

## TABLE DES MATIERES

### Sessions communes

## Lundi 4 juillet 2016

### 14:00 - Cérémonie d'ouverture - Session plénière 1

#### Grand Amphi

14:00	Mot de bienvenue pour le comité scientifique commun et le comité d'organisation local, Philippe LALANNE	
14:05	Ouverture par le président de la SFO, Benoît BOULANGER	
14:15	Mot introductif par le président de l'Université de Bordeaux, Manuel TUNON de LARA	
14:25	Cluster d'excellence de l'université de Bordeaux LAPHIA, Lionel CANIONI	
14:35	Le pôle de compétitivité Route des lasers , Jean Pierre GIANNINI ou Hervé FLOCH	
14:45	<b>L'effet Hong Ou et Mandel: au cœur de la seconde révolution quantique</b>	
	<u>A. Aspect</u> .....	1

## Mardi 5 juillet 2016

### 16:00 - Session plénière 2

#### Grand Amphi

16:00	<b>Quantum optics in photonic nanostructures using high-energy electrons</b>	
	<u>A. Polman</u> .....	2
16:40	<b>Confinement moléculaire : une nouvelle voie pour la nanophotonique?</b>	
	<u>M. Blanchard-Desce</u> .....	4
17:10	Lauréat du grand prix Léon Brillouin	

## Mercredi 6 juillet 2016

### 16:00 - Session plénière 3

#### Grand Amphi

16:00	<b>Des miroirs hors norme à l'écoute de l'espace-temps</b>	
	<u>J. Degallaix, L. Balzarini, V. Dolique, R. Flaminio, D. Forest, M. Granata, B. Lagrange, L. Pinard, C. Michel, N. Straniero, J. Teillon et G. Cagnoli</u> .....	7
16:30	<b>Étude du trou noir super-massif au centre de la Galaxie avec l'instrument GRAVITY</b>	
	<u>G. Perrin</u> .....	10
17:00	<b>Arrêter la lumière dans une fibre: la rencontre des atomes froids et de la nanophotonique</b>	
	<u>J. Laurat</u> .....	13
17:30	<b>Art et astronomie. Impressions célestes</b>	
	<u>Y. Nazé</u> .....	16

## Jeudi 7 juillet 2016

## **14:00 - Session plénière 4**

### **Grand Amphi**

14:00	<b>Générer et manipuler des photons uniques avec des atomes artificiels</b> <i>P. Senellart</i> .....	18
14:35	<b>Dynamiques ultrarapides paradoxales dans les lasers à fibre optique</b> <i>P. Grelu</i> .....	19
15:10	<b>Génération d'harmoniques, molécules chirales et dynamiques ultrarapides</b> <i>S. Beaulieu, A. Comby, R. Généaux, V. Blanchet, D. Descamps, A. Ferré, G. Garcia, Y. Mairesse, E. Mével, L. Nahon, S. Petit, B. Pons, T. Ruchon et B. Fabre</i> .....	21
15:40	<b>2015, Année de la Lumière en France est un immense succès !</b> <i>C. Subran</i> .....	24
16:00	Clôture et remerciements	

## **Mardi 5 juillet 2016**

### **14:00 - Rencontres pédagogiques**

#### **Grand Amphi**

14:00	<b>Quelques opticiennes (pas assez) célèbres</b> <i>C. Champenois</i> .....	25
14:20	<b>Le MOOC 'Physique des objets de quotidien'</b> <i>U. Delabre</i> .....	26
14:35	<b>Une approche expérimentale de l'optique en licence</b> <i>G. Latour, M. Godard et V. Guillet</i> .....	27
14:55	<b>Le plateau pédagogique laser de l'Université de Bordeaux au service de la formation initiale et continue</b> <i>I. Manek-Hömminger</i> .....	28
15:10	<b>Mallette pédagogique pour l'holographie : comment faire des expériences pour l'enseignement supérieur en s'affranchissant simplement des vibrations parasites</b> <i>A. Escarguel et R. Baude</i> .....	29

### **14:00 - Session industrielle**

#### **Amphi D**

14:00	<b>Photonique mondiale, stratégie et perspectives</b> <i>C. Subran</i> .....	30
14:15	<b>CNOP - Photonique française, actions et perspectives</b> <i>P. Brégi</i> .....	31
14:30	<b>ALPhANOV - Création d'entreprises autour des lasers à fibres: enjeu de l'intégration</b> <i>B. Appert-Collin</i> .....	32
14:45	<b>POIETIS, La start-up à l'interface photonique - bioimpression tissulaire</b> <i>B. Viellerobe</i> .....	33
15:00	<b>Accélérateur innovants de particules et de rayonnement par laser ultra-intense</b> <i>F. Sylla</i> .....	34
15:15	Présentations flash de 5 minutes	

### **17:30 - Assemblée Générale de la SFO**

#### **Grand Amphi**

17:30	Assemblée Générale	
-------	--------------------	--

### **18:30 - Session étudiante**

#### **Amphi D**

18:30	Quiz	
-------	------	--

# Sessions orales

## Mercredi 6 juillet 2016

### 8:45 - JRIOA - Laser

#### Amphi C

8:45	Extended field wavefront sensing for microscopy applications : Jérôme Mertz	
9:15	<b>Mesure et contrôle du champ d'un laser femto-seconde</b> <i>L. Blanco, N. Védrenne, L. Mugnier, F. Cassaing, V. Michau et G. Chériaux</i> .....	35
9:30	<b>L'optique adaptative dans les systèmes Laser de très haute puissance crête</b> <i>P. Jouglu, M. Charbonneau, F. Lureau, S. Laux, G. Matras, E. Durand, C. Radier, O. Chalus, S. Ricaud, A. Soujaeff, L. Boudjemaa et C. Simon-Boisson</i> .....	38
9:45	<b>Contrôle de front d'onde pour l'autofocalisation d'harmoniques d'ordres élevés</b> <i>L. Quintard, F. Catoire, E. Mével, V. Strelkov, D. Descamps et E. Constant</i> .....	39
10:00	<b>Adaptive optics for high-precision high-stability femtosecond laser engraving</b> <i>C. Javaux, A. Zoubir, R. Kling, A. Royon, B. Beaugrand et X. Levecq</i> .....	42
10:15	<b>Laser Apollon : efforts mis en œuvre pour sa qualité spatiale de faisceau</b> <i>J.P. Zou, G. Chériaux, D. Papadopoulos, C. Le Blanc, F. Druon, L. Martin, A. Fréneaux, A. Beluze, N. Lebas, I. Taghzout, J.L. Paillard, F. Mathieu, B. Le Garrec et P. Audebert</i> .....	43

### 11:00 - JRIOA - Applications émergentes — Miroirs déformables, composants actifs

#### Amphi C

11:00	<b>La plateforme PEMOA : outil de diffusion de l'Optique Adaptative</b> <i>O. Mollet, J.-F. Sauvage, K. El-Hadi, T. Fusco, V. Michau, J. Lopez, M. Ferrari et K. Mirochnitchenko</i> .....	44
11:15	<b>Nano-correction of Bimorph Mirrors for Synchrotron radiation Sources and XFELs</b> <i>L. Peverini, S. Perrin, H. Guadalupi, C. Du Jeu et J.J. Fermet</i> .....	47
11:30	<b>Détecteurs courbes et déformables: nouveaux composants pour l'optique active et adaptative</b> <i>W. Jahn, E. Hugot, M. Ferrari, J.-F. Sauvage et T. Fusco</i> .....	50
11:45	<b>FAME: un prototype de miroir freeform actif, nouveau composant pour les systèmes actifs et adaptatifs</b> <i>E. Hugot, M. Ferrari et S. Lemared</i> .....	51
12:00	<b>Les miroirs déformables à actionneurs magnétiques Alpao : applications, performances et développements.</b> <i>B. Charlet</i> .....	52

