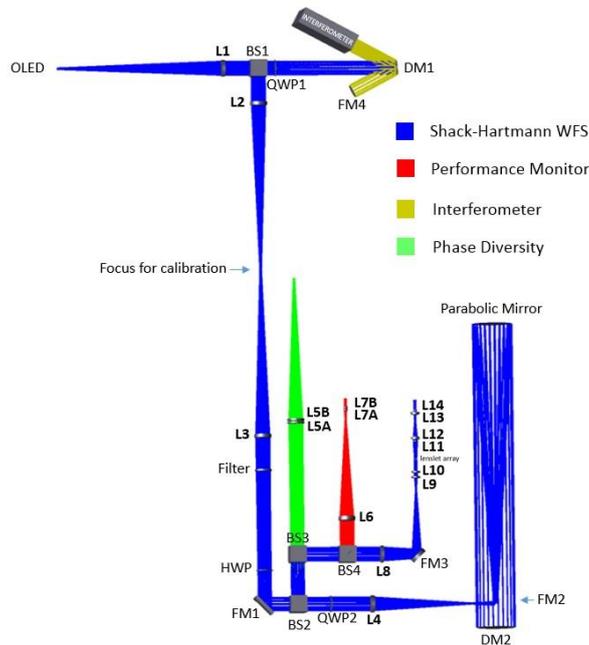
This study is currently being carried out by a team consisting of TNO (Netherlands) as prime with partners Airbus DS (France), Durham University (United Kingdom), RUAG (Switzerland) and NOVA (Netherlands).

This study has successfully passed Preliminary Design Review, validating the correction chain concept in the frame of a geostationary Earth Observation type of missions, as well as the Critical Design Review for the demonstrator breadboard design. It is now heading towards TRR of the Breadboard of the correction chain.

The baseline design for the AO system architecture, focused on an Earth Observation type mission with a large (3.5 m) M1 can be summarized as:

- A. A flat active mirror is positioned at a ‘conjugate’ pupil plane and performs the active wavefront correction.
- B. A Shack-Hartmann type wavefront sensor is positioned in the AO closed-loop.
- C. A focal-plane wavefront sensor is used to calibrate the Shack-Hartmann sensor.

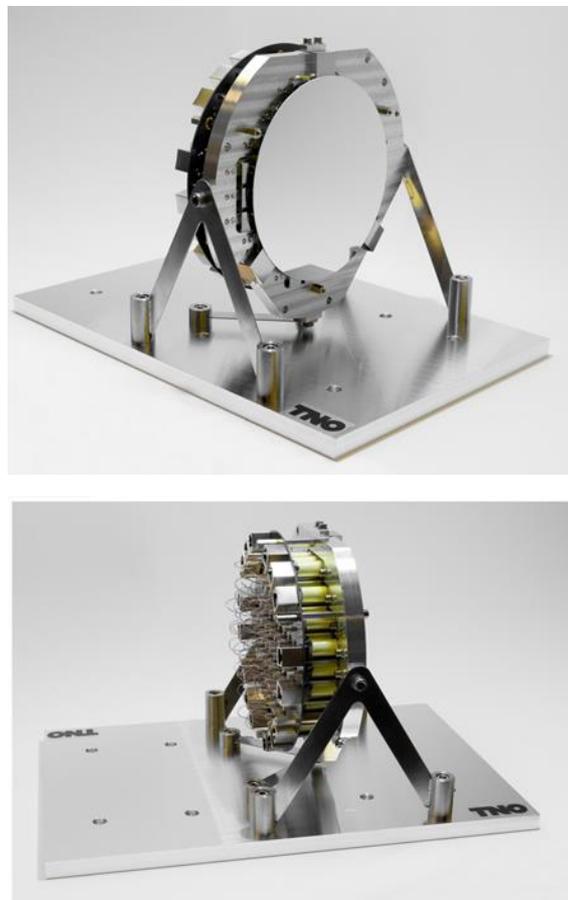
A representative laboratory set-up is currently under construction to verify the correction performance of the Space AO system; also see [7]. Figure 1 shows the optical lay-out of the set-up.



**Figure 1: Optical lay-out of the experimental set-up for verification of the Space AO system performance.**

## 3. Deformable Mirror

TNO has designed and realized a prototype Deformable Mirror for this application. The version suited for the laboratory testing is shown in Fig.x2. This DM has a mirror surface of  $\text{Ø}160\text{mm}$  with a square grid of 57 actuators with a spacing of 18mm underneath. The face sheet has a thickness of 1mm and is made of fused silica. The maximum stroke equals  $40\ \mu\text{m}$  (PV) and the inter-actuator stroke is  $10\ \mu\text{m}$ ; which is more than sufficient for this application. The variable reluctance actuator has a highly linear response behavior ( $> 99\%$ ). The power dissipation is less than 10 mW per actuator. Further details can be found in [5]. Reliability is one of the most critical aspects for active components in space applications, which will particularly hold for such complex and mission critical components as a deformable mirror. The electro-magnetic actuators are inherently very reliable due to the lack of wear and aging. On top of that the actuator coils and drive electronics can be duplicated for redundancy without significant impact on the rest of the structure or increase in mass.

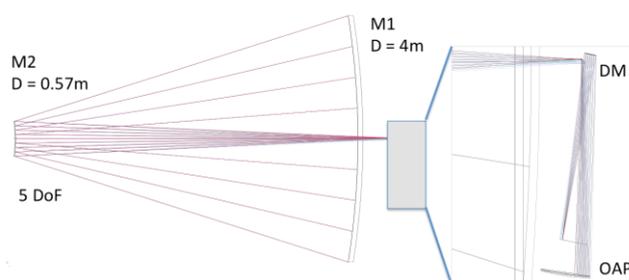


**Figure 2 :Picture of the electro-magnetically actuated Deformable Mirror for breadboard testing**

## 2.2 SPACE TELESCOPE OPTICAL IMAGE CORRECTOR (STOIC)

Monolithic mirror telescopes can provide excellent image quality and are less risky than segmented mirror solutions. The largest monolithic mirror that can currently be launched would have a diameter of approximately 4m. While less ambitious than other proposals for large UVOIR telescopes, such a telescope would be a natural successor to the Hubble Space Telescope, having almost three times the collecting area and 1.7 times smaller diffraction limit. We refer to this concept as HYPATIA (see [9]). It could be used for general astrophysics, or for exoplanet detection, using either an internal coronagraph or an external starshade.

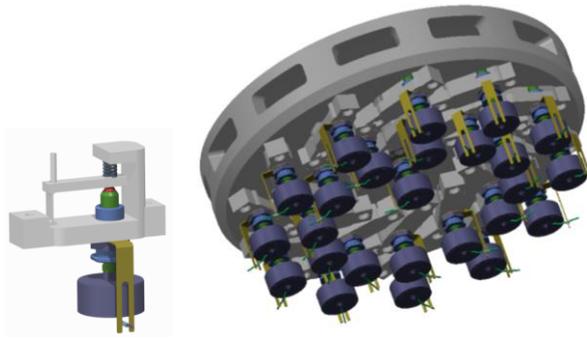
The space telescope concept, which is intended to operate within the UVOIR wavelength range, is referred to as Hypatia, and the active optics system as STOIC (Space Telescope Optical Image Corrector).



**Figure 3: Concept for 4m Hypatia Active Space Telescope**

In this baseline, the telescope is a 4-m Ritchey-Chrétien design followed by an off-axis parabola to image the primary mirror onto the deformable mirror. The optical quality would be guaranteed by an active optics system either actuating directly on the primary mirror or using a deformable mirror. The latter option is developed in the STOIC (Space Telescope Optical Image Corrector) project (see 4). Tip-tilt and defocus are corrected by positioning the secondary mirror, and the primary mirror is re-imaged onto a deformable mirror using an off-axis parabola.

The deformable mirror has a spherical surface ( $R=2.8\text{m}$ ) in order to reduce the number of surfaces. The chosen actuator technology is a linear motor (Piezoknob, Janssen Precision Engineering); these have set-and-forget characteristics, compatible with infrequent actuation (JWST will have monthly actuation). The design is at an advanced stage, and is shown schematically in Figure 4.



**Figure 4 “Piezoknob” actuator acting on gear (left) and layout of 25 actuators in the proposed STOIC mirror.** The wavefront sensing, control and correction concepts of STOIC will be verified using a dedicated breadboard, the design of which is complete and will be presented during the coming Critical Design Review. In particular, the breadboard will contain a scaled curved deformable mirror. The breadboard is currently under construction and the test campaign is foreseen in the second quarter of 2018.

### 3 CONCLUSIONS

The activities status in this paper provide an overview of the state of research in ESA about Active Optics for space instruments, in particular for correction of large lightweighted monolithic mirrors.. The results already achieved by the component-level technological developments as well as the current status of the full correction chain design and breadboarding activities show that different implementations of Active Optics are on their way to quickly reach maturity for space applications, able to solve or drastically reduce the impact of launch and commissioning of large optical payloads (gravity release, moisture release, micro-slippage,...) as well as regular space environmental factors ( thermo-elastic deformations, radiations,...).

Other activities currently planned at ESA will further ensure the maturity of the technologies and strategies already initiated, in order to be directly usable by future missions and to extend the current work on monolithic mirrors to the specific issues encountered by deployable optical systems, in particular in the frame of exo-Earths detection and characterization and high resolution Earth observation from e.g. geostationary orbit.

- [1] Rausch P., Verpoort S., and Wittrock U., “Unimorph deformable mirror for space telescopes: environmental testing,” *Opt. Express* 24(2), 1528-1542 (2016).
- [2] Rausch P., Verpoort S., and Wittrock U., “Unimorph deformable mirror for space telescopes: design and manufacturing,” *Opt. Express* 23(15), 19469-19477 (2015).
- [3] Briguglio, R., Arcidiacono, C. & al.: Proc. of the SPIE, Vol 9904, (2016)
- [4] Briguglio, R., Biasi, R., & al.: Proc. of the SPIE, Vol 9904, (2016)
- [5] Kuiper S., Doelman N., et al. “Electromagnetic DM development at TNO”, SPIE Conference 9912, Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation, (2016).
- [6] N. Devaney, C. Reinlein et al ‘Hypatia and STOIC: an active optics system for a large space telescope’, SPIE Conference 9904, Space Telescopes and Instrumentation 2016: Optical, Infrared, and Millimeter Wave, Edinburgh 2016
- [7] Calcines A., Bitenc, U. et al., “*Preliminary Optical Design of an Active Optics Test Bench for Space Applications*”, Proceedings of the XII Scientific Meeting of the Spanish Astronomical Society, Bilbao, Spain, (2016).
- [8] Stark, C. Cady, E.J., Clampin, N., Domagal-Goldman, S., Lisman, D., Mandell, A.M., McElwain, M.W., Roberge, A., Robinson, T.D., Savransky, D., Shaklan, S.B., Stapelfeldt, K.R. *Proc. SPIE. 9904*, 99041U, (2016)
- [9] Devaney, N., Goncharov, A., Goy, M., Reinlein, C., Lange, N., “HYPATIA – a 4m active space telescope. Concept and Capabilities” , International Conference on Space Optics, Biarritz (2016)
- [10] Hallibert P., Zuccaro Marchi A., “Developments in active optics for space instruments: an ESA perspective”, Proc SPIE 9912, Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation II, Edinburgh (2016)

### ACKNOWLEDGEMENTS

The author gratefully acknowledges the invaluable support and input given by the teams involved in the projects mentioned above, in particular Prof. Doelman and Dr Kuiper from TNO (Netherlands) for the study “Active optics Correction Chain for space missions”, and Prof. Devaney from NUIG (Ireland), Dr Reinlein and Mr Goy from IOF (Germany) regarding the STOIC study.

# APPROCHES MODULAIRES EN OPTIQUE ADAPTATIVE POUR LA MICROSCOPIE – APPLICATIONS A L'IMAGERIE DE MOLECULE UNIQUE ET A LA MICROSCOPIE CONFOCALE PAR SPINNING-DISK

Fabrice Harms<sup>1</sup>, Audrius Jasaitis<sup>1</sup>, Julia Cantarini<sup>1</sup>, Isabelle Serre<sup>1</sup>, Cynthia Veilly<sup>1</sup>, Xavier Levecq<sup>1</sup>, Guillaume Dovillaire<sup>1</sup>, Samuel Bucourt<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Imagine Optic, 18 rue Charles de Gaulle, 91400 Orsay, France*

[contact@imagine-optic.com](mailto:contact@imagine-optic.com)

## RÉSUMÉ

L'Optique Adaptative (OA) a depuis plusieurs décennies démontré sa capacité à corriger les défauts du front d'onde et ainsi améliorer les performances d'un système d'imagerie associé, que ce soit dans le domaine pionnier de l'astronomie, ou plus récemment pour d'autres applications en ophtalmologie ou en microscopie. Nous présentons ici les méthodes et paramètres clés relatifs à l'implémentation de l'optique adaptative pour la microscopie. Nous illustrons ces éléments par la réalisation de 2 modules d'OA optimisés pour la localisation 3D de molécules uniques et la microscopie confocale de type spinning-disk, adaptables à des microscopes existants.

**MOTS-CLEFS :** *optique adaptative ; microscopie*

## 1. INTRODUCTION

De nombreuses modalités de microscopie, en particulier pour le vivant, peuvent bénéficier d'une amélioration significative de leurs performances par l'utilisation de l'Optique Adaptative (OA), corrigeant les défauts de front d'onde des systèmes optiques et échantillons, en particulier en profondeur. Cependant, la mise en œuvre spécifique de cette technologie pour la microscopie nécessite de nombreuses adaptations et optimisations par rapport à son implémentation historique en observation astronomique [1].

En particulier, les caractéristiques spatio-temporelles des variations du front d'onde pour des échantillons biologiques, la capacité à définir un point source en profondeur dans un échantillon, les propriétés de diffusion de l'échantillon ont un impact direct sur l'approche d'OA optimale à mettre en œuvre dans un système de microscopie.

## 2. STRATEGIES DE MISE EN ŒUVRE DE L'OA POUR LA MICROSCOPIE

L'OA est basée sur la rétroaction entre une estimation du front d'onde et un moyen de modulation (correction) du front d'onde mesuré. Les diverses stratégies de mise en œuvre de l'OA pour la microscopie diffèrent essentiellement dans la manière dont la mesure/estimation du front d'onde est effectuée, ainsi que des contraintes imposées par la modalité de microscopie employée. Lorsqu'il n'est pas possible de disposer d'un point source définissant un front d'onde unique, ce dernier est estimé de manière indirecte par usage d'algorithmes itératifs, basés l'acquisition de plusieurs images suivant l'introduction d'aberrations connues et sur une métrique de qualité d'image ; un analyseur de front d'onde n'est dans ce cas pas nécessaire mais la méthode introduit des étapes d'imageries supplémentaires non adaptées à l'imagerie dynamique du vivant (ex : bleaching). L'OA en boucle fermée nécessite l'usage d'un analyseur, et, dans le cas du Shack-Hartmann, d'un point source : plusieurs stratégies ont été développées, en particulier en microscopie de fluorescence à 2 photons ou à feuille de lumière, avec ou sans l'introduction de billes fluorescentes servant de point source. Enfin, pour certaines modalités de microscopie, en particulier pour la microscopie de fluorescence, l'OA en boucle ouverte, sous réserve d'une bonne linéarité et stabilité, permet d'améliorer significativement le signal collecté, et/ou de diminuer la phototoxicité.

### 3. MODULES D'OA POUR LA LOCALISATION 3D DE MOLECULE UNIQUE ET LE SPINNING-DISK

En imagerie de molécule unique, la mise en forme spécifique de la PSF (Point Spread Function) permet d'encoder spatialement la profondeur selon Z, par l'intermédiaire de cartes de phases dont les figures de PSFs varient axialement de manière unique. De plus, la localisation en Z selon ce principe nécessite, pour être optimale, la correction des aberrations introduites par les défauts résiduels de front d'onde du microscope et du couplage objectif/échantillon [2,3]. Nous avons développé un système modulaire d'OA permettant, en se basant sur une optimisation de la PSF en surface d'un échantillon par algorithmes itératifs basés sur l'image, de remplir ces 2 fonctions, compatibles avec les systèmes PALM/STORM existants.