## Jeudi 7 juillet 2016

### 8:45 - JRIOA - Astronomie — Algorithmes et calculateurs de contrôle, traitements — Applications biomédicales

#### Amphi A

8:45	<b>Optique adaptative pour les futurs télescopes de 30-40 mètres de diamètre.</b> <i>J.-L. Beuzit</i> .....	53
9:00	<b>L'optique adaptative au service des grands télescopes terrestres</b> <i>N. Moussaoui</i> .....	54
9:15	<b>PSF Reconstruction for LGS MOAO systems</b> <i>O. Martin, C. Correia, É. Gendron et G. Rousset</i> .....	55
9:30	<b>Approche pseudo-analytique pour simuler l'OA à deux étages du spectrographe multi-objet E-ELT/MOSAIC</b> <i>C. Morel, É. Gendron et G. Rousset</i> .....	58
9:45	<b>Contrôle cohérent spatiotemporel de la lumière dans les milieux multi-diffusant</b> <i>M. Mounaix, D. Andreoli, H. Defienne, G. Volpe, O. Katz, S. Gresillon et S. Gigan</i> .....	61
10:00	<b>Contrôle de front d'onde ultra rapide pour focaliser dans des milieux diffusants biologiques</b> <i>B. Blochet, D. Martina, L. Bourdieu et S. Gigan</i> .....	64
10:15	<b>Stabilisation au nanomètre d'un microscope optique par imagerie de phase quantitative</b> <i>P. Bon, J. Wenger et S. Leveque-Fort</i> .....	67

## 11:00 - JRIOA - Applications biomédicales

### Amphi A

11:00	<b>Exploration 3D de la Rétine pour la Chirurgie Laser et l'Imagerie</b> <i>P. Baraçal De Mecê, S. Meimon et M. Paques</i> .....	69
11:15	<b>PARIS'S High Speed Adaptive Optics Flood Illumination Ophthalmoscope</b> <i>E. Gofas Salas, M. Paques, C. Petit, S. Meimon, L. Mugnier, A. Bonnefois, L. Blanco, J. Montri, B. Fleury et F. Mendez</i> .....	71
11:30	<b>Design optique innovant pour l'imagerie corticale à grand champ</b> <i>W. Jahn, J.-F. Sauvage, T. Fusco, F. Chavane, S. Roux, E. Hugot et M. Ferrari</i> .....	74
11:45	<b>Imagerie de Phase Quantitative en Microscopie</b> <i>S. Aknout, J. Savatier, B. Wattellier et S. Monneret</i> .....	76
12:00	<b>Approche Matricielle de la Propagation des Ondes en Milieux Complexes : Application à l'Imagerie.</b> <i>A. Badon, G. Lerosey, C. Boccara, M. Fink et A. Aubry</i> .....	77
12:15	<b>Optique adaptative pour l'imagerie de l'activité neuronale de la souris éveillée</b> <i>D. Champelovier, J. Teixeira, A. Malvache, J.-M. Conan, S. Meimon, L. Mugnier, R. Cossart, H. Rigneault et S. Monneret</i> .....	80
12:30	<b>Optique Adaptative pour l'Optimisation de la Focalisation de Lasers jusqu'à F/1</b> <i>I. Doucet, D. Brahmi et B. Wattellier</i> .....	82

### Stands pédagogiques

S0	<b>Mallette pédagogique pour l'holographie : comment faire des expériences pour l'enseignement supérieur en s'affranchissant simplement des vibrations parasites</b> <i>A. Escarguel et R. Baude</i> .....	83
S1	<b>HOBIT : Hybrid optical benches for innovative teaching</b> <i>B. Bousquet, L. Canioni, J.-P. Guillet, M. Hachet, S. Fleck, D. Furio, B. Coulais et J. Bergognat</i> .....	84
S2	<b>La tomographie par cohérence optique : un projet expérimental</b> <i>G. Latour, M. Godard, V. Guillet et M. Jacquy</i> .....	85
S3	<b>VP2L : Un Serious Game en réalité virtuelle 3D appliqué à la formation aux technologies optique et laser</b> <i>L. Dutertre, B. Fabre, E. D'Humières, S. Petit, D. Lyoen, J. Dronval, E. Boeri et E. Cormier</i> .....	86
S4	<b>Un ensemble polyvalent d'expériences optiques de démonstration</b> <i>R. Mathevet</i> .....	87

## L'EFFET HONG OU ET MANDEL: AU CŒUR DE LA SECONDE REVOLUTION QUANTIQUE

Alain Aspect<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut d'Optique Graduate School, 2 avenue augustin fresnel, 91127 Palaiseau, France

[alain.aspect@institutoptique.fr](mailto:alain.aspect@institutoptique.fr)

### RÉSUMÉ

On sait que la seconde révolution quantique repose sur l'intrication, découverte par Einstein et Schrödinger en 1935, et dont le caractère extraordinaire est mis directement en évidence par la violation expérimentale des inégalités de Bell. Bien que découvert après ces expériences, en 1986, l'effet Hong Ou et Mandel, lui aussi basé sur l'intrication, est conceptuellement plus simple. Dans notre programme visant à revisiter les grandes étapes de l'optique quantique en remplaçant les photons par des atomes, nous avons récemment réussi à observer l'effet Hong Ou et Mandel avec des atomes d'hélium métastable. Après avoir présenté l'effet Hong Ou et Mandel original et expliqué son importance dans le développement de l'optique quantique, je décrirai notre expérience récente, et évoquerai nos projets de tests des inégalités de Bell avec des atomes intriqués.

**MOTS-CLEFS :** *effet hong ou et mandel ; optique quantique ; atome intriqué*

# QUANTUM OPTICS IN PHOTONIC NANOSTRUCTURES USING HIGH-ENERGY ELECTRONS: FEMTOSECOND PLASMONIC AND PHOTONIC WAVEPACKETS ON METASURFACES

**Albert Polman**

*Center for Nanophotonics, FOM Institute AMOLF, Amsterdam, the Netherlands*

[polman@amolf.nl](mailto:polman@amolf.nl)

## RÉSUMÉ

We use 30 keV electrons to create femtosecond plasmonic and photonic wave packets from metallic and dielectric metasurfaces, determining their polarization- and angle-resolved emission spectra, resonant modal field density of states and dispersion, and 3D tomographic field reconstructions.

**MOTS-CLEFS :** *cathodoluminescence, metasurfaces, wavepackets*

## 1. INTRODUCTION

A fast electron beam passing through the surface of a polarizable material generates a single-cycle electric field oscillation near the surface that couples strongly to the free or bound electrons in the material. This ultrafast field oscillation presents a spectrally broadband excitation from deep UV to near IR, and the nanoscale electron probe size results in deep-subwavelength spatial excitation resolution. Indeed, electron beam excitation is one of the purest forms of optical excitation, directly addressing the quantum nature of optical matter.

## 2. EXPERIMENTS AND RESULTS

We use a 30 keV electron beam to create femtosecond plasmonic and photonic wave packets from metallic and dielectric metasurfaces. The electron beam is raster-scanned over the sample while the emitted light is collected (“cathodoluminescence”). In this way an optical excitation map is made that reflects the local optical density of states, at a spatial resolution well below the optical diffraction limit.

From the images the dispersion and local modes of resonant plasmonic and dielectric nanostructure are directly determined. In angle-resolved mode, the azimuthal and zenithal CL emission distributions are measured, probing the angular radiation profile of optical nanoantennas and allowing for momentum spectroscopy to reconstruct the optical band structure in photonic and plasmonic crystals. In polarization-resolved mode, the full polarization state of the emitted light is determined, allowing distinction between linearly and circularly polarized light in a spatially and angle-resolved way. In tomographic mode, 2D CL images are taken under multiple angles of incidence, and a 3D image of the local field distributions is obtained from a tomographic construction. We perform analytical calculations of the time evolution of the plasmonic and photonic fields and show they correspond to wave packets composed of 5-10 optical cycles.



Figure 1. Cathodoluminescence microscope developed at AMOLF using a 30 keV electron beam and a parabolic mirror light collector.

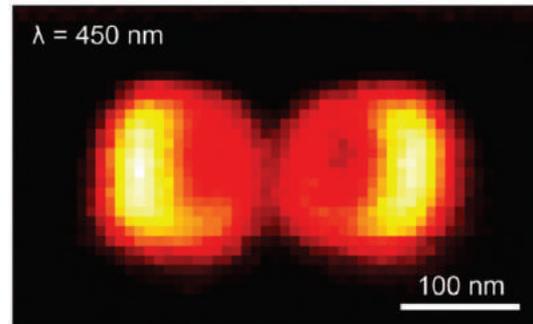


Figure 2. Cathodoluminescence image of  $p_x$ - $p_x$  hybridized silicon Mie resonator bonding modal field at  $\lambda=450$  nm.