Dans le cas de l'imagerie confocale par spinning disk, l'amélioration de la qualité d'image et/ou de la profondeur d'imagerie (augmentation du signal) par OA doit pour être optimale ne pas être réalisée au détriment de la vitesse d'acquisition, avantage majeur de la méthode. Nous avons développé une approche d'OA basée sur un modèle d'évolution axiale des aberrations (en particulier pour l'aberration sphérique) permettant 1. la correction des défauts résiduels de front d'onde du système optique 2. la correction des aberrations introduites par l'échantillon selon Z, sans impact sur la vitesse d'acquisition [4].

### CONCLUSION

L'optique adaptative permet d'améliorer les performances d'imagerie de la majorité des modalités de microscopie. Il existe de nombreuses stratégies de mises en œuvre de l'OA, chaque modalité de microscopie pouvant bénéficier d'une mise en œuvre optimale. Nous avons par exemple développé des modules d'OA spécifiques à l'imagerie de molécule unique et au spinning-disk, adaptables à des systèmes existants, et permettant d'envisager une généralisation de l'OA comme méthode d'amélioration des performances d'imagerie en microscopie.

### REFERENCES

- [1] Booth M., Adaptive optical microscopy: the ongoing quest for a perfect image, *Nature, Light: Science & Applications*, 3, e165 (2014)
- [2] I. Izeddin, M. El Beheiry, J. Andilla, D. Ciepielewski, X. Darzacq, M. Dahan. (2012) "PSF shaping using adaptive optics for three-dimensional single-molecule super-resolution imaging and tracking." *Opt. Express*, 20, 4957–4967
- [3] K. F. Tehrani, J. Xu, Y. Zhang, P. Shen, P. Kner (2015) "Adaptive optics stochastic optical reconstruction microscopy (AO-STORM) using a genetic algorithm." *Opt. Express*, 23, 13677-13692
- [4] Fraasier V., Clouvel G., Jasaitis A., Dimitrov A., Piolot T., Salamero J. Adaptive optics in spinning disk microscopy: improved contrast and brightness by a simple and fast method. *J. Microsc.* 259, 219-227 (2015)

# CARACTÉRISATION TEMPORELLE D'UN CANAL ATMOSPHÉRIQUE URBAIN POUR LES COMMUNICATIONS OPTIQUES SANS FIL

Chloé Sauvage<sup>1, 2</sup>, Clélia Robert<sup>1</sup>, Béatrice Sorrente<sup>1</sup>, Didier Erasme<sup>2</sup>

<sup>1</sup> DOTA, ONERA, Université Paris Saclay F-92320 Châtillon - France

<sup>2</sup> LTCI, Télécom ParisTech, Université Paris-Saclay, 75013 PARIS, France

chloe.sauvage@onera.fr

## RÉSUMÉ

Les télécommunications sans fil sont très fragiles sous certaines conditions météorologiques en particulier le brouillard. Nous avons donc cherché à savoir quelle longueur d'onde se transmet le mieux à faible visibilité. La caractérisation d'un canal de propagation nébuleux urbain réel a permis d'en extraire un temps caractéristique d'évolution de l'intensité reçue.

**MOTS-CLEFS :** *communications optiques en espace libre (FSO) ; canal atmosphérique ; scintillation ; analyseur de Shack Hartmann.*

## 1. INTRODUCTION

De nombreux domaines d'applications s'ouvrent aux télécommunications optiques sans fil ; cette technologie est donc en plein développement [1] car elle possède de multiples avantages comme une rapidité de déploiement en haut débit et l'absence de saturation du spectre optique a contrario de celui des RF. Cependant le canal de propagation atmosphérique est soumis à différents phénomènes physiques comme la turbulence, qui dégrade le lien à longue distance. De plus, les phénomènes météo comme le brouillard, la pluie, la brume soumettent le lien optique à différents effets de diffusion (Rayleigh et Mie [2]) diminuant drastiquement la qualité de la transmission [3].

## 2. TRANSMISSION ATMOSPHÉRIQUE ET CHOIX DE LA LONGUEUR D'ONDE

La transmission d'une communication à travers l'atmosphère dépend de nombreux paramètres comme la météo, la composition des aérosols, ou bien encore la longueur d'onde. Ce dernier paramètre étant un des rares qu'il est possible de maîtriser, une partie de la solution pour pallier les problèmes de transmission est le choix de la longueur d'onde de travail [4].

Avec le logiciel de transfert radiatif MATISSE [5] nous avons choisi de comparer trois longueurs d'onde bien transmises :  $1,55 \mu\text{m}$ ,  $3,96 \mu\text{m}$  et  $10,05 \mu\text{m}$ , en étudiant particulièrement les faibles visibilités (la visibilité est un paramètre qui caractérise l'opacité atmosphérique).

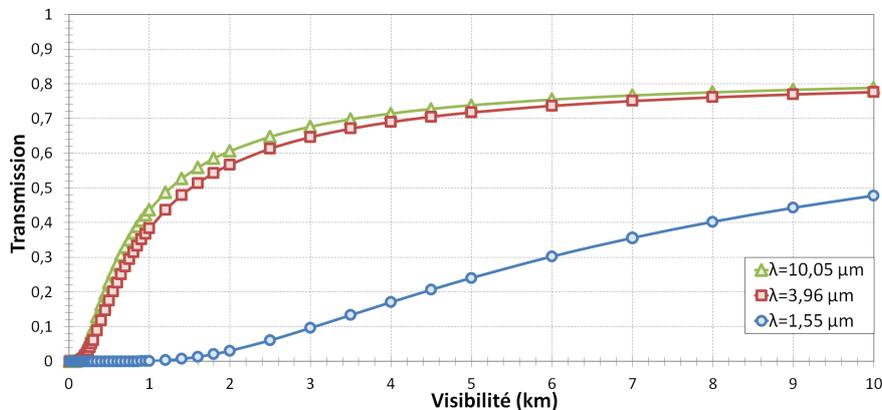


FIGURE 1 : Comparaison de la transmission en fonction de la visibilité pour trois longueurs d'onde différentes. Ligne de visée horizontale de 10 km en hiver et à latitude moyenne en présence d'aérosols troposphériques d'hiver.

Pour un climat donné, on voit sur la figure 1 comment évolue le taux de transmission en fonction de la visibilité de l'atmosphère. On peut remarquer que lorsque la visibilité diminue la transmission aux longueurs d'onde de 3,96 et 10,05  $\mu\text{m}$  est meilleure qu'à 1,55  $\mu\text{m}$ . On peut noter par exemple que pour un ligne de visée de 10 km et une visibilité de 200 m (brouillard épais), la longueur d'onde de 1,55  $\mu\text{m}$  est totalement atténuée, alors que pour 3,96 et 10,05  $\mu\text{m}$  les taux de transmission sont de -17 et -15 dB. Bien que les performances à 10,05  $\mu\text{m}$  soient meilleures, la maturité des composants système ainsi que la disponibilité de mesures d'intensité enregistrées sur un canal atmosphérique urbain, nous ont amené à privilégier l'étude à la longueur d'onde de 3,96  $\mu\text{m}$ .

### 3. MÉTHODE DE CARACTÉRISATION DU CANAL ATMOSPHÉRIQUE

L'expérimentation SCINDAR (SCINtillation Detection And Ranging) a consisté à utiliser un analyseur de Shack Hartmann fonctionnant entre 3,4  $\mu\text{m}$  et 4,2  $\mu\text{m}$  et visant deux sources halogènes séparées horizontalement de 1 m, situées à 4,2 km du récepteur [6]. Cet analyseur de front d'onde échantillonne spatialement la pupille avec 25 sous-pupilles réparties en matrice 5x5 dont 20 sont exploitables. Les données acquises par beau temps sec ont été utilisées pour caractériser la turbulence atmosphérique [6]. Les données analysées pour cette étude ont été enregistrées le 19 octobre 2015, un jour où le ciel était couvert avec des visibilités variables allant de 6 à 12 km entre 11h00 et 15h00. Ici sont caractérisés spatialement et temporellement  $2 \times 20 = 40$  sous-canaux collectés par les 20 sous-pupilles visant les 2 sources sous la forme de séries temporelles d'intensité. Cette méthode de caractérisation du canal de propagation complète la caractérisation statique du canal entre deux points avec le logiciel MATISSE.

### 4. RÉSULTATS : TEMPS DE COHÉRENCE DE LA SCINTILLATION

L'analyse des données a porté sur 4 heures d'expérimentation, révélant des fluctuations de l'intensité (i.e. scintillation). Avec un découpage par tranche de 30 minutes, nous avons effectué l'auto-corrélation du signal de l'intensité collectée pour les 40 sous-canaux. Nous avons calculé la largeur à mi-hauteur de chaque courbe d'autocorrélation. Cette durée  $\Delta t$  nous renseigne sur la période durant laquelle le signal reste semblable à lui-même. Sur la figure 2 est représentée l'évolution temporelle de la moyenne des  $\Delta t$  pour chaque source avec leur écart-type.

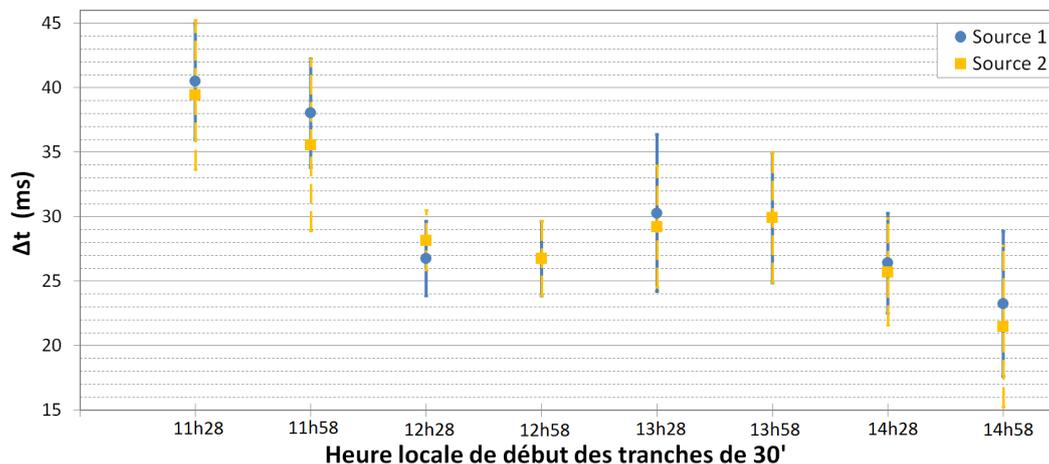


FIGURE 2 : Évolution temporelle de la moyenne des temps de cohérence ( $\Delta t$ ) pour chaque source.

Globalement pour les 40 sous canaux les différents  $\Delta t$  diminuent de 45 ms à 15 ms sur une durée de 4 heures. On rappelle que les valeurs du temps de cohérence du front d'onde turbulent, par temps clair, sont comprises entre 0,1 ms et 10 ms [7]. Nos résultats indiquent que la constante de temps du canal est au maximum deux ordres de grandeur au dessus du temps de cohérence de la turbulence. Avec ces mêmes données, nous prévoyons de caractériser la durée d'évanouissement (i.e. temps passé par le signal de communication en dessous du seuil de détection), en moyenne, en fréquence et distribution cumulée.

## CONCLUSION

Cette étude a permis de confirmer que la longueur d'onde  $3,96 \mu\text{m}$  était bien transmise, sur des distances importantes (10 km), et sous des conditions de faible visibilité ( $\leq 1$  km typique du brouillard). Le traitement des données SCINDAR a permis une première caractérisation temporelle du canal atmosphérique urbain avec un temps de cohérence de la scintillation de plusieurs dizaines de ms. Ce temps de cohérence est compris entre 15 ms et 45 ms pour 4 km de propagation entre 2 points hauts situés à 40 m du sol, par temps couvert et de visibilité variable entre 6 et 12 km. L'exploitation de la base de données acquise sous plusieurs conditions météo (turbulence, temps couvert, pluie) permettra d'étudier statistiquement le canal de propagation urbain, puis d'évaluer ses performances de télécommunications sans fil et d'envisager des systèmes de correction.

## RÉFÉRENCES

- [1] M. A. Khalighi and M. Uysal, "Survey on Free Space Optical Communication : A Communication Theory Perspective," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 16, no. 4, pp. 2231–2258, 2014.
- [2] M. A. Naboulsi, "Contribution à l'étude des liaisons optiques atmosphériques : propagation, disponibilité et fiabilité." phdthesis, Université de Bourgogne, Dec. 2005. [Online]. Available : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00129081/document>
- [3] M. A. Esmail, H. Fathallah, and M. S. Alouini, "Outdoor FSO Communications Under Fog : Attenuation Modeling and Performance Evaluation," *IEEE Photonics Journal*, vol. 8, no. 4, pp. 1–22, Aug. 2016.
- [4] A. Montmerle Bonnefois, R. Biérent, N. Védrenne, M. Lefebvre, V. Michau, M.-T. Velluet, A. Godard, S. Derelle, A. Durécu, and M. Raybaut, "SCALPEL : a long range free-space optical communication system with adaptive optics in the MIR bandwidth." SPIE Remote Sensing Toulouse, Oct. 2010, p. 21.
- [5] ONERA, "MATISSE v2.1," <http://matisse.onera.fr/>.
- [6] K.-L. Nguyen, C. Robert, J. M. Cohard, J.-P. Lagouarde, M. Irvine, J.-M. Conan, and L. M. Mugnier, "Measurement of the spatial distribution of atmospheric turbulence with SCINDAR on a mosaic of urban surfaces," vol. 10425. International Society for Optics and Photonics - Remote Sensing Varsovie, Oct. 2017, p. 104250L.
- [7] B. Garcia-Lorenzo, A. Eff-Darwich, J. J. Fuensalida, and J. Castro-Almazan, "Adaptive Optics Parameters connection to wind speed at the Teide Observatory," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 397, no. 3, pp. 1633–1646, Aug. 2009, arXiv : 0904.0142.

# COMPENSATION MODALE DU GAIN OPTIQUE POUR LES ANALYSEURS PYRAMIDE

V. Deo<sup>1</sup>, É. Gendron<sup>1</sup>, G. Rousset<sup>1</sup>, F. Vidal<sup>1</sup>, T. Buey<sup>1</sup>, M. Cohen<sup>2</sup>

<sup>1</sup> LESIA, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, Univ. Paris Diderot,  
Sorbonne Paris Cité, 5 place Jules Janssen, 92195 Meudon, France

<sup>2</sup> GEPI, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, 5 place Jules Janssen, 92195 Meudon, France

vincent.deo@obspm.fr

## RÉSUMÉ

La non-linéarité des analyseurs de surface d'onde Pyramide fait l'objet d'études approfondies, en particulier le *gain optique* (GO), qui correspond à la baisse relative de sensibilité entre le régime de calibration et le régime de boucle fermée avec résidu de phase en conditions réelles. Le GO influence les performances de l'optique adaptative, en compromet la stabilité et empêche une compensation correcte de la consigne de référence. Nous proposons une approche modale quantitative pour la mesure du GO et sa pré-compensation dans la loi de commande, mettant en évidence qu'une compensation scalaire est insuffisante sur des systèmes hauts ordres. Nous proposons donc d'introduire une mesure et une compensation modale du gain optique pour prendre en compte la forte dépendance spectrale de celui-ci, et présentons les performances de cette méthode en simulation numérique.

**MOTS-CLEFS :** *Analyse de front d'onde ; Pyramide ; Optique adaptative ; Télescopes*

## 1. INTRODUCTION

Introduits par R. Ragazzoni [1], les analyseurs de front d'onde Pyramide (ASOP) proposent un gain de sensibilité attirant pour les optiques adaptatives (OA) à hauts ordres des très grands télescopes. Avec la complexification des systèmes, l'intérêt de réajuster la matrice d'interaction à cause du gain optique (GO) est démontrée par V. Korhikoski *et al.* [2], et une méthode de mesure du GO global en temps réel est proposée par C. Bond *et al.* [3]. Nous proposons une autre métrique modale du gain optique et étudions performance et stabilité de celle-ci, à l'horizon de systèmes d'OA d'ordre 4 000 et plus, comme le système *single conjugate* de la caméra MICADO en cours de développement au LESIA[4].

## 2. UNE APPROCHE LINÉAIRE DU GAIN OPTIQUE MODAL

On considère que l'on dispose d'un opérateur de reconstruction  $\mathcal{R}(\bullet)$  pour une OA avec ASOP en régime de phase nulle. Étant donné un vecteur de mesures  $\mathbf{S}$  de l'ASOP dans ce régime, nous pouvons exprimer la phase  $\Phi$  vue par l'ASOP par :  $\Phi = \mathcal{R}(\mathbf{S})$ . Sans perte de généralité,  $\mathcal{R}$  sera pour nous la matrice de commande mesurée en régime de petits signaux au voisinage de la phase de référence nulle et s'exprimant sur une base orthonormée du miroir déformable. Pour un mode  $\Phi_i$  donnant les mesures  $\mathbf{S}_{i,0}$  sur une phase de référence nulle, les mesures sont modifiées en  $\mathbf{S}_{i,\text{résidu}}$  pour une phase de référence non nulle due aux aberrations non communes et/ou au résidu présent dans la boucle. Alors qu'on a bien  $\Phi_i = \mathcal{R}(\mathbf{S}_{i,0})$ , l'ASOP en opération autour du résidu du boucle croit mesurer  $\Phi_{i,\text{résidu}} = \mathcal{R}(\mathbf{S}_{i,\text{résidu}}) \neq \Phi_i$ . En décomposant cette reconstruction  $\Phi_{i,\text{résidu}}$  sur  $\Phi_i$  et son orthogonal :  $\Phi_{i,\text{résidu}} = \Phi_{i,\text{résidu}}^{\parallel} + \Phi_{i,\text{résidu}}^{\perp}$ , on définit alors le coefficient modal de gain optique (CMGO)  $\xi_i$  pour le mode  $\Phi_i$  :  $\xi_i = \frac{1}{\|\Phi_i\|} \|\Phi_{i,\text{résidu}}^{\parallel}\|$ .

## 3. MESURE DES GAINS OPTIQUES MODAUX

Nous procédons à la mesure des CMGO sur des bases de Karhunen-Loève (KL), de Fourier et des actuateurs du miroir déformable (MD), sur plusieurs réalisations de l'atmosphère et avec l'ASOP en fonctionnement sur résidu de boucle (Fig. 1). Les CMGO sont très sensibles à la force du résidu turbulent

et décroissent avec  $r_0$ . La valeur moyenne du CMGO pour un mode croît avec les fréquences spatiales contenues dans ce mode (en KL et Fourier), jusqu'à une différence d'un facteur 4,5 à travers la base à  $r_0 = 8$  cm. Sur 30 réalisations de la turbulence, on note la stabilité du CMGO sur les bases KL et Fourier, contre une erreur souvent supérieur à 50 % sur les actuateurs. L'hypothèse retenue est qu'une mesure des CMGO sur une base adéquate ne dépend que de paramètres généraux de la turbulence et de l'ASOP.

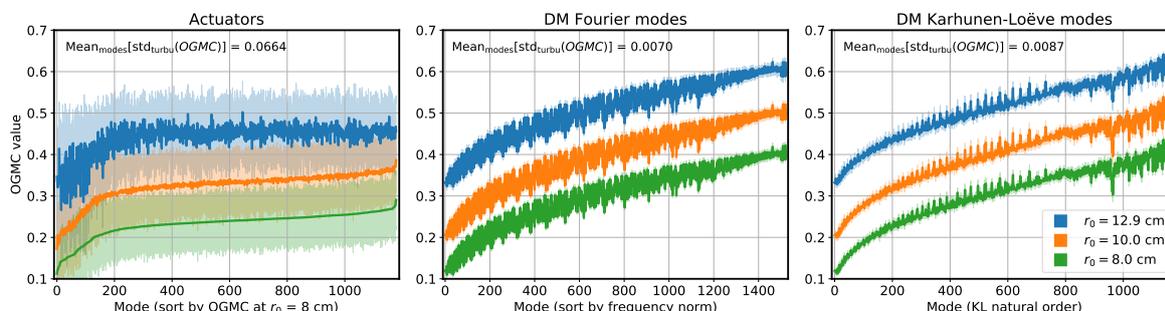


FIGURE 1 : Valeur des CMGO sur 3 bases du MD, pour  $r_0$  de 8 cm à 12,9 cm. Aires colorées : écart-type sur 30 réalisations de la turbulence. Est indiquée la moyenne de cet écart-type sur tous les modes. Modulation :  $2 \lambda / D$ .

#### 4. PERFORMANCE DE BOUT-EN-BOUT

Nous simulons l'impact des CMGO sur un télescope de diamètre 18 m muni d'un miroir déformable  $40 \times 40$  actuateurs couplé à un ASOP avec  $61 \times 61$  sous-ouvertures, et nous mesurons la performance finale à travers le rapport de Strehl longue pose en bande H (Fig. 2). La performance est améliorée par l'utilisation de CMGO dans toutes les conditions envisagées. Le bénéfice est substantiel à faible  $r_0$  : +17 et +20 pts. à 10 et 8 cm respectivement, lorsque la bande passante ne domine pas le budget d'erreur (à 500 Hz). On mesure également la performance maximale accessible avec une compensation scalaire du gain optique (cf "no OGMC") : bien qu'une compensation homogène permette de faire fonctionner la boucle d'OA, la performance obtenue reste suboptimale dans tous les cas.

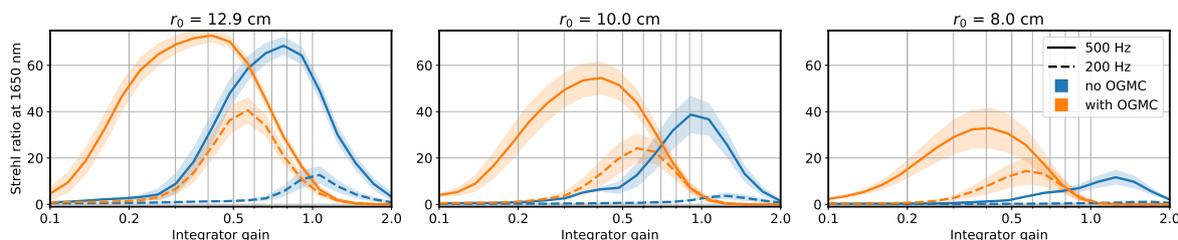


FIGURE 2 : Rapport de Strehl longue pose simulé avec COMPASS [5] en fonction du gain global et de la fréquence de boucle (200 et 500 Hz), pour 3 paramètres  $r_0$  de turbulence atmosphérique, avec et sans utilisation de CMGO. Les CMGO sont mesurés sur une base KL pour une réalisation unique de la turbulence. Modulation :  $2 \lambda / D$ .

#### RÉFÉRENCES

- [1] R. Ragazzoni, "Pupil plane wavefront sensing with an oscillating prism," *J. Mod. Opt.*, vol. 43, no. 2, pp. 289–293, 1996.
- [2] V. Korkiakoski, C. Vérinaud, and M. L. Louarn, "Improving the performance of a pyramid wavefront sensor with modal sensitivity compensation," *Appl. Opt.*, vol. 47, p. 79, 2008.
- [3] C. Z. Bond *et al.*, "Optimising the performance of a pyramid wfs : tracking the optical gain," 2017.
- [4] R. Davies *et al.*, "Micado : the e-elt adaptive optics imaging camera," *Proc. SPIE*, vol. 7735, 2010.
- [5] D. Gratadour *et al.*, "Compass : an efficient, scalable and versatile numerical platform for the development of elt ao systems," *Proc. SPIE*, vol. 9148, 2014.

# DEVELOPPEMENTS TECHNOLOGIQUES POUR LES FUTURES MISSIONS NASA WFIRST ET ETUDES LUVOIR/HABEX DU DECADAL 2020

Marc FERRARI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Aix Marseille Univ, CNRS, CNES, Laboratoire d'Astrophysique de Marseille, France

[marc.ferrari@lam.fr](mailto:marc.ferrari@lam.fr)

## RÉSUMÉ

L'un des objectifs de la future mission spatiale WFIRST, notamment pour la détection et la caractérisation de planètes extra-solaires, sera de servir de démonstrateur technologique pour les missions suivantes qui viseront alors la caractérisation d'exo-Terres. L'instrument WFIRST/CGI doit ainsi permettre de valider en vol un certain nombre de concepts et de développements (analyse de front d'onde coronographique, DMs à haut ordre, etc.) qui sont envisagés pour les missions LUVOIR et HabEx aujourd'hui à l'étude dans le cadre du Decadal NASA 2020. Nous présenterons le contexte de ces missions et études du Decadal ainsi que les technologies clés associées, leurs niveaux de maturité et les feuilles de route de développements envisagées.

**MOTS-CLEFS :** *Contrôle de front d'onde, HRA Spatiale, WFIRST, LUVOIR*

## 1. INTRODUCTION

La prochaine génération de télescopes et d'instruments spatiaux dédiés à la détection et la caractérisation de planètes extrasolaires, notamment des exo-Terres, requiert des développements technologiques importants. Depuis les concepts (coronographe, starshade, etc.), les composants (miroirs déformable, analyseurs de front d'onde) ou encore le système complet télescope (miroir segmenté, cophasage) et des instruments, tout doit être mis en œuvre pour pouvoir contrôler le front d'onde global au niveau du picomètre. Les missions des 10 prochaines années prépareront la voie aux futurs instruments de 2030-2040.

## 2. LE PROJET WFIRST

Le projet WFIRST de la NASA est l'une des priorités du Decadal 2010, dont la phase B doit démarrer en Mai 2018. WFIRST, télescope de 2.4m, devrait être lancé à l'horizon 2024 et doit étudier la nature de l'énergie sombre en utilisant trois techniques en parallèle : la mesure des oscillations acoustiques des baryons, la mesure des distances des supernovae et l'étude des lentilles gravitationnelles faibles. L'objectif est de déterminer l'impact de l'énergie sombre sur l'évolution de l'Univers. Un autre objectif de WFIRST, encore rappelé récemment lors d'une revue de projet indépendante, est de servir de 'Démonstrateur technologique' (Tech-Dem) pour un certain nombre de technologies indispensables à la détection et la caractérisation de planètes extra-solaires, de type Exo-Terres. WFIRST fournira notamment une démonstration technologique essentielle, via l'instrument coronographique CGI qui sera le premier à utiliser un miroir déformable spatial à haut ordre pour corriger les aberrations du front d'onde. Le CGI est conçu pour atteindre des contrastes entre  $10^8$  et  $10^9$  et pour être le premier instrument d'imagerie directe de géantes gazeuses de type Jupiter et Neptune. Il s'agira d'une étape importante pour combler l'écart qui existe entre les capacités actuelles et les besoins d'une mission future de détection et caractérisation d'Exo-Terres ( $10^{10}$  de contraste).

### 3. LES ETUDES LUVOIR ET HABEX DU DECADAL 2020

En parallèle au développement de WFIRST, la NASA a lancé en 2016 la préparation du prochain Decadal Survey 2020 qui sera publié fin 2019 et orientera/définira les objectifs scientifiques et les missions NASA post-2030. Les études de quatre concepts de futures missions potentielles de type "Flagship" ont ainsi été lancées officiellement en janvier 2016 lors du meeting AAS 2016 et les groupes de travail constitués dans la foulée. La NASA a invité les agences spatiales étrangères à participer à ces études de concepts en tant qu'Observateurs et à participer à la définition de la science et proposer des instruments pour ces missions.

Parmi ces quatre études, on trouve une mission d'imagerie Exoplanète Habitable (HabEx) et un grand observatoire ultraviolet-optique infrarouge (LUVOIR). Ces concepts de mission sont conçus autour de l'imagerie directe des exoplanètes et partagent la caractérisation d'exoplanètes semblables à la Terre comme thème scientifique central. Le LUVOIR est un projet de nouvel observatoire spatial d'envergure (avec un miroir primaire de 9.2 à 16 m de diamètre) et multi-longueurs d'ondes capable avec des objectifs scientifiques polyvalents ambitieux. Cette mission permettra un bond en avant dans de nombreux domaines de l'astrophysique, de l'époque de la ré-ionisation jusqu'à la formation et l'évolution des galaxies, en passant par la formation des étoiles et des planètes. Le LUVOIR a pour objectif particulier de caractériser un grand domaine d'exoplanètes, y compris celles qui pourraient être habitables ou même habitées. Plus précisément, le LUVOIR a actuellement 4 objectifs principaux :

- Résoudre les régions de formation stellaire à l'échelle du parsec dans des galaxies à des distances atteignant 10-25 mega-parsecs, cartographier la matière noire dans l'univers proche et isoler les sources d'ondes gravitationnelles ;
- Détecter des biomarqueurs sur des mondes distants similaires à la Terre, analyser la structure et la composition d'exoplanètes différentes de la Terre, et imager des disques circumstellaires peu intenses pour contraindre la manière dont les planètes se forment ;
- Identifier la lumière primordiale dans l'univers jeune, faire de l'archéologie des galaxies jeunes et trouver les premiers trous noirs ;
- Cartographier l'atmosphère des planètes externes du système solaire (nuages, chimie atmosphérique, aurores) ainsi que la surface de leurs satellites (panaches de gaz, activité volcanique, aurores) à une échelle sans précédent de 50 km et résoudre les objets de la ceinture de Kuiper à 200km.

### CONCLUSION

En termes de détection et de caractérisation d'exoplanètes de type Exo-Terres, les challenges technologiques à relever pour les futures missions spatiales sont particulièrement ambitieux. Il s'agira en effet d'atteindre des contrastes de  $10^{10}$  à  $10^{11}$  et une stabilité de front d'onde à quelques picomètres. Seule une feuille de route technologique s'appuyant à la fois sur des démonstrations en laboratoire et des validations en vols, en profitant de toutes les compétences, y compris en Europe, permettra de relever ces défis à l'horizon 2025- 2030.

## ÉTOILES LASER DU TELESCOPE EUROPEEN « E-ELT »

**Moussaoui Nourredine, Djaidri Fahima, Boufas Samia, Ouanoufi Fatma Zohra,**

*Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB), Faculté de Physique,  
Laboratoire d'Electronique Quantique (LEQ), Alger, Algérie*

[nmoussaoui@usthb.dz](mailto:nmoussaoui@usthb.dz)

### RÉSUMÉ

L'objectif du présent article est de présenter nos travaux de recherche dans le domaine des étoiles artificielles du type « sodium LGS<sup>s</sup> ». LGS étant l'acronyme de « Laser Guide Stars ». Ces étoiles sont générées grâce à l'interaction d'un ou de plusieurs faisceaux laser avec les atomes de sodium présents dans les couches atmosphériques situées à des altitudes d'une centaine de kilomètres. Ces « sodium LGS<sup>s</sup> » sont utilisées par les grands télescopes terrestres comme sources de lumières « références » afin de s'affranchir des effets de la turbulence atmosphérique sur les images astronomiques. Nous allons nous intéresser en particulier, dans le cadre de ce travail, au cas du futur télescope européen : l'E-ELT.

**MOTS-CLEFS :** *Laser, Optique Adaptative, E-ELT, Astronomie, LGS.*

### INTRODUCTION

La qualité et la taille des télescopes modernes ont énormément augmentés. Des télescopes dont les diamètres s'étendent sur plusieurs mètres et une surface de très haute qualité sont utilisés dans plusieurs observatoires. La résolution angulaire de ces télescopes n'est déjà plus limitée par l'optique elle-même, mais par les distorsions atmosphériques : la lumière d'un objet astronomique peut parcourir de très grandes distances dans l'espace sans rencontrer une perturbation significative, mais la température et la variation de pression associés aux turbulences atmosphériques de la terre peuvent lui provoquer de sérieuses déformations, même dans des lieux favorables comme au sommet des montagnes avec un ciel dégagé.