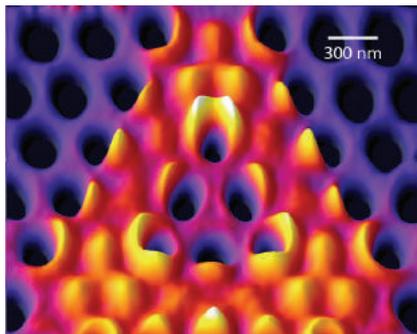


Figure 3. Cathodoluminescence microscopy image of photonic crystal cavity field distribution in SiN membrane, taken at  $\lambda=700$  nm.

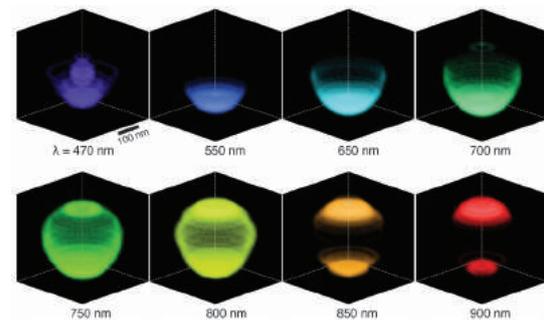


Figure 4. 3D Tomographic reconstruction of localized modes in PMMA/Au core-shell cusp cavity measured with cathodoluminescence.

## RÉFÉRENCES

- [1] For details: see: [www.erbium.nl/arcis](http://www.erbium.nl/arcis)
- [2] Direct imaging of hybridized eigenmodes in coupled silicon nanoparticles, J. van de Groep, T. Coenen, S.A. Mann, and A. Polman, *Optica* **3**, 93 (2016)
- [3] Nanoscale spatial coherent control over the modal excitation of a coupled plasmonic resonator system, T. Coenen, D.T. Schoen, S.A. Mann, S.R.K. Rodriguez, B.J.M. Brenny, A. Polman, and M.L. Brongersma, *Nano Lett.* **15**, 7666 (2015)
- [4] Nanoscale optical tomography with cathodoluminescence spectroscopy, A. Atre, B.J.M. Brenny, T. Coenen, A. Polman and J.A. Dionne, *Nature Nanotech.* **10**, 429 (2015)
- [5] Experimental verification of  $n=0$  structures for visible light, E.J.R. Vesseur, T. Coenen, H. Caglayan, N. Engheta, and A. Polman, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 013902 (2013)
- [6] Deep-subwavelength imaging of the modal dispersion of light, R. Sapienza, T. Coenen, J. Renger, M. Kuttge, N.F. van Hulst, and A. Polman, *Nature Mater.* **11**, 781 (2012)

## CONFINEMENT MOLECULAIRE: UNE NOUVELLE VOIE POUR LA NANOPHOTONIQUE ?

Mireille Blanchard-Desce

Institut des Sciences Moléculaires UMR CNRS 5255, Université de Bordeaux, 33405 Talence, France

[mireille.blanchard-desce@u-bordeaux.fr](mailto:mireille.blanchard-desce@u-bordeaux.fr)

### RÉSUMÉ

Une approche « bottom-up » exploitant le confinement moléculaire permet d'accéder à des nanoparticules hyperbrillantes, accordables et présentant des réponses optiques exaltées, d'intérêt majeur pour l'imagerie.

**MOTS-CLEFS :** *nanophotonique, fluorescence, absorption non-linéaire*

### 1. INTRODUCTION

Le champ de la nanophotonique connaît actuellement un fort développement lié tant à la recherche de propriétés et comportements inédits qu'aux potentialités ouvertes dans différents domaines allant de l'énergie aux sciences du vivant. Les nanomatériaux qui ont suscité le plus d'intérêt dans ce domaine sont essentiellement inorganiques (i.e. métalliques, semi-conducteurs, oxydes...). Toutefois la voie « tout-organique » et plus particulièrement celle basée sur l'utilisation de petites molécules spécialement adaptées constitue une piste particulièrement prometteuse.<sup>[1]</sup> Ainsi, si les quantum dots sont associés à des développements majeurs en imagerie (*in vivo*, super-résolution...) et leur succès lié à leurs remarquables propriétés optiques, ils présentent toutefois certaines limitations en termes de biodégradabilité et de toxicité. Par ailleurs, du fait du confinement quantique, la modulation de leur taille s'accompagne d'une modulation de leur fluorescence (i.e. déplacement vers les plus grandes longueurs d'onde avec l'augmentation de taille). Dans ce contexte nous avons mis en place une démarche « bottom-up » basée sur le *confinement moléculaire* de chromophores organiques originaux au sein de nanoparticules « tout-organiques ». Notre but était d'accéder à des nanoparticules luminescentes de taille et couleur indépendamment contrôlables, hyperbrillantes, stables en milieu biologique, biocompatibles et présentant une excellente photostabilité. La réalisation de tels nano-objets photoniques - à base exclusive de molécules- constituait toutefois un défi tant en termes de stabilité, qu'en termes de propriétés optiques dans la mesure où les fluorophores organiques sont connus pour leur plus faible brillance et leur moins bonne résistance au photoblanchiment, vis-à-vis notamment des quantum dots.

### 2. UNE STRATEGIE BOTTOM-UP BASEE SUR LE CONFINEMENT DE CHROMOPHORES MULTIPOLAIRES POLARISABLES

L'approche mise en œuvre s'appuie sur une classe de nanoparticules relativement récente et présentant néanmoins des potentialités majeures en optique: les nanoparticules fluorescentes à base de petites molécules (aussi désignées par l'acronyme FONs pour Fluorescent Organic Nanoparticles).<sup>[1]</sup> Ces nanoparticules peuvent être préparées dans l'eau, par simple auto-agrégation spontanée de molécules particulières (i.e. spécifiquement « conçues pour »). Cette approche repose sur une véritable « ingénierie » des sous-unités moléculaires (i.e. chromophores) constituant la nanoparticule et une maîtrise des effets d'interactions entre ces sous-unités. Cette double contrainte est une des caractéristiques majeures des nanoparticules à base de molécules, à l'origine à la fois de leur spécificité, de leur richesse et de leur complexité. En effet, dans le cas des nanoparticules incorporant des colorants organiques classiquement utilisées (i.e. à base de silice, de polymères, de lipides, ou de tensioactifs), les molécules de colorants sont dispersées et n'interagissent pas (ou peu)

entre-elles. La situation est tout autre dans le cas des FONs car ce sont au contraire les forces intermoléculaires qui en assurent la cohésion, produisant des édifices organisés et stables dans l'eau. Au-delà, ces interactions peuvent être manipulées et exploitées pour *modifier* les caractéristiques optiques des nanoparticules. Le design des FONs relève donc d'un exercice subtil de « lego moléculaire interactif » dans lequel non seulement la nature des sous-unités moléculaires joue un rôle mais leur assemblage module leur couleur et leur brillance. Le choix des unités chromophoriques et de leur mode d'interaction est donc déterminant et la démarche d'ingénierie doit intégrer les deux niveaux. Dans ce contexte, la stratégie que nous avons mis en œuvre repose sur le design et l'utilisation de *chromophores multipolaires polarisables* (dipolaires, quadrupolaires, octupolaires) spécifiquement dédiés (Figure 1).

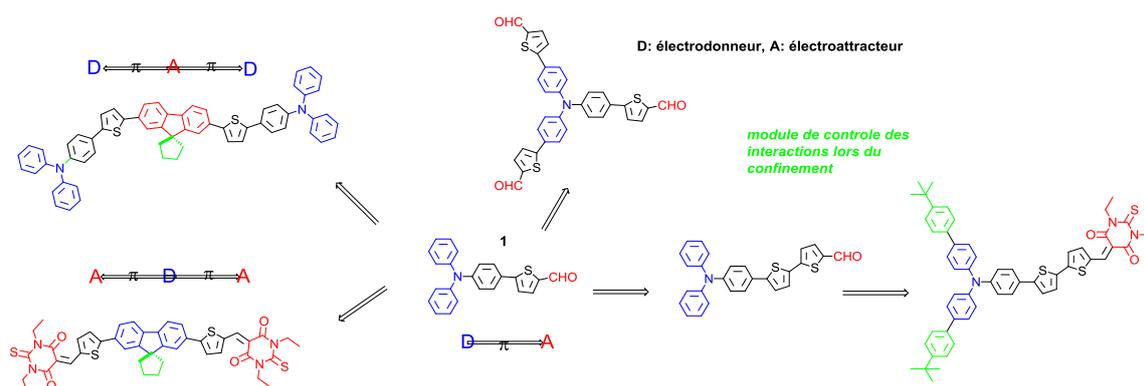


Fig. 1 : Exemples de chromophores multipolaires polarisables dédiés à l'élaboration de nanoparticules organiques ultra-brillantes et accordables.