Une solution à ce problème est d'utiliser des télescopes spatiaux. Cependant, ils ne peuvent pas être aussi larges que les télescopes terrestres, et leur construction, lancement, et maintenance s'avèrent très coûteux. La solution alternative se base sur la correction atmosphérique qui rend possible la forte réduction des effets de la distorsion atmosphérique. Pour les télescopes terrestres : les déformations du front d'onde causées par l'atmosphère sont compensées par l'optique adaptative (OA), utilisant par exemple des miroirs déformables avec plusieurs degrés de libertés. Un tel système requiert manifestement des informations exactes sur les turbulences atmosphériques. Ces dernières peuvent être calculées en analysant le front d'onde d'un point matériel telle une étoile (appelée étoile de référence) sachant que sans la turbulence cette lumière aurait un front d'onde plan.

### OPTIQUE ADAPTATIVE

L'optique adaptative a été proposée dès 1953 par Babcock [1], mais le premier système d'OA n'est apparu en astronomie qu'environ 40 ans plus tard. Son développement a été retardé à cause de l'absence d'une technologie adéquate telle que les détecteurs, les miroirs déformables, les ordinateurs rapides, etc.

Le principe de l'OA repose sur un système opto-mécanique permettant d'apporter des corrections en temps réel aux distorsions du front d'onde causées par la turbulence atmosphérique. Il comporte 3 éléments clés. L'analyseur de front d'onde ; dont la fonction est de déterminer à chaque instant la

valeur de l'écart de phase (déformation) induit par la turbulence atmosphérique. Le miroir déformable : a pour fonction de compenser les perturbations afin de recréer le front d'onde plan. Le système d'asservissement (ordinateur) ; qui en temps réel et à partir de l'information donnée par l'analyseur, calcule la déformation à appliquer au miroir pour obtenir la correction. L'analyseur mesure le front d'onde de l'étoile de référence. De ces mesures, on déduit par calcul la déformation générée par l'atmosphère ; le système d'asservissement utilise les mesures de l'analyseur pour déterminer les commandes à appliquer au miroir déformable. Des actionneurs déforment le miroir qui reproduit ainsi la déformation inverse à celle mesurée. Le système fonctionne en boucle fermée : le front d'onde arrivant à l'analyseur est compensé des perturbations mesurées à partir du front d'onde précédent [2].

### **ETOILES LASER**

L'étoile artificielle est obtenue en illuminant la couche naturelle de sodium présente dans la mésosphère de 80 à 100 km d'altitude, en utilisant une longueur d'onde de 589 nm (la raie D<sub>2</sub>) et l'amenant à fluorescence. En effet, cette couche atmosphérique ne contient pas que du Sodium. Parmi les espèces atomiques qui y sont également présentes on peut citer le fer et le potassium aussi.

Cependant, les atomes de sodium sont les meilleurs candidats pour la création d'étoiles laser [3]. Les photons du faisceau laser sont absorbés par les atomes de sodium. Ces derniers passent alors du niveau fondamental vers le premier état excité. De la lumière est alors rétrodiffusée lors de la désexcitation de l'atome à la même longueur d'onde que précédemment. De cette façon, une "étoile" artificielle peut être produite.

### **SYSTEME « OA-SODIUM LGS » DE L'E-ELT**

Le système d'optique adaptative de l'E-ELT n'utilisera pas une seule étoile laser, mais plusieurs étoiles laser. Le but n'étant plus de démontrer l'utilité d'un tel système, mais de l'optimiser. Dans cette optique l'utilisation de plusieurs étoiles artificielles va contribuer considérablement à réduire les effets indésirables rencontrés dans l'utilisation d'une seule étoile du type « sodium LGS ». Nous pouvons citer à titre indicatif l'effet de cône. L'un des objectifs de travail est de présenter les différentes améliorations apportées au système « OA-sodium LGS » de l'E-ELT.

### **CONCLUSION**

L'E-ELT représente une véritable révolution dans le domaine de l'observation astronomique à partir du sol. Ces capacités dépassent de loin celles des autres télescopes terrestres et cela grâce non pas seulement aux dimensions extrêmes de son miroir principal, mais aussi aux multiples défis soulevés par ce projet. La partie qui fait l'objet de ce travail n'est pas la moins favorisée. Il s'agit du système d'optique adaptative associé aux étoiles artificielles du type « sodium LGS ».

### **RÉFÉRENCES**

- [1] H. W. Babcock, "The possibility of compensating astronomical seeing", *PASP*, - Vol. 65. - p. 229. 1953.
- [2] E. Viard, « Systèmes d'optique adaptative avec étoiles laser : du système classique aux méthodes multi-conjuguées » : Thèse de doctorat. Grenoble 1 : U. Joseph-Fourier. – pp. 13,14. – 01 GRE1 0046. 2001.
- [3] N. Moussaoui *et al.* , "Dependence of sodium laser guide star photon return on geomagnetic field", *Astronomy and Astrophysics*, 501, 793–799. 2009.

# ÉTUDE DE LA DEGRADATION DE SYSTEMES OPTIQUES DUE AU CHANGEMENT D'INDICE DE REFRACTION INDUIT PAR RADIATIONS IONISANTES AU MGy

Cyprien Muller<sup>1,2</sup>, Thierry Lépine<sup>2</sup>, Timothé Allanche<sup>2</sup>, Philippe Paillet<sup>1</sup>, Vincent Goiffon<sup>3</sup>, Youcef Ouerdane<sup>2</sup>, Aziz Boukenter<sup>2</sup>, Sylvain Girard<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CEA-DAM, DIF, 91297 Arpajon, France

<sup>2</sup> Univ-Lyon, Laboratoire Hubert Curien, UMR CNRS 5516, 42000 Saint-Etienne, France

<sup>3</sup> ISAE Supaero, 31035 Toulouse, France

[cyprien.muller@institutoptique.fr](mailto:cyprien.muller@institutoptique.fr)

## RÉSUMÉ

Les radiations ionisantes peuvent induire un changement d'indice des verres, donc une défocalisation, qu'on ne peut corriger car il n'existe aucun système motorisé résistant aux radiations. Il faut donc étudier la tenue d'un objectif aux changements d'indices dès sa conception. Nous étudions aussi le wavefront coding comme solution à ce problème.

**MOTS-CLEFS :** *défocalisation ; radiations ionisantes ; effets permanents ; Wavefront Coding.*

## 1. INTRODUCTION

Les verres dopés au Cérium sont connus pour leur résistance à l'atténuation induite par radiation (RIA), résultante macroscopique de la modification de la structure du matériau. Les relations de Kramers-Kronig et de Lorentz-Lorenz permettent de relier ces modifications de structure à une variation de l'indice de réfraction.

La majorité des publications étudiant cette problématique concernent les applications pour le spatial pour lequel les doses totales sont de l'ordre du kGy [1]. Le développement de caméras pour les environnements fortement radiatifs requiert en revanche des données à des doses de l'ordre du MGy qui sont presque totalement absentes de la littérature.

De plus, la mesure post-mortem ne permet pas une étude complète puisque seuls les défauts permanents sont pris en compte ; mesurer l'effet des défauts transitoires et avant guérison ne peut se faire qu'en cours d'irradiation ce qui n'a pas été fait à ce jour.

Nous utilisons OpticStudio pour étudier un objectif type utilisant deux matériaux résistant à la RIA, la silice et le F2G12 dont on fait varier de façon paramétrique leur indice jusqu'à  $\pm 10^{-2}$ . La FTM est utilisée comme critère de qualité, observée jusqu'à 100 *pl/mm*. Nous étudions ensuite l'utilisation du wavefront coding comme solution pour augmenter la résistance de l'objectif aux changements d'indices sans diminuer l'ouverture du système.

## 2. ÉTUDE PARAMETRIQUE DE LA VARIATION D'INDICE SUR UN SYSTEME OPTIQUE TYPE

Un système type est simulé sous Zemax (Fig. 1.(a)). Il est composé de lentilles en Silice et F2G12, version dopée au Cérium du F2 produit par le fabricant Schott. La FTM à 100 *pl/mm* se maintient pour des variations d'indice  $\Delta n$  de la Silice et du F2G12 inférieures à respectivement  $3 \cdot 10^{-4}$  et  $7 \cdot 10^{-4}$ . On observe aussi un effet de compensation pour certaines valeurs de  $\Delta n$  plus fortes.

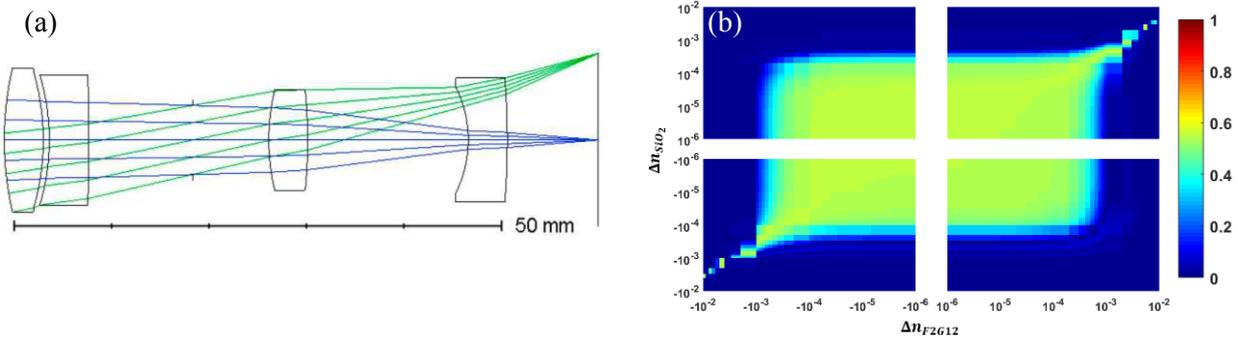


Fig. 1 : (a) allure du système simulé. (b) valeur de la FTM à 100 pl/mm en fonction des variations d'indices.

### 3. UTILISATION DU WAVEFRONT CODING

On rajoute au système un masque cubique [2] à la position de la pupille, ici en Silice. Ce masque rend invariante la PSF du système, et donc sa FTM (Fig. 2. (a)), pour de plus grandes défocalisations – ici, de plus grands  $\Delta n$ . Une déconvolution (Fig. 2. (b)) permet de restaurer numériquement l'image, bien que la méthode introduise parfois des artefacts.

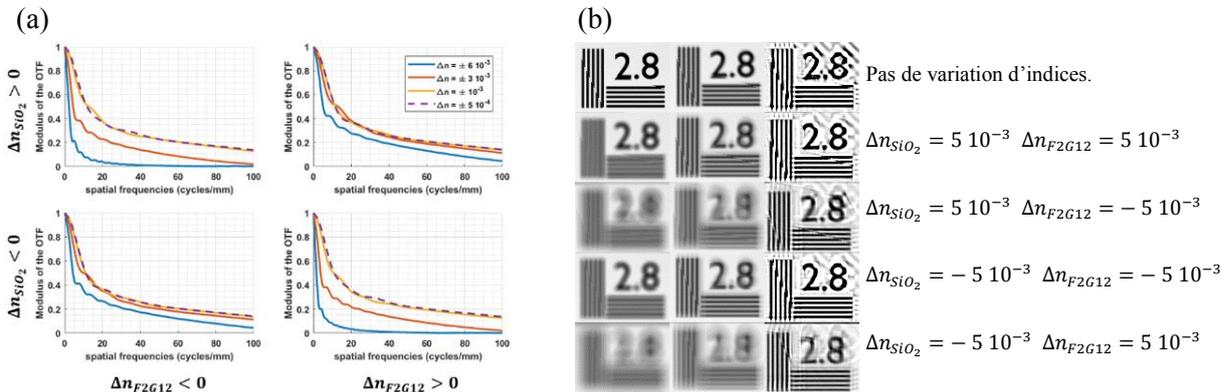


Fig. 2. (a) FTM pour différents  $\Delta n$ . (b) simulation d'images sans (gauche) et avec (milieu) le masque cubique puis après restauration (droite) pour différents  $\Delta n$ .

### CONCLUSION

Pour l'exemple étudié, la chute de performance s'opère pour des valeurs de  $\Delta n$  atteignables aux doses de l'ordre du MGy. Les variations des indices de chacun des matériaux sont susceptibles de se compenser, à l'instar de la compensation du defocus thermique pour l'imagerie infrarouge [3]. Des mesures en ligne sous radiation permettront de concevoir des objectifs auto-compensés.

L'utilisation du wavefront coding semble être une piste intéressante pour rendre l'objectif moins sensible aux variations d'indice et d'autant plus s'il est réalisé dans un matériau très peu sensible aux radiations.

### RÉFÉRENCES

[1] D. Doyle, "Radiation Hardness of Optical Material," Europa Jupiter System Mission Instrument Workshop, ESA ESTEC, (2010).  
 [2] W. T. Cathey and E. R. Dowski, "New paradigm for imaging systems," Appl. Opt., Vol. 41, no 29, pp. 6080-6092, 2002.  
 [3] P.J. Rogers et M. Roberts *Fundamentals Techniques And Design*, Vol. 1, pp.39.8, McGraw-Hill Inc., 1995.

# IMAGERIE HAUTE RÉOLUTION DE LA RÉTINE PAR ILLUMINATION STRUCTURÉE ASSISTÉE PAR OPTIQUE ADAPTATIVE

Yann Lai-Tim<sup>1,2</sup>, Laurent M. Mugnier<sup>1</sup>, Roberto Baena-Gallé, Serge Meimon<sup>1</sup>, Elena Gofas-Salas<sup>1</sup>, Pedro Mecê<sup>1</sup>, Michel Paques<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ONERA - The French Aerospace Lab, 92320 Châtillon, France

<sup>2</sup> INSERM CIC 1423, Hôpital des Quinze-Vingts, 75012 Paris, France

yann.lai-tim@onera.fr

## RÉSUMÉ

La microscopie par illumination structurée est une technique d'imagerie permettant d'obtenir simultanément super-résolution et sectionnement optique. Nous développons une adaptation de cette méthode aux spécificités de l'imagerie rétinienne. Dans cette communication, nous présenterons les performances en simulation de cette approche en fonction du niveau de bruit. Les premiers résultats expérimentaux seront présentés à la conférence.

**MOTS-CLEFS :** *Imagerie rétinienne ; Microscopie par illumination structurée ; Optique adaptative*

## 1. INTRODUCTION

Durant les vingt dernières années, le développement de l'optique adaptative (OA) en imagerie rétinienne a permis d'augmenter grandement la qualité des images acquises. L'OA, qui compense en temps réel les aberrations évolutives du segment antérieur de l'œil, s'impose aujourd'hui dans les systèmes d'imagerie rétinienne *in-vivo* à haute résolution. Les systèmes d'imagerie plein champ de la rétine corrigés par OA disposent d'une haute résolution latérale mais leur résolution axiale est limitée. Il est possible d'améliorer la résolution axiale de ces systèmes plein champ à l'aide de méthodes de microscopie par illumination structurée (SIM en anglais). Celles-ci permettent d'obtenir à la fois de la super-résolution et du sectionnement optique [1][2]. Ces méthodes bien qu'éprouvées en microscopie où l'objet observé est statique, ne sont pas adaptées à l'imagerie rétinienne du fait du mouvement oculaire non contrôlé. Une adaptation des méthodes SIM à l'imagerie rétinienne a été proposée par Grupetta [3]. Nous développons une méthode de microscopie par illumination structurée récemment proposée [4], adaptée aux spécificités de l'imagerie rétinienne plein champ.

## 2. PRINCIPE DE L'IMAGERIE PAR ILLUMINATION STRUCTURÉE

La SIM consiste à éclairer l'objet par des motifs de franges généralement sinusoïdales avec des orientations et des déphasages différents. Ceci a pour effet d'introduire par repliement spectral des informations hautes-fréquences de l'objet à l'intérieur du support de la fonction de transfert optique (FTO) du système, ce qui élargit ainsi le support fréquentiel observable (cf. Figure 1).