La structure des chromophores (D, A, connecteur  $\pi$  conjugué) permet de moduler aisément leurs propriétés d'absorption et de fluorescence et leur confère des propriétés optiques non-linéaires marquées. De tels systèmes sont de plus destinés à engendrer de fortes *interactions électrostatiques* lors de leur confinement. La stratégie choisie consiste à la fois à *amplifier* (en jouant sur les distances et les dipôles locaux) et à *orienter* (en jouant sur la topologie de la molécule et sa géométrie) ces interactions pour moduler et exalter les réponses optiques lors du confinement moléculaire. Ceci concerne tant (i) la luminescence (via l'intervention de couplages excitoniques pouvant conduire à une amplification et décalage de l'émission) que (ii) les réponses optiques non-linéaires.

La nature même de ces chromophores (polarité *et* polarisabilité élevées) ouvrait des possibilités jusqu'alors inexplorées et nous a effectivement permis d'accéder à une palette de nanoparticules de tailles modulables (5-50 nm) et couleurs variées (balayant le visible jusqu'au proche infra-rouge), présentant de plus des brillances comparables, voire très supérieures à celles des quantum dots.<sup>[2-6]</sup> Il est de plus possible d'exalter les réponses optiques non-linéaires et la luminescence de telles nanoparticules en pilotant en amont les interactions,<sup>[6]</sup> mais également de développer des *nanoparticules tout-organiques cœur-écorce* qui présentent à la fois un confinement de la luminescence à l'interface entre le cœur et l'écorce et une exaltation des réponses optiques.<sup>[7]</sup>

### 3. VERS DES NANOTRACEURS HYPERBRILLANTS POUR L'IMAGERIE DU VIVANT

L'ingénierie moléculaire des sous-unités chromophoriques constituant la nanoparticule permet également de moduler les propriétés de surface des nanoparticules. Ces dernières sont très importantes car elles déterminent la stabilité des nanoparticules et influent fortement sur leur devenir en milieu biologique, un paramètre crucial pour l'utilisation de ces nanoparticules comme traceurs ou marqueurs en imagerie du vivant. Ainsi des nanoparticules *ultrabrillantes biocompatibles* et *extrêmement* stables en milieu biologique ont pu être obtenues et utilisées en

imagerie *in vivo* (microscopie biphotonique) pour réaliser l'angiographie sur le petit animal<sup>[2]</sup> et en démontrer l'innocuité. Plus encore, il est possible en jouant sur la nature des sous-unités chromophoriques, de produire des nanoparticules dotées d'une remarquable résistance au photoblanchiment. Cette propriété (inédite pour les composés organiques) permet de réaliser un suivi spatio-temporel de particules uniques, ouvrant la voie à une *imagerie dynamique multicolore* aussi bien en milieu aqueux qu'à l'intérieur des cellules (Figure 2).<sup>[4,7]</sup>

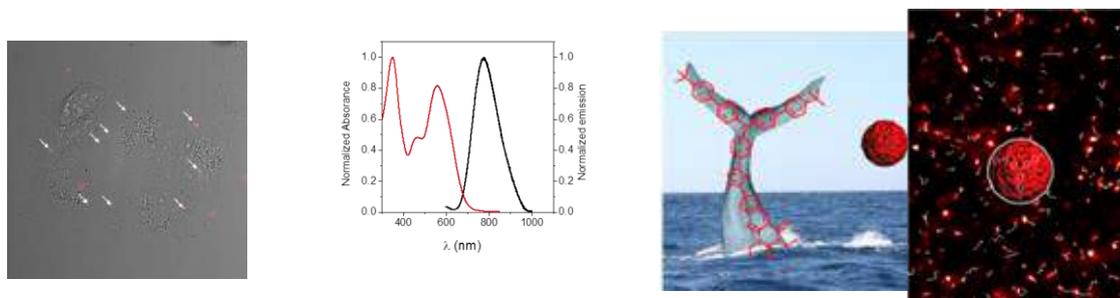


Fig. 2 : Imagerie de nanoparticules hyper-brillantes émettrices dans le proche IR (HIFONs) dans des cellules COS (gauche) et suivi dans l'eau (droit) <sup>[4]</sup>

## CONCLUSION

Le confinement contrôlé de modules chromophoriques « interactifs » multipolaires et polarisables constitue une approche originale qui permet d'accéder à des nanoparticules hyperbrillantes et biocompatibles, combinant brillances exceptionnelles et (stabilité et) photostabilité remarquables, tout en s'affranchissant des problèmes de toxicité intrinsèque aux nanoparticules semi-conductrices. De ce fait, ces nano-objets ouvrent des perspectives très importantes en imagerie du vivant et nanoscopie. De plus des effets de confinement de luminescence et d'exaltation des propriétés optiques non-linéaires inédits ouvrent un nouveau champ en nanophotonique moléculaire.

## RÉFÉRENCES

- [1] A. Patra, C. G. Chandaluri, and T. P. Radhakrishnan, "Optical materials based on molecular nanoparticles," *Nanoscale*, vol. 4, 343-359, 2012.
- [2] V. Parthasarathy, S. Fery-Forgues, E. Campioli, G. Recher, F. Terenziani, and M. Blanchard-Desce, "Dipolar versus Octupolar Triphenylamine-Based Fluorescent Organic Nanoparticles as Brilliant One- and Two-Photon Emitters for (Bio)imaging", *Small*, vol. 7, pp. 3219-3229, 2011.
- [3] K. Amro, J. Daniel, G. Clermont, T. Bsaibess, M. Pucheault, E. Genin, M. Vaultier, and M. Blanchard-Desce, "A New Route towards Fluorescent Organic Nanoparticles with Red-shifted Emission and Increased Colloidal Stability," *Tetrahedron*, vol. 70, pp. 1903-1909, 2014.
- [4] E. Genin, Z. Gao, J. A. Varela, J. Daniel, T. Bsaibess, I. Gosse, L. Groc, L. Cognet, and M. Blanchard-Desce, "«Hyper-bright» Near-Infrared Emitting Fluorescent Organic Nanoparticles for Single Particle Tracking," *Adv. Mater.*, vol. 26, pp. 2258-2261, 2014.
- [5] J. Daniel, A. G. Godin, M. Palayret, B. Lounis, L. Cognet, and M. Blanchard-Desce, "Innovative molecular-based fluorescent nanoparticles for multicolor single particle tracking in cells," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 49, pp. 084002-084012, 2016.
- [6] J.-B. Verlhac, J. Daniel, P. Pagano, G. Clermont, and M. Blanchard-Desce, "Enhanced two-photon brightness in molecular-based organic nanoparticles built from articulated-dipoles", *C. R. Chimie*, vol. 19, pp. 28-38, 2016.
- [7] E. Campioli, C. Rouxel, M. Campanini, L. Nasi, M. Blanchard-Desce, F. Terenziani, "Enforcing Luminescence at Organic Nanointerfaces: Luminescence Spatial Confinement and Amplification in Molecular-Based Core-Shell Nanoparticles," *Small*, vol.9, pp. 1982-1988, 2013; E. Campioli, D.-M. Nikolaidou, V. Hugues, M. Campanini, L. Nasi, M. Blanchard-Desce, F. Terenziani, "Amplified Two-Photon Brightness in Organic Multicomponent Nanoparticles," *J. Mater. Chem. C*, vol. 3, pp. 7483-7491, 2015.