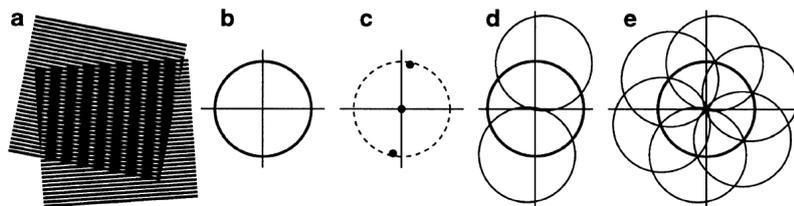


FIGURE 1 : Principe de la SIM. Effet de Moiré (a). Support des fréquences spatiales de la FTO (b). Transformée de Fourier d'un motif d'illumination sinusoïdal (3 pics de Dirac) dont la fréquence est à la limite du support de la FTO (en pointillé) (c). Support des fréquences spatiales observables dans les données SIM par repliement spectral pour une orientation du motif d'illumination (d), et pour trois orientations (e). D'après [2].

L'image résultante est ensuite traitée avec des algorithmes de reconstruction dédiés qui permettent de récupérer des hautes fréquences spatiales au-delà de la fréquence de coupure de l'instrument, et simultanément, d'enlever la contribution de la lumière rétro-diffusée par les tranches défocalisées de l'échantillon. Cette dernière propriété est appelée sectionnement optique.

Alors que pour les échantillons statiques, les déphasages des sinusoides peuvent être définis par l'utilisateur, fournissant ainsi des solutions analytiques, ce n'est pas possible en imagerie rétinienne où il est nécessaire de prendre en compte les mouvements oculaires.

### 3. MÉTHODE PROPOSÉE

Notre méthode s'appuie sur une décomposition de l'image SIM indice  $l$  acquise  $i_l(x, y)$  en deux termes : une observation conventionnelle en illumination homogène  $i_{CV}(x, y)$  et une composante  $i_{l|OS}(x, y)$  résultant des répliques repliées dans le spectre de l'image. On montre que  $i_{l|OS}(x, y)$  qui contient l'information apportée par l'illumination structurée est sectionnée optiquement contrairement à  $i_{CV}(x, y)$ . En effet, le contenu fréquentiel de  $i_{l|OS}(x, y)$  est centré autour de la fréquence du motif d'illumination fixée à la demi-fréquence de coupure optique  $f_c/2$  et la FTO atténue fortement les hautes fréquences  $f \geq f_c/2$  quand la défocalisation augmente. On a (cf. Réf. [4]) :

$$i_{l|OS}(x, y) = i_l(x, y) - i_{CV}(x, y) * s_l(x, y), \quad (1)$$

où le terme  $s_l(x, y)$  modélise le décalage spatial lié au mouvement oculaire entre les acquisitions de  $i_l(x, y)$  et  $i_{CV}(x, y)$ . L'Eq. (1) permet d'extraire les images  $i_{l|OS}$  contenant les informations hautes-fréquences et les propriétés de sectionnement optique, à partir des acquisitions  $i_l$  et  $i_{CV}$ . La reconstruction de l'image utilise les données  $i_{l|OS}(x, y)$  et s'appuie sur une approche Bayésienne qui consiste à minimiser un critère regroupant un terme d'attache aux données et un terme de régularisation.

La Figure 2 présente quelques résultats obtenus par simulation. Notre méthode SIM parvient à reconstruire la mire objet tout en atténuant très fortement le plan défocalisé (*Lena*).

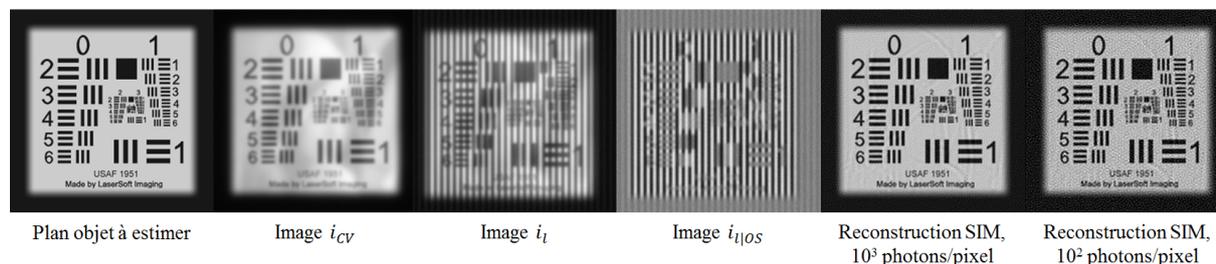


FIGURE 2 : Quelques résultats de simulation. 3 orientations des motifs (0, 120 et 240 degrés), 7 images par rotations.

Nous avons adapté un ophtalmoscope expérimental corrigé par OA, situé au CHNO des XV-XX, à l'imagerie par illumination structurée. Le motif d'illumination est réalisé à l'aide d'un DMD. Nous présenterons les premiers résultats expérimentaux obtenus avec notre système à la conférence.

### RÉFÉRENCES

- [1] M. a. A. Neil, R. Juškaitis, and T. Wilson, "Method of obtaining optical sectioning by using structured light in a conventional microscope," *Optics Letters*, vol. 22, no. 24, pp. 1905–1907, Dec. 1997.
- [2] M. Gustafsson, "Surpassing the lateral resolution limit by a factor of two using structured illumination microscopy. Short communication," *Journal of microscopy*, vol. 198, pp. 82–7, Jun. 2000.
- [3] S. Gruppeta, "Structured Illumination for In-Vivo Retinal Imaging," in *Frontiers in Optics 2013 (2013), paper FW2F.1*. Optical Society of America, Oct. 2013, p. FW2F.1.
- [4] R. Baena-Gallé, L. M. Mugnier, and F. Orioux, "Optical sectioning with structured illumination microscopy for retinal imaging : inverse problem approach," in *26ème Colloque sur le Traitement du Signal et des Images*. GRETSI, Sep. 2017.

# IMPACT DU CANAL SUR LES TRANSMISSIONS SATELLITE-SOL CORRIGÉES PAR OPTIQUE ADAPTATIVE EN DÉTECTION COHÉRENTE

Laurie Paillier<sup>1</sup>, Jean-Marc Conan<sup>1</sup>, Nicolas Védrenne<sup>1</sup>, Raphaël Le Bidan<sup>2</sup>,  
Géraldine Artaud<sup>3</sup>, Yves Jaouën<sup>4</sup>

<sup>1</sup> DOTA, ONERA, Université Paris Saclay F-92320 Châtillon, France

<sup>2</sup> IMT-Atlantique, UMR CNRS 6285 Lab-STICC Technopôle Brest Iroise, 29238 Brest, France

<sup>3</sup> CNES, 18 Avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France

<sup>4</sup> LTCI, Télécom ParisTech, Université Paris-Saclay, 75634 Paris, France

[laurie.paillier@onera.fr](mailto:laurie.paillier@onera.fr)

## RÉSUMÉ

Pour répondre au besoin croissant en débit posé par les liens optiques satellites - sol, l'exploitation de la détection cohérente est envisagée. Elle permet de bénéficier d'une meilleure efficacité spectrale, mais est potentiellement plus sensible à l'influence du canal. Ces effets sont étudiés pour un signal descendant corrigé par optique adaptative.

**MOTS-CLEFS :** *Télécommunications, Turbulence atmosphérique, Optique adaptative, Détection cohérente*

## 1. INTRODUCTION

L'accroissement de la quantité de données à transmettre entre les satellites et le sol, que ce soit pour la télémétrie ou pour les télécommunications, nécessite des solutions optiques. Il est aujourd'hui envisagé plusieurs dizaines de Gb/s par longueur d'onde afin d'exploiter au mieux les composants développés pour les télécommunications sur fibre, tout en maintenant les puissances embarquées à des niveaux tolérables. Au sol, l'injection de l'onde en réception dans une fibre monomode requiert l'utilisation d'optique adaptative (OA) afin de maximiser le niveau de signal détecté [1].

Les solutions de modulation/démodulation actuellement utilisées (i.e. modulation OOK pour On-Off Keying) reposent essentiellement sur une modulation de puissance combinée à une détection directe, et sont simples à mettre en œuvre. La modulation de phase combinée à une détection cohérente permet d'augmenter la sensibilité du récepteur. Les modulations de type I&Q et le multiplexage en polarisation permettent d'accroître très fortement les débits. Ces techniques sont aujourd'hui massivement utilisées pour les transmissions fibrées longue-distances à 100Gb/s et au-delà. Dans le cas des transmissions en espace libre, il est nécessaire de prendre en compte l'impact du canal de propagation sur le signal reçu, en particulier sa phase, en présence d'une correction par OA, cela afin d'identifier une architecture de récepteur cohérent adaptée aux liens satellites-sol, et éventuellement de proposer des solutions spécifiques de traitement numérique du signal.

## 2. PROBLÉMATIQUES

Le contexte des liens optiques satellite-sol diffère significativement de la propagation guidée : niveau de flux réduit, canal à évanouissement avec des niveaux d'atténuation profonds pouvant atteindre des durées de quelques millisecondes, décalage fréquentiel causé par l'effet Doppler, influence de la correction par optique adaptative... Des résultats d'ordre essentiellement théorique et portant sur les performances attendues de la détection cohérente ont déjà été publiés. A. Belmonte [2] a étudié l'influence d'une correction partielle par OA mais en se plaçant dans le cadre d'une détection hétérodyne. La détection homodyne à diversité de phase est déjà utilisée dans les systèmes en cours de test [3] et présente les atouts suivants : bande passante des photorécepteurs

réduite, pas de conversion de fréquence à effectuer et surtout meilleure efficacité spectrale. Les résultats présentés montrent que la liaison reste sensible aux fluctuations d'éclairement, ce qui entraîne des interruptions dans le transfert de données. Le but de nos travaux est d'étudier l'impact de la turbulence atmosphérique (bruit de phase et fortes dynamiques d'atténuation) et de l'effet Doppler sur la réception cohérente d'un signal modulé en phase afin de proposer une architecture de détection adaptée.

### 3. IMPACT DE LA TURBULENCE ATMOSPHERIQUE SUR LE BRUIT DE PHASE

La première phase de ce travail est la caractérisation de l'impact du canal de propagation sur la statistique du bruit de phase dans le cas d'un lien descendant satellite-sol. Pour cela, nous utilisons un simulateur end-to-end capable de modéliser la propagation d'une onde optique à travers l'atmosphère turbulente. Le champ complexe obtenu est ensuite corrigé par un simulateur reproduisant le comportement d'une boucle d'optique adaptative, avant d'être injecté dans une fibre optique monomode. Les simulations numériques permettent d'obtenir des séries temporelles représentatives d'un lien satellite-sol paramétrable.

La figure 1 présente les résultats d'une simulation d'un lien descendant GEO-sol. Comme le montre la figure de gauche, le signal injecté dans la fibre est stable après correction (cas d'une bonne correction par OA : 9 ordres radiaux, hors mode de piston, à une cadence de 2kHz pour un diamètre de collection de 50cm et un paramètre de Fried de 6,9cm à 1550nm). Le bruit de phase est présenté sur la courbe de droite. Un bruit de phase est présent malgré la très bonne correction. L'amplitude crête-crête dépasse la vingtaine de radians. Le temps de corrélation est de l'ordre de 82ms. Ce bruit de phase est essentiellement causé par l'influence du mode de piston turbulent, qui n'est pas corrigé par l'OA classique.

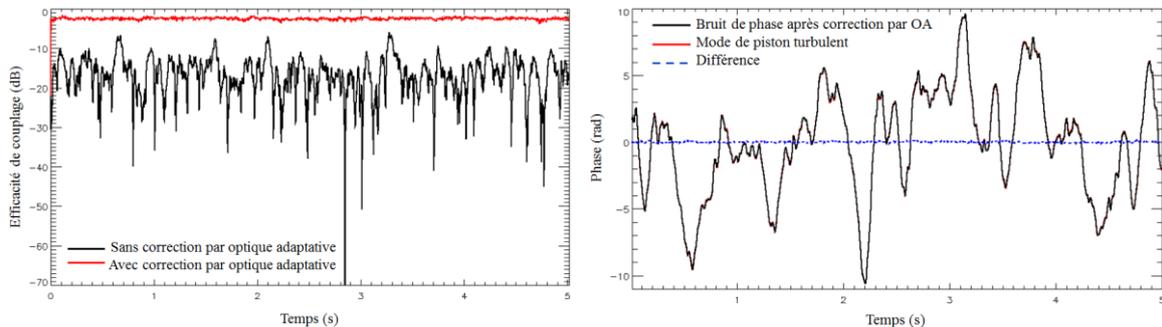


Fig 1. Efficacité de couplage et bruit de phase dans le cas d'un lien descendant satellite GEO bénéficiant d'une bonne correction par OA (cf figure de gauche) vers le sol avec une pupille de réception de 50cm.

La figure 1 montre en outre que les fluctuations de la phase sont significativement plus lentes que celles rencontrées dans les systèmes fibrés, où le bruit de phase des lasers est dominant. Sous réserve que la course du correcteur de phase soit suffisante, et en faisant l'hypothèse d'un canal monochromatique, l'influence du bruit de phase introduit par la turbulence aura vraisemblablement un impact mineur dans l'étape de détection.

### CONCLUSION

Les caractéristiques du bruit de phase induit par la propagation et la correction par OA dans le cas d'un lien optique GEO-sol ont été évaluées par modélisation numérique. Les ordres de grandeurs rencontrés laissent présager que le bruit de phase causé par la turbulence atmosphérique corrigée par OA aura un impact négligeable sur la réception du signal télécom. Ces travaux préliminaires constituent une première étape avant l'étude de l'impact de l'effet Doppler et des fortes atténuations de signal dans le cas d'une correction partielle par l'OA sur les performances du récepteur cohérent.

## REFERENCES

- [1] K. A. Winick, « Atmospheric turbulence-induced signal fades on optical heterodyne communication links », *Applied optics*, **25**, n°11, p. 1817-1825, 1986.
- [2] A. Belmonte, « Influence of atmospheric phase compensation on optical heterodyne power measurements », *Optics Express*, **16**, n° 9, p. 6756, april 2008.
- [3] K. Saucke, C. Seiter, F. Heine, M. Gregory, D. Tröndle, E. Fischer, T. Berkefeld, M. Feriencik, I. Richter et R. Meyer, «The Tesat transportable adaptive optical ground station,» *Proc. SPIE 9739, Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVIII*, 973906, 2016.

# Active optics for next generation space telescopes

V. Costes, D. Laubier, JM. Delvit, L. Perret

Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), 18 av. Edouard Belin, 31401 Toulouse, France

## ABSTRACT

High resolution observation systems need bigger and bigger telescopes. The design of such telescopes is a key element for the satellite design. In order to improve the imaging resolution with minimum impact on the satellite, a big effort must be made to improve the compactness of the telescope. Compactness is also important for the agility of the satellite and for the size and cost of the launcher.

This paper shows how compact a high resolution telescope can be. A diffraction limited telescope can be less than ten times shorter than its focal length. The compactness impacts drastically the opto-mechanical sensitivity and the optical performances. Typically, a gain of a factor of 2 leads to a mechanical tolerance budget 6 times more difficult. The need to implement active optics for positioning requirements raises very quickly.

Moreover, the capability to compensate shape defaults of the primary mirror is the way to simplify the mirror manufacture, to mitigate the development risks and to minimize the cost. The larger the primary mirror, the more interesting it is to implement active optics for shape compensations .

Our active optics approach is to compensate primary mirror shape defaults with a deformable mirror located in the telescope exit pupil. Telescope positioning errors are corrected thanks to a mechanism located behind the secondary mirror. See figure 1.

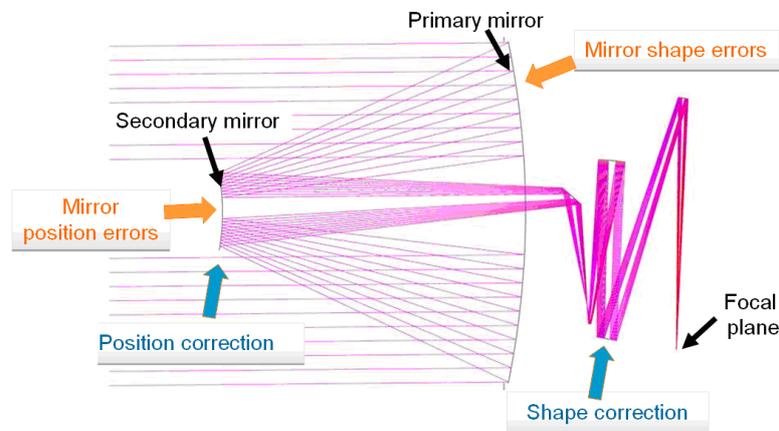


Figure 1. Active optics principle

Technological developments are ongoing at CNES for active optics demonstration. The aim is to achieve TRL5 for these new technologies and to validate the global performances of such a telescope. The present paper will describe these developments.

# LOW LIGHT LEVEL QUADRIWAVE LATERAL SHEARING INTERFEROMETER FOR IN-SITU WAVEFRONT SENSING IN FLIGHT

**Benoit WATTELLIER**

*PHASICS, Bâtiment Explorer, Parc Technologique de Saint Aubin, 911290 Saint Aubin*

bw@phasics.fr

## RÉSUMÉ

The balloon-based GHAPS telescope is designed to correct for rigid body motion of the secondary mirror based upon wavefront sensing from reference stars. A study was conducted to determine the feasibility to use a quadriwave interferometer in low light conditions. We demonstrate a precision of 5 nm RMS with an irradiance of a magnitude 7 star.

**MOTS-CLEFS :** *wave front sensing, low-light*

The environment of a balloon based telescope puts opto-mechanical stability demands that wavefront sensing and focus control are important features to consider. The GHAPS telescope is designed to correct for rigid body motion of the secondary mirror based upon wavefront sensing from reference stars. In order to support the concept of operations of this approach, the precision of wavefront sensing with candidate reference stars needs to be addressed. Precision is expected to degrade with reduction in irradiance. To confirm this, a study was conducted to determine the relationship between broadband and narrow spectral irradiance and wavefront measurement precision. The results of the study demonstrate that a precision of 5 nm RMS can be achieved with a 20 x 20 sampling of the wavefront with an irradiance of a visual magnitude 7 star on 1 meter aperture with an exposure of 30 msec.

# MIROIR DEFORMABLE ELECTROMECHANIQUE POUR APPLICATIONS SPATIALES

Sébastien Theis<sup>1</sup>, Laurent Ropert<sup>1</sup>, Vincent Costes<sup>2</sup>, Laurent Cadiergues<sup>2</sup>, Paul Sauvageot<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ISP SYSTEM, ZI de la Herry, 65500 Vic-en-Bigorre, France

<sup>2</sup> CNES, 18 Avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France

[contact@isp-system.fr](mailto:contact@isp-system.fr)

## RESUME

ISP SYSTEM a réalisé un miroir déformable à actionneurs mécaniques pour applications spatiales de type télescope d'observation. Il permet la correction de front d'onde et la compensation des aberrations dues à la réalisation et l'alignement des optiques ainsi qu'aux effets thermo-mécaniques liés à l'orbite. Cet article a pour objectif de présenter le contexte de l'étude et le concept du miroir déformable ainsi que les performances mesurées lors de la caractérisation expérimentale.

**MOTS-CLEFS :** *miroir déformable ; spatial ; mécanique ; stabilité*

## 1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

Dans le cadre du projet R&D ACMAS, co-financé par la DGA et par ISP System, ISP System a développé un prototype de miroir déformable (MD) adapté à une utilisation dans le spatial. Le CNES est intervenu dans le projet en qualité d'expert, et a exprimé les objectifs à atteindre afin de répondre aux besoins identifiés dans le développement de la future gamme de satellites d'observation terrestre (OTOS). Les principaux critères sont les suivants :

- **Performance de correction :** générer des combinaisons de Zernikes, y compris les aberrations sphériques, avec des amplitudes spécifiées ;
- **Stabilité :** assurer une stabilité court et long terme, y compris un effet thermo-élastique ;
- **Diamètre de correction :** la pupille utile est de Ø85 mm ;
- **Résister à l'environnement :** vibrations lors du lancement, durée de vie, vide ;

## 2. DESIGN DU MD

Le miroir est issu de la gamme de MD produits par ISP pour les applications laser de puissance commercialisée depuis 2003 [1]. La correction de front d'onde est assurée un réseau d'actionneur disposé suivant un motif particulier, placés sous la membrane optique réfléchissante en verre, appliquant des efforts push-pull par un système breveté [2]. Pour cela, les actionneurs  $\mu$ AME [3] ont été adaptés pour répondre aux normes ECSS afin d'atteindre un niveau TRL6. Ces actionneurs, entraînés par un moteur pas-à-pas, génèrent des efforts bidirectionnels stables hors énergie, grâce à une transmission irréversible et à une tête à ressorts ce qui les rend particulièrement adaptés pour une application spatiale car la forme du miroir est maintenue sans énergie

Le motif et le nombre d'actionneurs sont optimisés au regard des corrections à effectuer, grâce à un logiciel de simulation développé pour le projet. Une répartition à 25 actionneurs en 3 couronnes concentriques couvre le besoin en terme de correction, cependant ISP SYSTEM a choisi d'ajouter 6 actionneurs sur une 4<sup>ème</sup> couronne afin d'améliorer la qualité de correction, mais aussi d'assurer une redondance intrinsèque du miroir en cas de défaillance d'1 ou 2 actionneurs. Cette disposition permet d'utiliser des moteurs pas-à-pas 50% plus légers et économiques que des moteurs à bobinages redondants.

Les comportements mécanique, vibratoire et thermo-élastique du miroir complet ont été validés par des calculs éléments finis.

### 3. VALIDATION EXPERIMENTALE

Les composants constituant le miroir ont été validés par les experts du CNES quant à leur compatibilité au milieu spatial (colles, graisses, moteurs...), et le prototype a été assemblé début 2018. Il a ensuite été caractérisé sur le banc optique d'ISP SYSTEM.

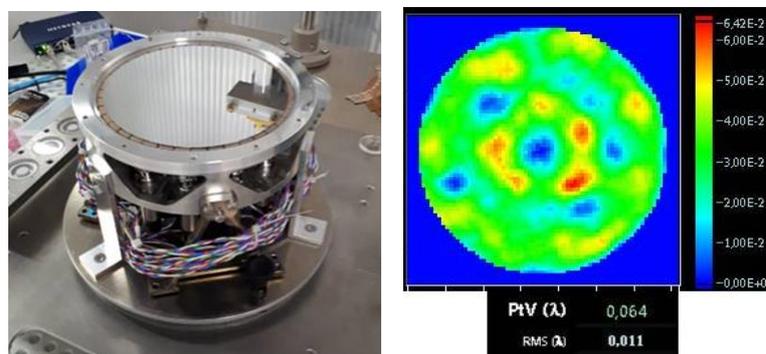


Fig. 1 : De gauche à droite : Photo du prototype MD spatial ; Résiduel de mise à plan mesuré

Le défaut initial de la membrane optique ( $6\mu\text{m}$  PtV) est corrigé par les actionneurs pour atteindre un résiduel de  $11\text{ nmRMS}$ , avec seulement 10% de la plage d'effort. Cette valeur pourrait encore être améliorée en utilisant une membrane optique ayant une déformation initiale plus faible.

La qualité de génération des Zernikes et des combinaisons requises est en totale corrélation avec les prédictions des simulations : qualité de correction supérieure à 98% pour les ordres  $\leq 3$ , 95% pour l'ordre 4, 75% pour l'ordre 5.

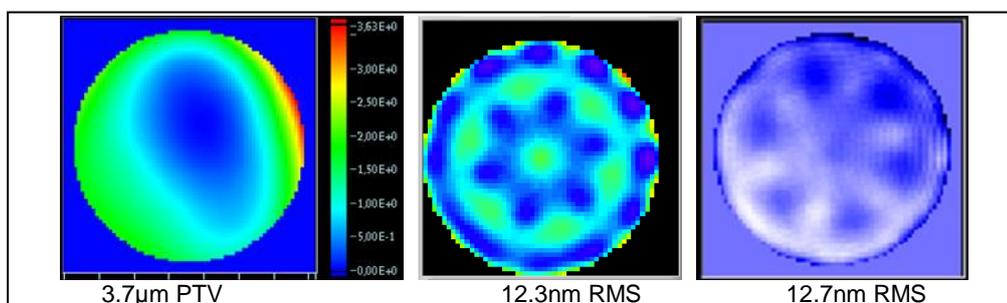


Fig. 2 : De gauche à droite : Front d'onde à générer (comportant  $50\text{ nmRMS}$  d'Aberration sphérique et  $25\text{ nmRMS}$  d'Aberration sphérique 2nde) ; Résiduel de correction simulé ; Résiduel mesuré

La stabilité thermique a été mesurée à  $40\text{ nmRMS}/^\circ\text{C}$  lors de cycles thermiques d'amplitude de  $\pm 3^\circ\text{C}$  sur plusieurs jours. Une analyse des matériaux a montré que le choix de matière pouvait encore être optimisé pour améliorer la stabilité thermique.

Lors de scénarios de défaillance réalistes avec 2 actionneurs bloqués, le résiduel de correction du front d'onde illustré en Fig. 2 est au maximum de  $28\text{ nmRMS}$ , et l'effort requis est augmenté de 30%.

### CONCLUSION

Les résultats sont conformes aux attentes et des travaux de recherche sont poursuivis sur le prototype, sur son mode de pilotage et d'autres caractéristiques telles que la stabilité long terme sur plusieurs jours ou mois. L'actionneur du MD va être soumis à l'environnement vibratoire du lancement courant avril 2018, puis subir un test de durée de vie sous vide.

### RÉFÉRENCES

- [1] [http://www.isp-system.fr/wp-content/uploads/pdf/fr/FicheProduitMD-AME\\_FR.pdf](http://www.isp-system.fr/wp-content/uploads/pdf/fr/FicheProduitMD-AME_FR.pdf)
- [2] Brevet ISP System N° FR2847742B1 : Actionneur de déplacement d'un élément
- [3] [http://www.isp-system.fr/wp-content/uploads/pdf/fr/13R037FPI%200027B\\_uAME12-SPACE.pdf](http://www.isp-system.fr/wp-content/uploads/pdf/fr/13R037FPI%200027B_uAME12-SPACE.pdf)

# MYOPIC DECONVOLUTION OF PARTIALLY AO-CORRECTED IMAGES USING PARAMETRIC PSF MODEL

Romain Fetick<sup>2,1</sup>, Thierry Fusco<sup>1,2</sup>, Laurent Mugnier<sup>1</sup>, Benoit Neichel<sup>2</sup>, Aurélie Bonnefois<sup>1</sup>,  
Pierre Vernazza<sup>2</sup>

<sup>1</sup> DOTA, ONERA, Université Paris Saclay, F-91123, Palaiseau France

<sup>2</sup> Aix Marseille Université, CNRS, LAM (Laboratoire d'Astrophysique de Marseille) UMR 7326,  
13388 Marseille, France

[Romain.fetick@lam.fr](mailto:Romain.fetick@lam.fr), [thierry.fusco@onera.fr](mailto:thierry.fusco@onera.fr)

## RÉSUMÉ

Deconvolution process of astronomical images allows to improve the quality of the observed object. However deconvolution is highly dependent on the knowledge of the so-called Point-Spread-Function (PSF). A poor knowledge on the PSF may bias the estimated object. Our objective is to find a suitable PSF model that is as simple as possible but sufficient enough to allow for accurate deconvolution. We develop here different parametric PSF models and evaluate their impact on deconvolution. We run deconvolution both on synthetic images and on VLT on-sky data, from the ESO Asteroid Large Program. We show and quantify the great improvement on deconvolution using parametric PSF, and we exhibit the stability of deconvolution with respect to the PSF's parameters. The analytic link we make between PSF's parameters and telemetry is a step forward to relieve the necessity of on-sky. PSF acquisition. Parametric PSF might also be of great interest for myopic deconvolution.

**MOTS-CLEFS :** *Post processing, deconvolution, AO corrected images, PSF fitting*

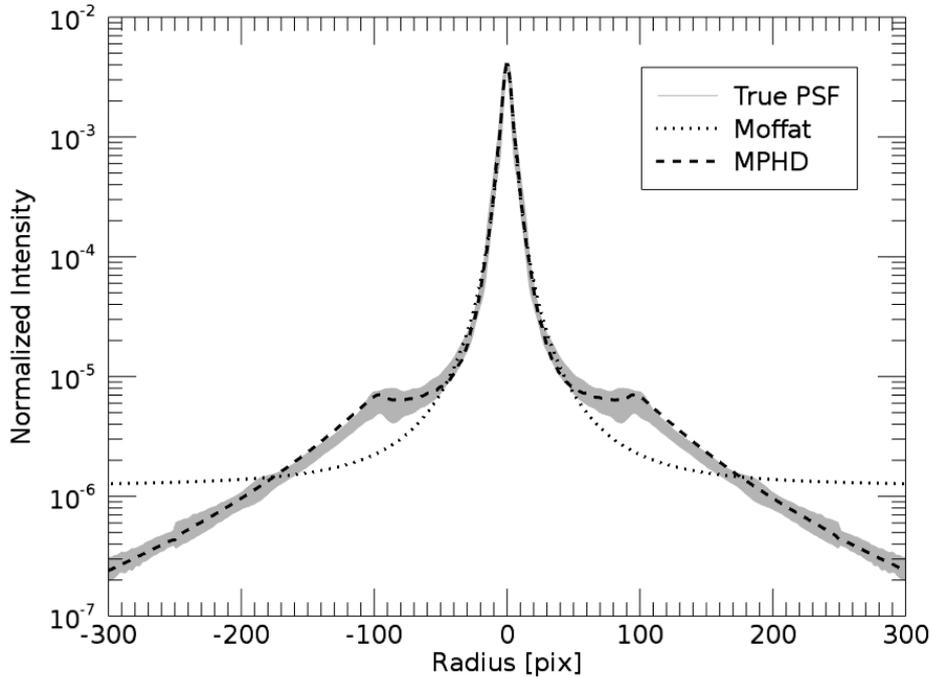
Quality of high-resolution imaging is severely limited by atmospheric turbulence. Adaptive Optics is a realtime compensation of atmospheric effects that greatly improves image quality closer to the diffraction limit. However the AO compensation is not perfect, and high spatial frequencies in the image are still attenuated. Deconvolution is the post-processing method allowing to enhance these attenuated frequencies and restore details on the observed object.

Deconvolution is a process highly sensitive to PSF accuracy. In practice, a PSF can be estimated imaging a star before or after imaging the object of interest (e.g. asteroid). However this PSF estimation suffers from inaccuracies caused by the spatial and temporal evolution of the turbulence. Moreover the AO system might correct differently the star's wavefront or the object's one due to some magnitude, color or angular size difference between star and object. In the following, we call "PSF mismatch" the fact that observed PSF is different from the true PSF.