## DES MIROIRS HORS NORME À L'ÉCOUTE DE L'ESPACE-TEMPS

Jérôme Degallaix<sup>1</sup>, Laurent Balzarini<sup>1</sup>, Vincent Dolique<sup>1</sup>, Raffaele Flaminio<sup>2</sup>, Danièle Forest<sup>1</sup>, Massimo Granata<sup>1</sup>, Bertrand Lagrange<sup>1</sup>, Laurent Pinard<sup>1</sup>, Christophe Michel<sup>1</sup>, Nicolas Straniero<sup>1</sup>, Julien Teillon<sup>1</sup>, Gianpetro Cagnoli<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Laboratoire des Matériaux Avancés (LMA), IN2P3/CNRS, 69100 Villeurbanne, France*

<sup>2</sup> *National Astronomical Observatory of Japan, 2-2-1 Osawa, Mitaka, 181-8588 Tokyo, Japon*

j.degallaix@lma.in2p3.fr

### RÉSUMÉ

Dans cette article les défis dans la réalisation des grandes optiques des détecteurs interférométriques d'ondes gravitationnelles sont présentés. Ces instruments, de plusieurs kilomètres de long, utilisent les optiques les plus précises jamais réalisées, et ce, tant au niveau du polissage que du dépôt.

**MOTS-CLEFS :** *Miroirs ; Ondes gravitationnelles ; Dépôts ;*

### 1. A L'AUBE D'UNE NOUVELLE ASTRONOMIE

Le 11 Février 2016 e été marqué par l'annonce par la collaboration LIGO et Virgo de la première détection directe des ondes gravitationnelles sur Terre [1]. Cet évènement marque le début d'une révolution avec un moyen d'observation totalement inédit, sensible aux perturbations mêmes de l'espace temps. Outre que cette découverte confirme de manière éclatante la théorie de la Relativité Générale dans des régimes jamais testés auparavant, elle ouvre aussi une nouvelle fenêtre sur l'univers. Cette nouvelle astronomie va permettre de comprendre les mécanismes de formation des trous noirs massifs, de recenser les objets binaires comme les couples d'étoiles à neutron, de comprendre la nature des pulsars ou bien l'origine des sursauts de rayons gamma. Et ceci n'est possible qu'avec des détecteurs interférométriques qui repoussent les limites de la technologie.

### 2. DES INTERFÉROMÈTRES DE L'EXTRÊME

Le principe du détecteur d'onde gravitationnelle est basée sur un interféromètre de Michelson géant. En particulier, les deux bras perpendiculaires sont des cavités Fabry-Pérot longues de plusieurs kilomètres. Le schéma optique simplifié du détecteur est présenté sur la figure 1.

Le miroir de fond des cavités des bras est extrêmement réfléchissant (transmission de quelques ppm), ce qui a pour conséquence que toute la lumière incidente sur la cavité est aussi réfléchi par celle-ci. Comme le détecteur opère sur la frange noire (peu de lumière arrive sur la détection), une grande majorité de la lumière du laser retourne vers celui-ci. Afin qu'elle ne soit pas perdue, un miroir dit de recyclage de puissance est inséré entre le laser et le Michelson. De même, un miroir dit de recyclage de signal est inséré entre la séparatrice et le système de détection afin de changer la réponse optique du détecteur. Cette technique permet d'ajuster la gamme de fréquences où le détecteur est le plus sensible.

Le laser du détecteur est de 200 W, mais seulement 125 W atteignent l'entrée de l'interféromètre au niveau du miroir de recyclage de puissance. Typiquement 5 kW circulent dans partie centrale et jusqu'à 600 kW dans les bras pour le détecteur Virgo en Italie. Pour contrecarrer les effets thermiques dus à ces fortes puissances, les interféromètres ne peuvent fonctionner qu'avec un système de compensation thermique perfectionné, tant au niveau des senseurs que des actuateurs.

Afin de limiter l'effet de lentille thermique et du bruit thermique Brownien des miroirs, il est souhaitable d'avoir un faisceau laser le plus étendu possible. De ce fait, la taille du faisceau est de l'ordre de 5 cm de rayon sur les miroirs de l'interféromètre. Donc pour limiter les pertes, les optiques font 350 mm de diamètre de 35 mm d'épaisseur (lame compensatrice) jusqu'à 200 mm pour les miroirs des bras. La séparatrice de part son orientation est la plus grande optique avec 550 mm de diamètre.

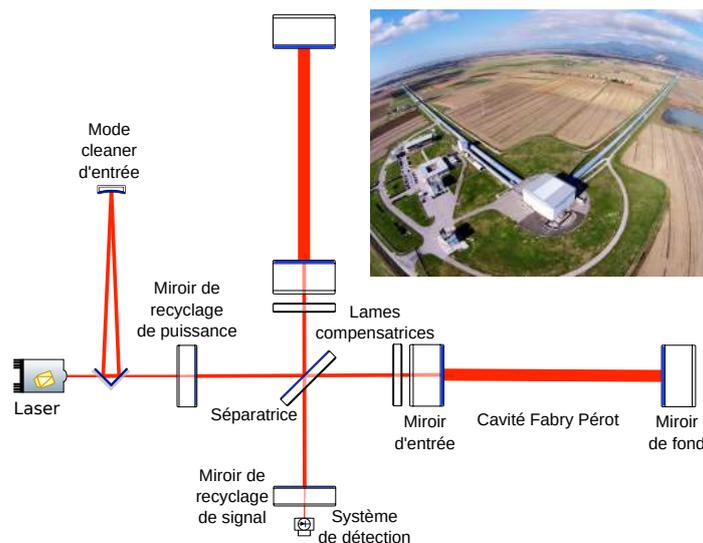


FIGURE 1 : Schéma optique typique d'un détecteur d'ondes gravitationnelles. Dans l'encart, une vue aérienne du détecteur Virgo en Italie avec ses bras perpendiculaires de 3 km de long.

### 3. LES SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES DES OPTIQUES

Dans cette partie, nous allons nous focaliser sur les miroirs d'entrée et de fond des bras, qui sont les optiques les plus critiques et donc celles avec les spécifications les plus contraignantes. Nous prendrons l'exemple des miroirs pour Advanced Virgo [2], sachant que les paramètres pour Advanced LIGO sont très similaires.

Les substrats des miroirs sont faits dans du verre ultra-pur et mesurent 350 mm en diamètre pour 200 mm d'épaisseur. Il fut décidé de les tailler dans la dernière génération de verre Suprasil développée par Heraeus (Suprasil 3002) pour les miroirs d'entrée. Ce verre présente une très bonne homogénéité et une absorption en volume exceptionnellement basse de l'ordre de 0.2 ppm/cm à 1064 nm. Pour les miroirs de fond traversés par très peu de lumière, les contraintes sont moins strictes ; du Suprasil 312 a été choisi.

Afin de limiter les pertes de lumière par aller retour dans les bras de 3 km (but : moins de 75 ppm de lumière doit être perdue par aller retour), des spécifications très strictes au niveau de la planéité et de la rugosité ont été demandées aux polisseurs. Ici nous résumons, les trois principales spécifications :

- Rayons de courbure de 1420 m et 1683 m ( $\pm 10$  m) respectivement pour les miroirs d'entrée et de fond. Les 4 pièces pour chaque type de miroir, doivent avoir tous leurs rayons identiques à  $\pm 3$  m.
- Planéité inférieure à 0.5 nm RMS dans la partie centrale de 150 mm de diamètre (pour les fréquences spatiales inférieures à  $1 \text{ mm}^2$ ).
- Micro-rugosité inférieure à 1 Å RMS.

Les dépôts sur les substrats polis sont faits au LMA à Villeurbanne par la technique de pulvérisation par faisceau d'ions. Là aussi, les spécifications sont à la limite de la technologie avec sur la partie centrale :

- Planéité inférieure à 0.5 nm RMS après dépôt.
- Absorption inférieure à 0.5 ppm à 1064 nm.
- Diffusion inférieure à 10 ppm.
- Transmission des miroirs d'entrée  $T = 1.4 \pm 0.1\%$  avec  $\Delta T < 0.01\%$  pour les deux miroirs d'entrée.
- Transmission des miroirs de fond  $T = 4 \pm 1$  ppm.
- Dépôt anti-réfléchissant à 3 bandes (532, 800 et 1064 nm), avec  $R < 100$  ppm à 1064 nm.

#### 4. DES PERFORMANCES OPTIQUES INÉDITES

Malgré des spécifications de surface très contraignantes, le polissage de ces grandes pièces fut un succès. Il a fallu renouveler ce succès aussi pour le traitement de ces pièces.

Pour garantir la similitude des miroirs, deux substrats doivent être mis en même temps dans la machine de dépôt. De plus, pendant la déposition des couches minces les substrats se déplacent dans un mouvement planétaire afin d'atteindre les spécifications de planéité précisées aussi après dépôt. Après plusieurs années de recherche et développement au niveau de la technique de déposition et des matériaux utilisés [3], toutes les spécifications demandées ont pu être atteintes. Ici nous revenons sur quelques faits marquants.

La plus grande difficulté pour les dépôts venait des exigences de planéité. Un exemple de résultat est présenté en figure 2 avec une mesure de la surface du miroir avant et après dépôt avec la même échelle de couleur. Malgré l'ajout de  $6 \mu\text{m}$  pour rendre le substrat réfléchissant le RMS est seulement passé de  $0.3 \text{ nm}$  à  $0.4 \text{ nm}$  sur la partie centrale de  $150 \text{ mm}$  de diamètre.

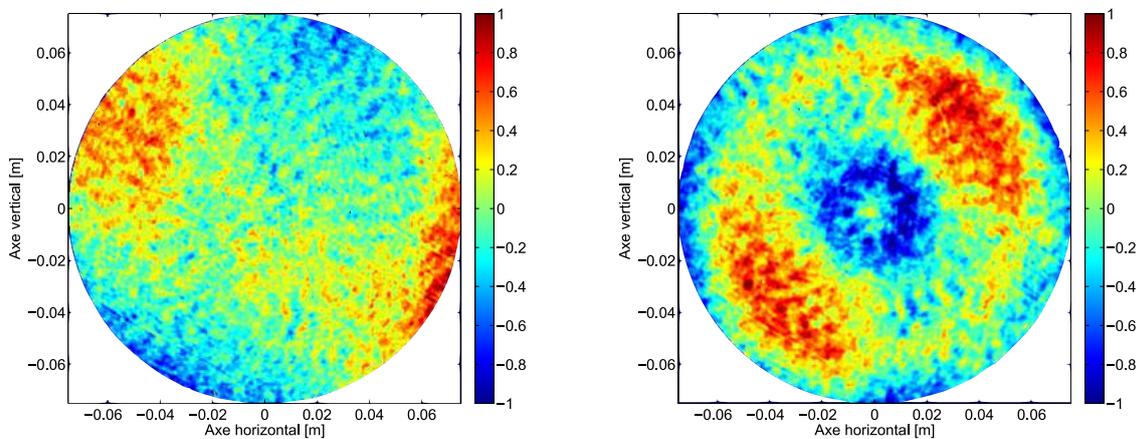


FIGURE 2 : Image de la planéité d'un miroir de fond avant (gauche) et après dépôt (droite). L'échelle de couleur est en nanometre et identique pour les deux images.

Une seconde difficulté importante était la qualité de l'anti-reflet. Un nouveau design d'empilement a été trouvé avec 16 couches et s'est avéré robuste par rapport aux erreurs de déposition. Ce qui a donné pour résultat, une réflexion inférieure à  $32 \pm 10 \text{ ppm}$  pour  $1064 \text{ nm}$  sur la partie centrale.

La similitude en transmission des miroirs d'entrée fut aussi un succès, avec une différence de transmission de  $0.002\%$ . La diffusion moyenne des miroirs a été mesurée sur la partie centrale à  $4 \text{ ppm}$  en moyenne.

#### 5. PERSPECTIVES

De par leur tailles et leurs spécifications, les miroirs des détecteurs d'ondes gravitationnelles ont repoussé les limites de la technologie. L'aventure ne s'arrête pas là, puisque déjà une nouvelle génération de détecteurs est prévue avec des optiques plus grandes et plus performantes pour des détecteurs toujours plus sensibles à l'écoute des murmures gravitationnels de l'univers.

#### RÉFÉRENCES

- [1] The LIGO and Virgo Collaborations, "Observation of gravitational waves from a binary black hole merger," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 116, pp. 061102, 2016.
- [2] Virgo Collaboration, "Advanced Virgo Technical Design Report," Virgo TDS link, 2012.
- [3] L. Pinard *et al.*, "Toward a new generation of low-loss mirrors for the advanced gravitational waves interferometers," *Opt. Lett.*, vol. 36, pp. 1407-1409, 2011.

## L'EXPLORATION DU TROU NOIR AU CENTRE DE LA GALAXIE AVEC GRAVITY

Guy Perrin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LESIA, Observatoire de Paris, PSL Research University, CNRS, Sorbonne Universités, UPMC Univ. Paris 06, Univ. Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité

guy.perrin@obspm.fr

### RÉSUMÉ

Le centre de notre galaxie abrite un objet de 4 millions de fois la masse du Soleil, Sagittarius A\*, probablement un trou noir super-massif. L'interféromètre GRAVITY du VLTI a pour ambition de tester l'hypothèse du trou noir, d'en étudier la nature et d'explorer la gravitation en champ fort. Lancé en 2005, le projet a connu sa première lumière à la fin de 2015. Des premiers résultats sur Sagittarius A\* et son environnement sont attendus en 2017.

**MOTS-CLEFS :** *Trou noir ; centre galactique ; interférométrie ; infrarouge*

### 1. LE CŒUR DE LA VOIE LACTÉE

La Voie Lactée abrite en son centre une source radio intense et compacte, la plus intense dans cette région du ciel, Sagittarius A\* ou Sgr A\* [1]. Le centre galactique est constellé de sources ponctuelles dont la grande majorité sont des étoiles. Les étoiles les plus au centre, l'amas des étoiles S, jouent un rôle particulier dans la détermination de la nature de Sgr A\*.

### 2. LA NATURE DE SAGITTARIUS A\*

L'étude de leur mouvement est devenue possible grâce à la montée en puissance des techniques de haute résolution angulaire dans l'infrarouge, avec l'interférométrie des tavelures d'abord, puis avec l'optique adaptative ensuite. Les étoiles ont ainsi été suivies individuellement depuis les années 90 et leurs orbites ont pu être reconstruites. L'application de la troisième loi de Kepler fournit une estimation de la masse de l'objet central : environ 4 millions de masses solaires [2,3,4]. La Figure 1 montre les orbites reconstruites des étoiles les plus proches aujourd'hui connues ainsi que les mesures des positions de l'étoile S2. Une masse importante contenue dans un volume restreint pointe vers l'hypothèse que Sgr A\* serait un trou noir super-massif.

### 3. LES SURSAUTS DU CENTRE GALACTIQUE

Le flux provenant de Sgr A\* connaît des fluctuations dont certaines peuvent être aussi soudaines que violentes causant une augmentation de luminosité de quelques à plusieurs dizaines d'unités dans l'infrarouge proche et dans le domaine des rayons X [5]. Une hypothèse est qu'il s'agit de gaz chauffé sur la dernière orbite circulaire stable autour du trou noir, de diamètre égal ou triple de celui du trou noir, dépendant de son taux de rotation, c'est-à-dire mille fois plus près que la plus proche des étoiles S connues, S2. Si c'est le cas, ces sursauts sont un outil fantastique pour l'exploration du trou noir. Ils pourraient ainsi apporter la première preuve que seul un trou noir peut expliquer l'extraordinaire densité de masse car circonscrite à son horizon. Les sursauts sont potentiellement d'excellentes particules-test près de l'horizon pour l'étude de la gravitation en champ fort. Leur trajectoire pourrait permettre l'exploration de l'espace-temps de façon directe autour du trou noir et une étude *in situ* des effets de relativité générale en champ fort [6].