Methods such as blind or myopic deconvolution (Conan et al. 1998) have been developed to take into account the poor knowledge on the PSF. These methods allow variations of the PSF and make the algorithm retrieving it as well as the object. In case of PSF mismatch these algorithms are made to improve the quality on the restored object with respect to a fixed-PSF deconvolution. However the high number of parameters to estimate make the convergence sensitive and lacking of accuracy. Myopic deconvolution as used in MISTRAL (Mugnier et al. 2004) also needs an average Optical Transfer Function (OTF, the modulus of the PSF's Fourier transform) and a Power Spectral Density (PSD) of the OTF as an input of the algorithm. In case of a PSF mismatch, or identically an OTF mismatch, the result of myopic deconvolution is better than a "classical" (fixed PSF)

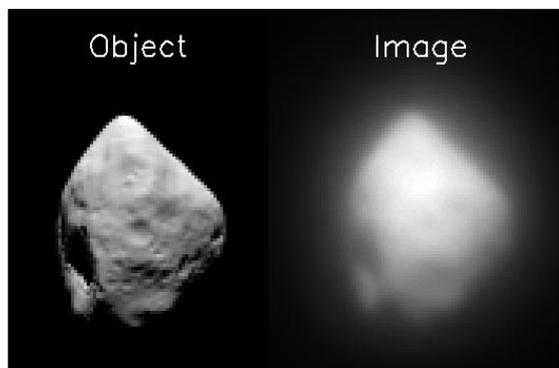
deconvolution. However, the result is still biased by this wrong OTF and may lead to inaccurate estimation on the object.

A good parametrization of the PSF allows a deeper understanding of the mismatch. We consequently derive a pertinent parametrization and show the effect of these parameters on the deconvolved object. Moreover we develop some analytical formulas to constraint the parameters, and in consequence set constraints on the PSF.

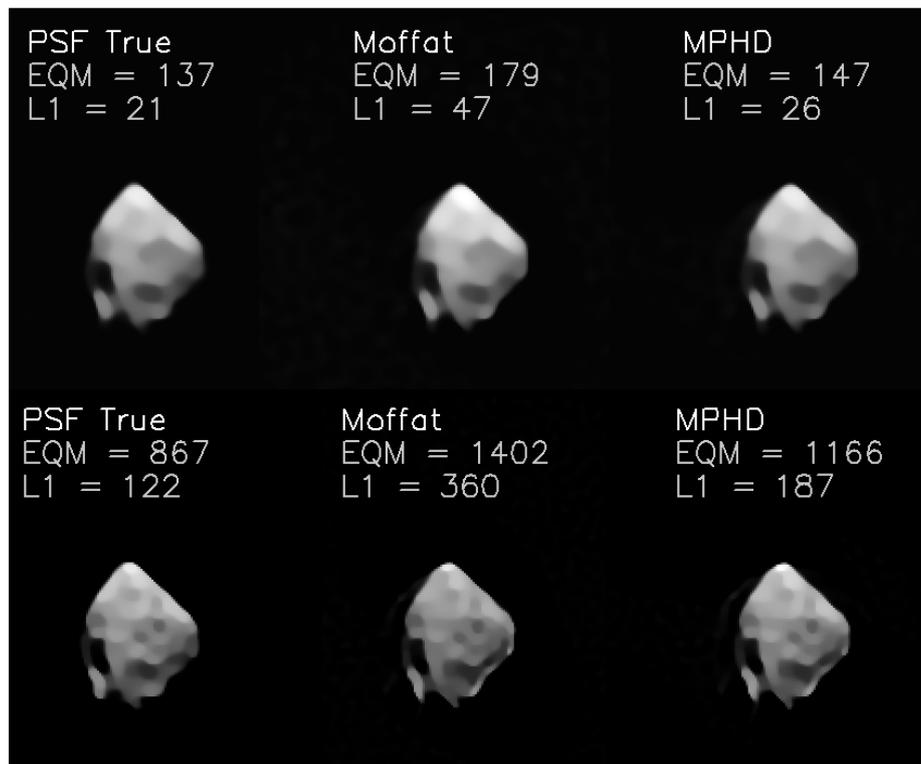


**Figure 1 Comparison of the two parametric models fitted on on-sky data. (star HD 18836, image SPHERE Zimpol from the ESO Large Program, courtesy P. Vernazza). Thickness of the true PSF shows the +/- standard deviation limits of the PSF around its circular average. MPHD is our new pPSF parametrisation**

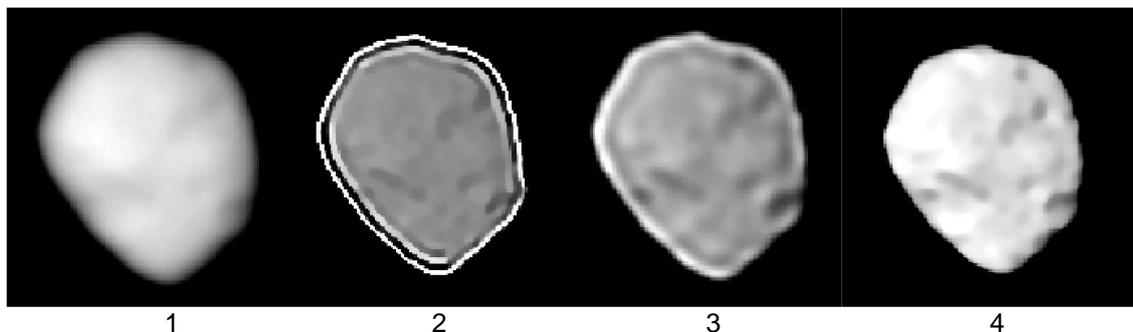
An effort is made to give a physical interpretation of each parameter; this allows us to connect the parameters to telemetry data such as Strehl ratio or Fried parameter. Analytical links we derive between PSF's parameters and telemetry is important to relieve the necessity of on-sky PSF acquisition. This method has both astronomical and military purposes. Finally, we also discuss future improvements for a method of "parametric myopic deconvolution".



**Figure 2S synthetic asteroid used for tests (left), and simulated image after convolution with a SPHERE PSF (right).**



**Figure 3** Results of the deconvolution of the asteroid using the true SPHERE PSF (left), the Mo\_at (middle) and MPHD (right). Top panel shows results for an energy of  $E = 107$  photons, bottom panel for an energy  $E = 8107$  photons.



**Figure 4** From left to right : (1) Asteroid observed by SPHERE in the visible (Zimpol data). (2) Classical deconvolution (reference PSF is clearly not appropriate). (3) Myopic deconvolution using MISTRAL, (4) our new approach with parametric PSF !

In conclusion: We validated the use of parametric PSF for deconvolution. The advantage is a modal point of view on the PSF, and a simplification of the problem (our method avoids the complexity of a real PSF reconstruction from AO telemetry which has been proved to be extremely complex as well as time and power consuming).

Our method is well suited to develop a parametric myopic deconvolution. Instead of estimating the PSF locally (256\_256 pixels), we estimate the PSF in a modal way (5-10 parameters) which dramatically improve the statistical contrast and thus the algorithm performance. More importantly, The PSF parameters can be linked to AO data, such as Strehl or jitter. The link between observational parameters and analytic parameters may suppress the need to observe PSF for deconvolution There is a gain of time (almost a factor 2) for scientific observations, and it is mandatory for LEO satellite imaging where no reference PSF is available

# NOUVEAUTES EN IMAGERIE DE PHASE QUANTITATIVE APPLIQUEE A LA MICROSCOPIE

**Benoit WATTELLIER, Sherazade AKNOUN, Antoine FEDERICI, Anaïs SAINTOYANT**

*PHASICS, Bâtiment Explorer, Parc Technologique de Saint Aubin, 911290 Saint Aubin*

bw@phasics.fr

## RÉSUMÉ

Nous présentons différentes avancées en imagerie de phase quantitative en microscopie. Celles-ci couvrent l'imagerie des fibres dans les tissus, la métrologie d'indice dans les milieux transparents ainsi que l'imagerie et le contrôle thermique à l'échelle microscopique.

**MOTS-CLEFS :** *wave front sensing, quantitative phase imaging, thermal imaging*

## 1. INTRODUCTION

L'imagerie de phase quantitative utilise la mesure du déphasage introduit par la propagation de la lumière dans des milieux d'indice inhomogène. Cette information est utilisée dans les dispositifs de contraste de phase comme le Nomarski ou le contraste de Zernike. Les techniques modernes d'imagerie de phase permettent d'obtenir des informations quantitatives sur la valeur de la phase et donc d'offrir un outil de métrologie précis. Ces méthodes comprennent l'holographie numérique et plus récemment l'analyse de surface d'onde.

Depuis plus de 10 ans, PHASICS a optimisés ses analyseurs de surface d'onde afin qu'ils donnent accès à des mesures de précision quand ils sont placés dans le plan image d'un microscope. Nous allons montrer quelques exemples de nouvelles applications de ce type d'imagerie.

## 2. IMAGERIE DE FIBRES DANS LES TISSUS BIOLOGIQUES

L'imagerie de phase quantitative (QPI) par analyse de surface d'onde a été appliquée à la biologie en utilisant des interféromètres à décalage quadrilatéral, tels que ceux commercialisés par PHASICS. L'utilisation d'un analyseur de surface d'onde a l'avantage par rapport à un interféromètre pour l'holographie numérique d'être indépendante de la polarisation de la lumière analysée. Il est donc possible de mesurer la variation de la phase en fonction de la polarisation incidente sur l'échantillon. De cette manière, il est possible de détecter et quantifier des objets anisotropes dans les échantillons biologiques, comme par exemple les fibres de collagène. Ces dernières sont impliquées dans de nombreuses pathologies.

## 3. IMAGERIE D'INDICE D'OBJETS TRANSPARENTS

Au-delà des applications biologiques, l'IPQ par analyse de surface d'onde peut être appliquée à la mesure de changement d'indice dans les milieux transparents. On a pu par exemple mesurer l'indice non-linéaire induit par la propagation d'un faisceau intense dans du verre. Ceci permet de mieux comprendre la dynamique de l'endommagement laser. De plus, il est possible de caractériser des guides d'onde fabriqués par laser.

## 4. IMAGERIE THERMIQUE MICROSCOPIQUE

Enfin, quand un matériau ou un liquide est chauffé, son indice varie. Il est donc possible de cartographier des élévations de température grâce à la mesure du déphasage induit par la variation

thermique de l'indice. Grâce à ce principe, nous contrôlons le chauffage local d'échantillons en éclairant des nanoparticules d'or avec un laser grâce au phénomène de résonance plasmonique. Il est également possible de détecter des nanosources de chaleur grâce à leur signature thermique.

## **5. CONCLUSION**

Dans ce papier, nous présenterons des exemples d'images et de mesures de ces 3 applications de l'imagerie de phase quantitative.

# OPTIMISATION DE SYSTEMES A MIROIRS DEFORMABLES MULTIPLES POUR LA CORRECTION DES ABERRATIONS DE PHASE ET D'AMPLITUDE

Pierre Baudoz<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Laboratoire d'Etudes Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique (LESIA), Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, Univ. Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, 5 place Jules Janssen, 92195 Meudon, France*

[Pierre.Baudoz@obspm.fr](mailto:Pierre.Baudoz@obspm.fr)

## RÉSUMÉ

Les techniques d'Imagerie à Très Haute Dynamique (ITHD) apparaissent comme les meilleures solutions pour caractériser directement l'atmosphère des planètes à grande distance orbitale. Elles nécessitent cependant des qualités de correction du front d'onde tellement élevées que les aberrations d'amplitude deviennent rapidement une limitation si elles ne sont pas corrigées. Nous présenterons une méthode utilisée pour corriger phase et amplitude simultanément ainsi que des résultats de laboratoire obtenus sur le banc de R&D du LESIA (banc THD2).

**MOTS-CLEFS :** *coronographie; planètes extrasolaires ; miroir déformable*

## 1. INTRODUCTION

Au cours des 20 dernières années, différentes solutions pour l'ITHD ont été proposées à partir de coronographes. Certains d'entre eux ont été caractérisés en laboratoire ou même dans le ciel. La performance optimisée de ces coronographes nécessite cependant un front d'onde parfait inaccessible sans contrôle actif du champ électrique complet (phase et amplitude) à l'entrée de l'instrument. Alors que la correction des aberrations de phase est directe avec des miroirs déformables (DM), la correction des défauts d'amplitude est plus complexe et reste limité à des tests en laboratoire. La prochaine génération d'instruments ITHD, que ce soit au sol (instrument PCS pour ELT) ou spatial (LUVOIR, HabEx), nécessitera une solution pratique et opérationnelle pour les corrections d'amplitude. La mise en place d'un DM situé à une distance finie de la pupille est une solution simple qui a été choisie par la plupart des projets. Il y a eu quelques recherches sur l'optimisation des positions des miroirs pour les conceptions optiques dédiées. Cependant, le développement du futur instrument nécessitera d'optimiser à la fois la position de ces miroirs et la conception optique globale de l'instrument. Une approche simple est donc nécessaire.

## 2. CORRECTION DE PHASE ET D'AMPLITUDE SUR LE BANC THD2

D'abord, nous décrivons une approche intuitive qui permet de définir la meilleure position de miroir déformable dans un instrument. En utilisant cette analyse simplifiée, nous présenterons les solutions optimisées avec 2 ou 3 miroirs pour le banc de R&D que nous avons développé au LESIA (banc THD, Fig. 1). Après avoir rappeler les performances du banc utilisant un seul miroir déformable (Delorme et al. 2016 [1], Mazoyer et al. 2014 [2]), nous décrivons ensuite décrit la méthode utilisée pour corriger les aberrations d'amplitude sur tout le champ de vision où le DM a une influence.

Ensuite, nous montrerons que l'utilisation de 2 miroirs (DM1 composé de 34x34 actionneurs et placé à 25 cm du plan pupille et DM3 composé de 32x32 actionneurs placé dans le plan pupille) permet déjà de corriger les aberrations d'amplitude et d'obtenir des extinctions inférieures à  $3 \cdot 10^{-8}$

au delà de  $5 \lambda/D$  sur le champ de correction complet (Fig. 2). L'utilisation d'un 3<sup>ème</sup> miroir placé plus loin de la pupille permettra à terme de corriger les aberrations d'amplitude de très bas ordre.

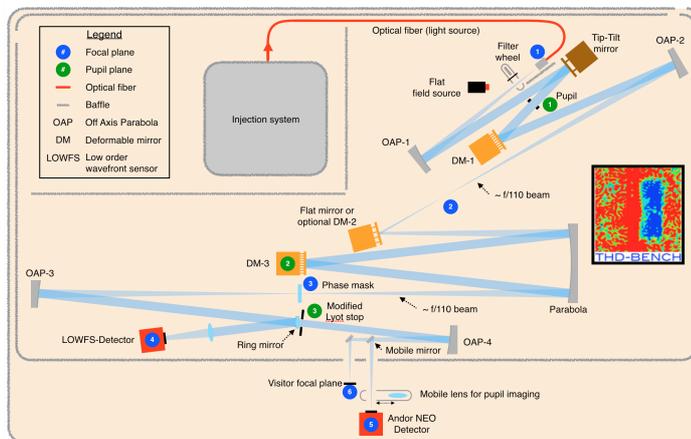


Fig. 1 : Design du Banc Très Haute Dynamique 2 (THD2) développé au LESIA. Pour plus de détails, voir <http://thd-bench.lesia.obspm.fr>

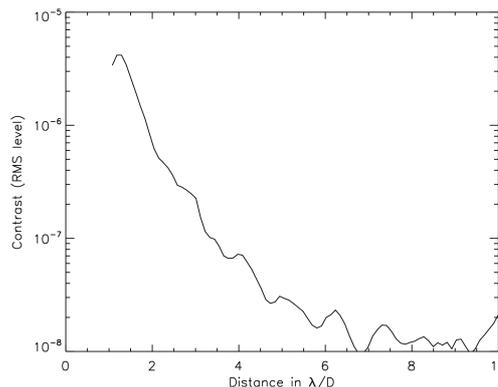
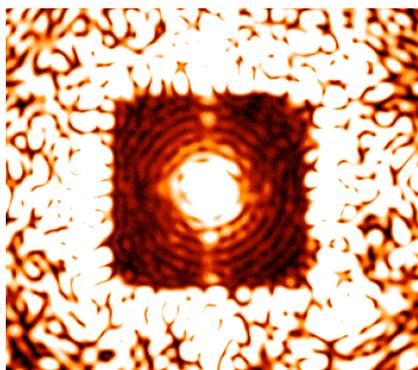


Fig. 2: **Gauche** : Image du champ de correction complet en utilisant deux miroirs déformables. **Droite** : Estimation du niveau résiduel de l'image en fonction de la distance à la source de laboratoire. Coronographe : Four Quadrant Phase mask, Longueur d'onde : Laser à 783 nm, Diaphragme de Lyot de 78%.

## CONCLUSION

L'utilisation de plusieurs miroirs déformables sur le banc THD2 permet la correction des aberrations de phase et d'amplitude à des niveaux sub-nanométriques. La qualité de correction permet d'atteindre sur un champ de vue complet des niveaux de contraste inférieurs à  $3 \cdot 10^{-8}$  très prometteurs pour les futurs instruments de détection de planètes extrasolaires au sol au dans l'espace.

## RÉFÉRENCES

- [1] J.-R. Delorme, M. N'Diaye, et al., "Laboratory validation of the dual-zone phase mask coronagraph in broadband light at the high-contrast imaging THD testbed", A&A, vol. 592, p. A119, 2016
- [2] J. Mazoyer, P. Baudoz, et al., "High-contrast imaging in polychromatic light with the self-coherent camera", A&A, vol. 564, p. L1, 2014

# PREMIERE LUMIERE DU SYSTEME D'OPTIQUE ADAPTATIVE CIAO AU PIC DU MIDI

**Guillaume Dovillaire<sup>1</sup>, François Colas<sup>2</sup>, Jean-Luc Dauvergne<sup>3</sup>, M. Delcroix<sup>4</sup>, J. Lecacheux<sup>5</sup>  
Christophe Rondeau<sup>1</sup>, Rémy Juvénal<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Imagine Optic 18 rue Charles de Gaulle 91400 Orsay France*

<sup>2</sup> *S2P, IMCCE, CNRS, Observatoire de Paris 77, avenue Denfert Rochereau 75014 Paris France*

<sup>3</sup> *Association TIM – S2P - Paris France*

<sup>4</sup> *Association TIM – S2P - SAF - Paris France*

<sup>5</sup> *S2P, LESIA, Observatoire de Paris 77, avenue Denfert Rochereau 75014 Paris France*

[gdovillaire@imagine-optic.com](mailto:gdovillaire@imagine-optic.com)

## RÉSUMÉ

Le Pic du midi est reconnu pour la qualité des images obtenues sur les planètes du système solaire. Le site exceptionnel et la longue expérience des équipes sur place expliquent ces résultats de renommée mondiale. Les techniques d'imagerie sont en constante évolution et les équipes recherchent toujours à être au fait de ces nouvelles technologies. Notre dernière étape est le développement d'un système d'optique adaptative. Ce système compact et abordable financièrement est développé en collaboration entre Imagine Optic, l'observatoire de Paris et l'association TIM mais pourrait intéresser de nombreux observatoires équipés de télescopes entre 0.5 et 2m de diamètre.

**MOTS-CLEFS :** *astronomie, télescope, imagerie planétaire, optique adaptative*

## 1. INTRODUCTION

Le système CIAO pour « Compact Innovative Adaptive Optics) est un système d'optique adaptative intégrant des composants standards disponibles sur le marché. Il intègre un miroir déformable, un analyseur de surface d'onde dans une structure directement compatible d'un porte-oculaire standard de télescope. Un logiciel de pilotage utilise les images de l'analyseur de front d'onde pour contrôler le miroir déformable. Les aberrations statiques du télescope peuvent alors être retirées mais également les aberrations provoquées par les perturbations atmosphériques au-dessus du télescope. La caméra d'imagerie déportée dans un plan d'imagerie secondaire bénéficie alors de la présence du système d'optique adaptative, la qualité des images acquises s'accroît donc considérablement.

## 2. LE SYSTEM CIAO

L'analyseur de front d'onde est de type Shack-Hartmann, il s'agit de l'HASO4 FAST développé pour le projet par Imagine Optic. 16x16 microlentilles échantillonnent le front d'onde à une cadence pouvant aller jusqu'à 1200Hz. Le miroir déformable est de type monomorphe. Ses quelques dizaines d'actionneurs permettent de modifier le front d'onde incident à une cadence pouvant aller jusqu'à 2000 Hz. Un logiciel d'optique adaptative développé par Imagine Optic et modifié pour l'application (WaveTune) est utilisé pour piloter le miroir en utilisant les données de l'analyseur de front d'onde. En boucle fermée, le système peut tourner à une fréquence de l'ordre de 800Hz. Le logiciel permet également d'acquérir l'ensemble des données de calibration comme la matrice d'interaction.

Le système optique entre le plan objet et le plan image est optimisé (rapport de Strehl  $> 0.8$ ) sur la bande spectrale visible et sur un champ de  $8 \times 8 \text{mm}^2$ . L'analyseur de front d'onde est calibré, il n'est donc nul besoin de rajouter une prise de référence optique. Le calibrage de l'analyseur est utilisé pour créer la consigne d'asservissement.

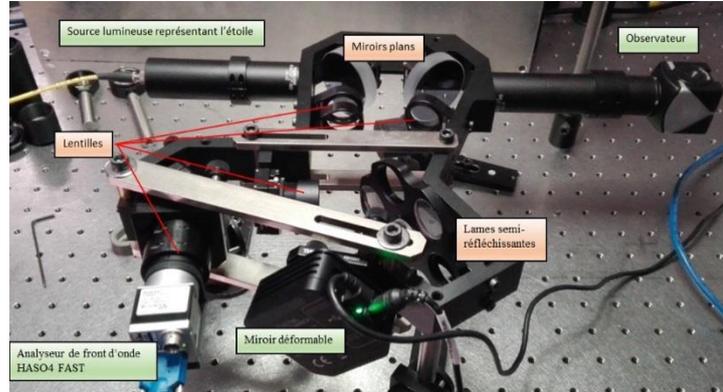


Photo 1 : Le système CIAO sur son banc optique de test

Un lot de lame de prélèvement sur une roue à barillet permet de sélectionner la quantité de flux envoyée vers l'analyseur par rapport à celui transmis vers la caméra d'imagerie. Des lames dichroïques peuvent également y être insérées.

### 3. SON INSTALLATION AU PIC DU MIDI, LES RESULTATS OBTENUS

Fin octobre 2017, nous avons bénéficié d'une météorologie favorable pour effectuer une campagne de mesure au Pic du Midi sur le télescope de 1m de diamètre ouvert à  $f/17$ . La table optique au foyer Nasmyth a grandement aidé à l'installation du prototype.



Photo 2 : Le système CIAO au foyer Nasmyth du TIM au pic du Midi

Les premières cibles observées ont été des étoiles. Celles-ci ont permis de tester le système dans une configuration classique d'optique adaptative car la source est ponctuelle. De très bons résultats ont été obtenus entre autre sur la planète Fomalhaut de magnitude 1.17 alors à  $17^\circ$  d'élévation. La tâche d'Airy du télescope est clairement visible dans des conditions de seeing de  $0.71$  arcsec. La boucle tournait alors à environ  $400 \text{Hz}$ . Un filtre centré à  $890 \text{nm}$  a permis de s'affranchir de la réfraction atmosphérique.

Dans des conditions équivalentes de seeing, la planète Mars a été visée et une multitude d'images courte pose ont été acquises par la caméra d'imagerie. Une série a été acquise dans une configuration en boucle fermée et une autre en configuration en boucle ouverte avec le miroir déformable mis à plan. Des traitements habituels de tris, de registrations, de rehaussement des contrastes ont été appliqués sur chacun des deux lots d'images pour être alors comparées.



Planche 1 : Gain apporté par CIAO sur Mars

Malgré la taille apparente très faible de la planète, la boucle a apporté un gain indéniable sur la résolution des images obtenues. Les images de Mars par les microlentilles formaient des taches suffisamment petites pour qu'elles soient séparées et pour que leur barycentre soit calculable. La boucle tournait à environ 200Hz.

### CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Nous avons montré qu'une approche reposant sur le fait d'utiliser des composants standards du marché permet de construire un système d'optique adaptative très performant. Les images obtenues de la planète Mars montrent un gain notable et permettent d'envisager une seconde campagne de mesure très prometteuse lorsque la planète sera dans une position plus favorable.

Le prototype CIAO continue d'être modifié et amélioré pour assurer son bon fonctionnement dans toutes les conditions de ciel, quel que soit l'objet observé à condition qu'il soit suffisamment lumineux et sur la plupart des télescopes. C'est en imagerie planétaire que l'on attend les résultats les plus spectaculaires.

Nous remercions le Programme National de Planétologie, le conseil scientifique de l'observatoire de Paris et l'Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides pour leur support financier.

### RÉFÉRENCES

- [1] The "Station de Planétologie des Pyrénées" (S2P), a collaborative science program in the course of a long history at Pic du Midi observatory, EPSC 2015
- [2] Jupiter's zonal winds and their variability studied with small-size telescopes. *Astronomy & Astrophysics*, Volume 554, id.A74, 11 pp
- [3] Episodic bright and dark spots on Uranus. *Icarus*, Volume 220, Issue 1, p. 6-22
- [4] Improving a 1 meter telescope in order to follow giant planets in a pro-am collaboration. Next step : an affordable adaptive optic system. EPSC2017-970

# Toward single cell seismology

Pol Grasland-Mongrain<sup>1</sup>, Ali Zorgani<sup>2</sup>, Shoma Nakagawa<sup>3</sup>, Simon Bernard<sup>1</sup>, Greg Fitzharris<sup>3,4</sup>, Stefan Catheline<sup>2,\*</sup>, Guy Cloutier<sup>1,5,\*</sup>

**Cellular elasticity or rigidity provides information on structure and impacts function of cellular systems. To map this parameter, scientists have developed techniques based on cell deformation, acoustic force microscopy or Brillouin scattering. However, current techniques are rather slow and still have difficulties to measure accurately cell elasticity. Here, we have developed an alternative technique inspired by the shear wave elastography field, and applied it to the micrometer scale. In presented experiments, elastic waves were mechanically induced in a mammalian oocyte using a vibrating micropipette. These waves were observed optically at 200,000 frames per second and tracked with a speckle-tracking algorithm. Whole cell elasticity was then mapped using an elastography method inspired by the seismology field. Using this approach, we are showing that the elasticity of mouse oocyte is decreased ( $p < 0.002$ ) when treated by cytochalasin B, an agent degrading the cell cytoskeleton. The technique is fast (less than 1 ms for data acquisition), precise (spatial resolution of a few micrometers), able to map internal cell structures, tractable and robust.**

The ability to measure the elasticity of a cell provides information about its anatomy, function and pathological state. For example, cell biomechanical properties are related to the cytoskeletal network arrangement and water content (Charras 2009). The cell membrane can harden or soften to modulate passage of biomolecules (Bleil 1980). Electrochemical activation is inducing rapid contraction and mechanical modulation of cell properties in electrophysiology and neurology. Notably, tumorous cells are characterized in a change of elasticity (Cross 2007) and therapies inducing fibrosis, necrosis and apoptosis are also accompanied by changes in tissue elasticity. Cytoskeleton reorganization is also linked to the activation process of immune cells and critical for effective cell-cell interactions, formation of immunological synapses and migration processes (Bufi 2015). These are a few examples emphasizing the importance of cell biomechanics in biology.

Many techniques have been proposed to measure cell mechanical properties, especially its elasticity. Most need a very accurate model of the cell characteristics but the chosen model may impact the measurement accuracy. Moreover, current measurements take

---

<sup>1</sup> Laboratory of Biorheology and Medical Ultrasonics, University of Montreal Hospital Research Center, Montréal, Québec, Canada, H2X 0A9;

<sup>2</sup> LabTAU, INSERM u1032, University of Lyon, Lyon, F-69003, France;

<sup>3</sup> Oocyte and Embryo Research Laboratory, University of Montreal Hospital Research Center, Montréal, Québec, Canada, H2X 0A9;

<sup>4</sup> Department of Obstetrics and Gynecology, University of Montreal, Montréal, Québec, Canada, H3T 1J4;

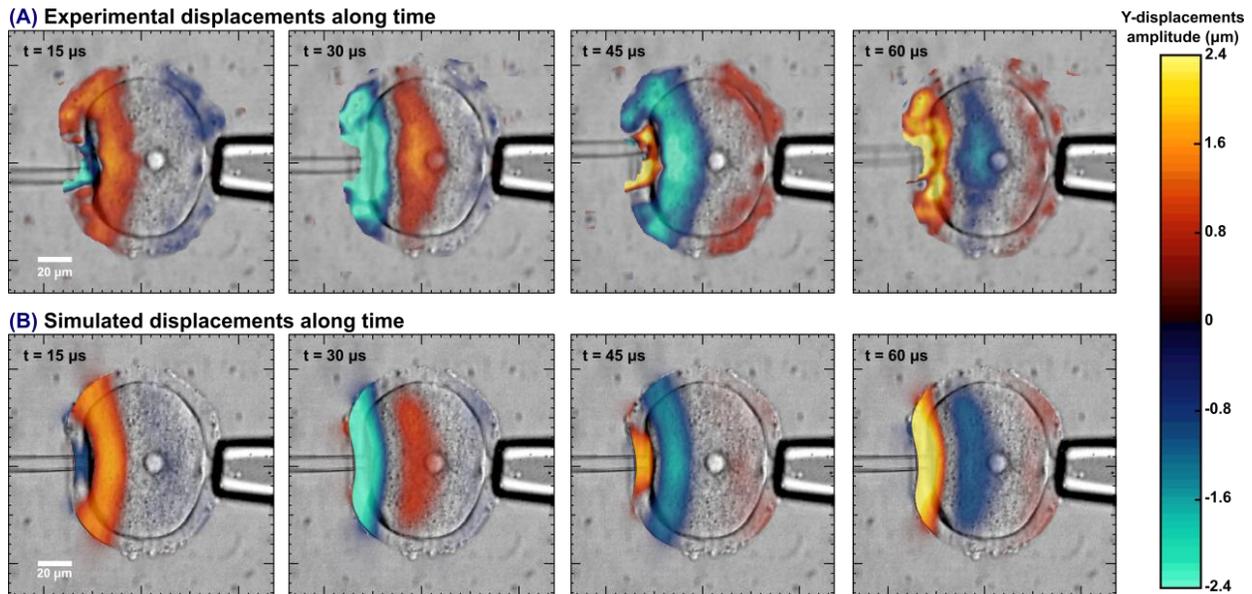
<sup>5</sup> Department of Radiology, Radio-Oncology and Nuclear Medicine, and Institute of Biomedical Engineering, University of Montreal, Montréal, Québec, Canada, H3T 1J4.

\*These authors contributed equally to this work.

seconds to hours to perform, during which biological processes can modify the cell elasticity, and they necessitate fixing the cell on a substrate. Variations in elasticity by a factor of two can occur within a few seconds (Liu 2012).

In this study, we propose a new elasticity measurement technique based on elastic wave propagation. The proposed technology was inspired by pioneer works in shear wave elastography developed for organ elasticity imaging (Kruskop 1987), (Muthupillai 1995), (Sarvazyan 1998), (Catheline 1999). This technique is based on the local measurement of the speed  $v_s$  of a shear wave, a type of elastic wave. By assuming an infinite and homogeneous medium with respect to the wavelength, the shear modulus  $\mu$  (elasticity) is given by  $\rho v_s^2$  with  $\rho$  the medium density.

Here, we show that the shear wave elastography technique can perform micrometer-scale measurements, and that it can extract local elasticity on a whole cell. Three main technological bolts needed to be overcome for this scope: (1) develop an efficient way to induce kHz-range high-frequency shear waves in cells; (2) find a robust method to track these waves; and (3) extract elasticity from the observed traveling elastic waves.



*Fig. 2: Experimental (top) and simulated (bottom) Y-displacement maps, at  $t = 15, 30, 45$  and  $60 \mu\text{s}$ , respectively, superimposed on the optical images of the cell. We can see displacements with amplitude approximately from  $-2.4$  to  $2.4 \mu\text{m}$  propagating from the left vibrating pipette towards the right side of the cell.*