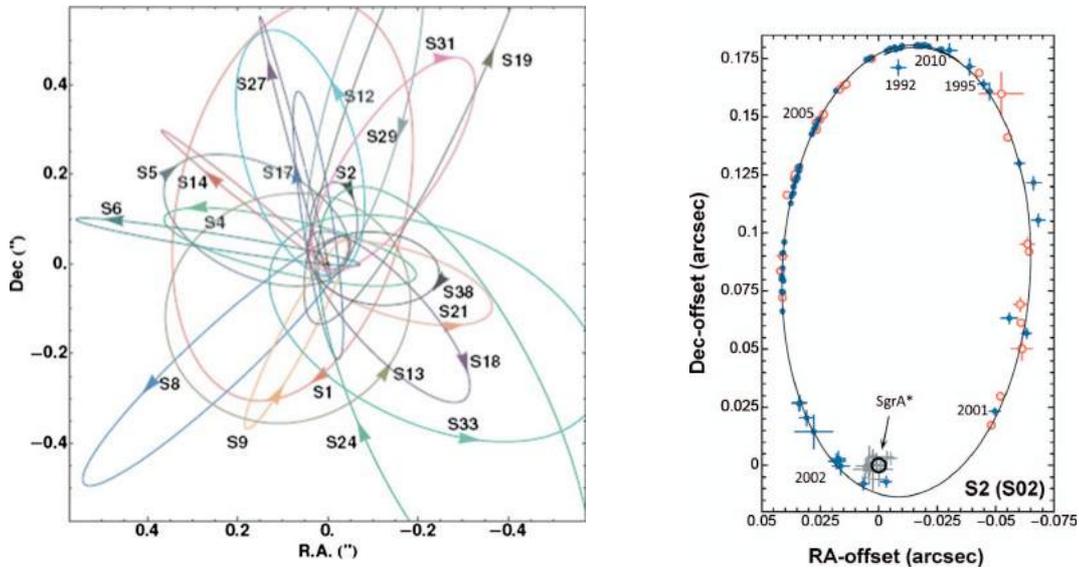


Fig. 1 : Gauche : la trajectoire des étoiles de l'amas S près atour du centre galactique [4]. Droite : les mesures obtenues sur l'étoile S2 et les mesures de position de Sgr A\* [2].

#### 4. LE CENTRE GALACTIQUE COMME LABORATOIRE DE LA GRAVITATION EN CHAMP FORT

Aucune mesure de la structure de l'espace-temps près d'un trou noir n'a pu être faite pour confronter la théorie de la relativité générale au cas le plus extrême. Les trous noirs sont des objets très compacts et ont de petites dimensions angulaires (des trous noirs stellaires comme Cygnus X-1 sont très proches mais de petite masse, des trous noirs au centre des galaxies sont super-massifs mais très distants). Sgr A\* est celui dont la dimension angulaire est la plus importante et ne mesure que  $53 \mu\text{as}$  ( $26 \times 10^{-11}$  rad). Il est donc *a priori* notre meilleure chance de tester la théorie de la relativité générale de façon directe en champ fort. C'est l'un des objectifs majeurs de l'instrument GRAVITY.

#### 5. L'INSTRUMENT GRAVITY SUR LE VLTI

GRAVITY est un ambitieux projet d'interféromètre [7]. Il utilise les quatre télescopes de 8,20 m (Unit Telescopes) du Very Large Telescope en mode interférométrique, c'est-à-dire qu'il fait interférer simultanément les quatre faisceaux qui en sont issus pour obtenir l'équivalent d'un télescope d'environ 140 m de diamètre du point de vue de la résolution angulaire atteinte, 4 mas dans l'infrarouge proche à  $2,2 \mu\text{m}$ . Il a en outre la capacité de recombinaison les 4 télescopes de 1,80 m (Auxiliary Telescopes) pour l'observation des sources les plus brillantes (Figure 2). GRAVITY est construit, sous la responsabilité du Max Planck Institut für Extraterrestische physik de Munich, par un consortium européen comprenant des instituts allemands, portugais et français (Observatoire de Paris/LESIA, IPAG). Le projet a été lancé en 2005. GRAVITY a obtenu sa première lumière fin 2015 et est entré dans une période de tests intensifs pour environ un an.

Deux types de mesures seront faites avec GRAVITY. Grâce à l'utilisation simultanée des 4 grands télescopes, des images précises de l'environnement de Sgr A\* seront régulièrement obtenues avec une résolution 16 fois meilleure qu'avec les plus grands télescopes actuels. Il sera ainsi possible de résoudre l'émission présente autour de Sagittarius A\*. Quelques étoiles à découvrir sont potentiellement en orbite autour du trou noir à quelques unités astronomiques ou à une fraction d'unité astronomique de distance. À une si faible distance, leurs orbites sont fortement perturbées et l'écart à des orbites newtoniennes classiques permettra de mettre en évidence des effets relativistes et de mesurer une caractéristique importante du trou noir, son taux de rotation [8].

Le mode imagerie ne permettra cependant pas d'accéder à l'horizon du trou noir, ce qui nécessite une résolution 100 fois plus élevée. GRAVITY offrira une capacité toute nouvelle, un mode astrométrique avec une précision de  $10 \mu\text{as}$ , soit le rayon physique de l'horizon de Sgr A\*. Il permettra de détecter tout mouvement autour du trou noir avec une précision égale à sa dimension. Il sera utilisé pendant les sursauts pour mesurer la trajectoire de la zone émettrice.

GRAVITY est l'interféromètre infrarouge le plus complexe jamais construit. Deux champs distants d'au plus  $6''$  sont observables simultanément. L'un sert de référence de phase et permet de corriger les turbulences à l'échelle de l'interféromètre pour stabiliser les franges et d'atteindre des temps de pose de plusieurs minutes dans l'autre champ. La référence de phase est utilisée à la fois pour l'imagerie et pour l'astrométrie différentielle. Une métrologie précise à quelques nanomètres près permet de mesurer l'écart des paquets de franges dans les deux voies pour atteindre la précision astrométrique de plusieurs dizaines de micro-secondes d'angles. Enfin, les turbulences atmosphériques sont corrigées à l'échelle de chacune des pupilles de 8,20 m par optique adaptative pour maximiser la sensibilité et la précision de l'instrument.



Fig. 2 : le site du Very Large Telescope de l'ESO au mont Paranal au Chili. Deux des 4 AT déplaçables sur des rails sont visibles en plus des 4 UT.

### CONCLUSION

Les premiers résultats techniques obtenus par GRAVITY depuis sa première lumière à l'automne 2015 sont très encourageants. L'exploitation scientifique de l'instrument démarrera dès juin 2016 par un programme de *science verification*, l'instrument étant ouvert à la communauté astronomique à partir d'octobre 2016.

### RÉFÉRENCES

- [1] B. Balick & R.L. Brown, 1974, *ApJ* 194, 265
- [2] R. Schödel et al., 2002, *Nature* 419, 694
- [3] F. Eisenhauer et al., 2005, *ApJ* 628, 246
- [4] S. Gillessen et al. 2009, *ApJ* 692, 1075
- [5] R. Genzel et al., 2003, *Nature* 425, 934
- [6] F.H. Vincent et al., 2014, *MNRAS* 441, 3477
- [7] F. Eisenhauer et al. 2011, *Messenger* 143, 16
- [8] T. Paumard et al. 2005, *Astronomische Nachrichten* 326, 568

## ARRÊTER LA LUMIÈRE DANS UNE FIBRE: LA RENCONTRE DES ATOMES FROIDS ET DE LA NANOPHOTONIQUE

**Julien Laurat**

*Laboratoire Kastler Brossel, UPMC-Sorbonne Universités, CNRS, ENS-PSL Research University,  
Collège de France, 4 Place Jussieu, 75005 Paris, France*

julien.laurat@upmc.fr

### RÉSUMÉ

La combinaison des atomes froids et de la nanophotonique permet de réaliser de nouvelles interfaces lumière-matière pour l'information quantique.

**MOTS-CLEFS :** *information quantique; mémoire; atomes froids; nanophotonique.*

Les interfaces lumière-matière constituent des outils importants pour l'optique quantique et les réseaux quantiques de communication [1]. Dans ce contexte, mon équipe de recherche au Laboratoire Kastler Brossel s'intéresse au développement de telles interfaces reposant sur des ensembles d'atomes froids. Un exemple d'application est la réalisation de mémoires quantiques permettant à la lumière et à la matière d'échanger leurs états à la demande. En espace libre, nous avons ainsi créé une mémoire permettant le stockage de bits quantiques encodés dans le moment orbital angulaire de la lumière, c'est-à-dire dans l'hélicité du front d'onde [2]. En faisant fonctionner deux mémoires quantiques en parallèle, nous avons ensuite stocké des bits encodés par la structuration de la lumière dans le plan transverse, non seulement en phase mais aussi en polarisation, réalisant ainsi une mémoire quantique pour plusieurs degrés de liberté simultanément [3]. Dans cet exposé, je présenterai une nouvelle interface reposant sur une nanofibre optique au diamètre sub-longueur d'onde et couplée à un ensemble d'atomes froids piégés à proximité.

Combiner atomes froids et nanophotonique apparaît comme une alternative prometteuse pour réaliser de nouvelles interfaces lumière-matière. Le fort confinement de la lumière permet non seulement une interaction sur une distance qui n'est plus limitée par la diffraction, mais également une interaction atome-photon exaltée et la possibilité d'interaction non-linéaire à des puissances optiques très faibles.

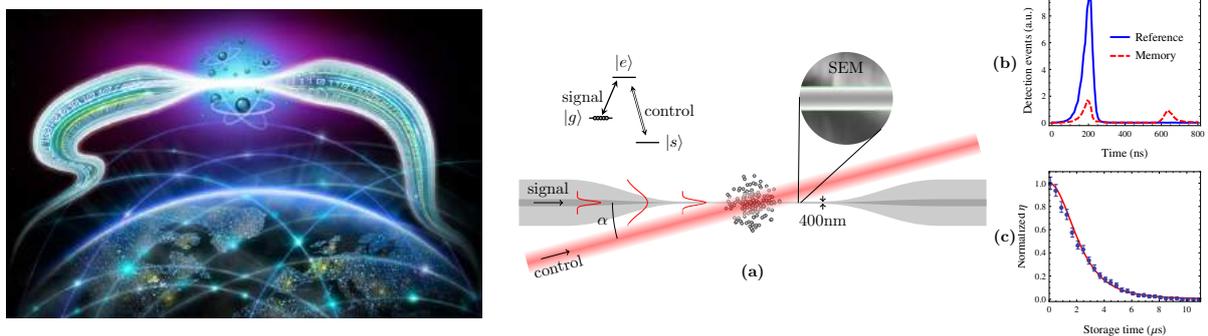


FIGURE 1 : **Arrêter la lumière dans une fibre optique.** Des atomes froids sont piégés au voisinage d'une fibre optique qui a été étirée dans une région de quelques centimètres. En arrivant dans cette zone, la lumière guidée est ralentie et l'information qu'elle porte est transférée aux atomes. Plus tard, à la demande, la lumière est réémise dans la fibre et peut se propager à nouveau. (a) Une fibre de 400 nm de diamètre est superposée à un large ensemble d'atomes froids. Un champ dit de contrôle permet de modifier la propagation de la lumière guidée. (b) Stockage et relecture. (c) Temps de vie de la mémoire.

Par exemple, un guide d'onde avec une dimension plus petite que la longueur d'onde fournit un large champ évanescent qui peut être utilisé pour interagir avec des atomes à proximité ou pour les piéger à l'aide d'un piège dipolaire. La surface effective du mode étant proche de la section efficace d'absorption, un atome unique peut absorber une fraction non négligeable de la lumière guidée et fournir ainsi un fort couplage lumière-matière en un seul passage.

En utilisant une telle approche, nous avons réussi à intégrer une mémoire quantique directement dans une fibre optique (figure 1) [4]. Pour cela, une fibre optique commerciale similaire à celles utilisées dans les réseaux de télécommunication a été chauffée et étirée jusqu'à moins de 400 nanomètres de diamètre et ce, sur quelques centimètres. Nous avons ensuite refroidi des atomes de césium disposés proches de cette zone étirée. Lorsque la lumière atteint cette région, une grande partie de l'énergie circule autour de la fibre et elle peut alors interagir avec les atomes environnants. En utilisant la technique dite de *transparence induite électromagnétiquement* qui permet de contrôler les propriétés du milieu atomique par un laser additionnel, la lumière a été ralentie par un facteur 3 000 puis totalement arrêtée. Cette impulsion lumineuse a été stoppée pendant plusieurs microsecondes puis émise de nouveau dans la fibre. Sans cet arrêt imposé, la lumière aurait parcouru dans le même temps plusieurs kilomètres ! L'information portée par la lumière est transférée aux atomes sous la forme d'une excitation collective, une large superposition quantique. En raison du fort confinement de la lumière, quelques milliers d'atomes suffisent pour obtenir de fort ralentissement, alors que des millions étaient nécessaires dans les expériences en espace libre. Nous avons également montré que des impulsions lumineuses contenant un seul photon pouvaient être stockées et réémises avec un large rapport signal sur bruit. Au delà des mémoires quantiques, ce système peut aussi être utilisé comme source de photons uniques intrinsèquement fibrés.

Je montrerai également comment le piégeage d'atomes froids autour de la nanofibre permet de réaliser un miroir de Bragg efficace [5]. En réalisant un réseau optique dans le champ évanescent, avec une distance entre les atomes proches de la longueur d'onde de la transition atomique, nous avons pu démontrer des réflectivités supérieures à 75% avec seulement quelques milliers d'atomes (figure 2). La possibilité de contrôler le transport de photon unique dans ce type de système est à la base de nombreuses propositions dans ce domaine émergent dit de l'électrodynamique quantique en guide d'onde (*waveguide quantum electrodynamics*).

Je terminerai cet exposé en discutant les perspectives du domaine, en particulier l'apport possible des cristaux photoniques à cette nouvelle direction de recherche.

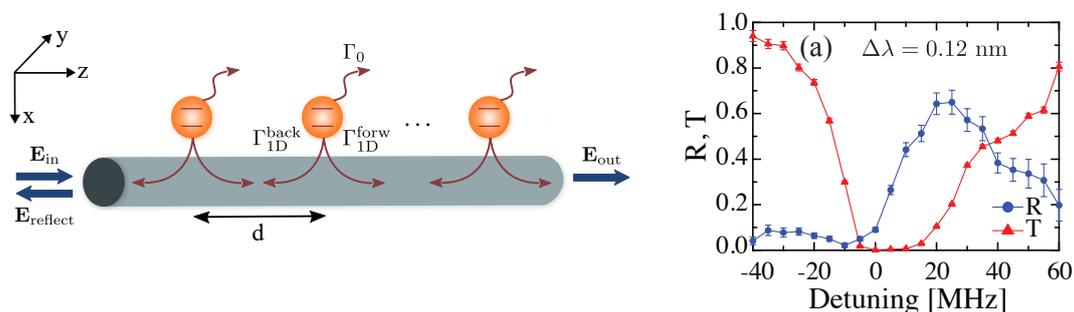


FIGURE 2 : **Miroir de Bragg atomique.** Les atomes piégés à proximité de la nanofibre peuvent émettre en espace libre ou dans le mode guidé. Chaque atome se comporte alors comme un miroir avec une faible réflectivité pour la lumière se propageant dans la nanofibre. Lorsque la distance entre les atomes est très proche de la longueur d'onde de la transition atomique, l'interférence entre ces réflexions peut conduire à une forte réflexion de Bragg. Dans notre cas, 2000 atomes seulement permettent d'obtenir une réflexion  $R$  proche de 75%. Le tracé donne les spectres de réflexion et de transmission en fonction du désaccord à la résonance du champ sonde.

## RÉFÉRENCES

- [1] J. Laurat et T. Chanelière, “La mémoire, pilier du réseau quantique,” in *La Recherche*, Les Révolutions quantiques, juillet 2015.
- [2] A. Nicolas et al., “A quantum memory for orbital angular momentum photonic qubits,” *Nature Photon.* 8, 234 (2014).
- [3] V. Parigi et al., “Storage and retrieval of vector beams of light in a multiple-degree-of-freedom quantum memory,” *Nature Commun.* 6, 7706 (2015).
- [4] B. Gouraud, D. Maxein, A. Nicolas, O. Morin, J. Laurat “Demonstration of a memory for tightly guided light in an optical nanofiber,” *Phys. Rev. Lett* 115, 023602 (2015).
- [5] N.V. Corzo, B. Gouraud, A. Chandra, A. Goban, A.S. Sheremet, D.V. Kupriyanov, J. Laurat “Large Bragg reflection from one-dimensional chains of trapped atoms near a nanoscale waveguide,” arXiv :1604.03129.

## ART ET ASTRONOMIE

Yaël Nazé<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Groupe d'Astrophysique des Hautes Energies, Dept A.G.O. Université de Liège, B4000 Liège, Belgique

[naze@astro.ulg.ac.be](mailto:naze@astro.ulg.ac.be)

### RÉSUMÉ

Cette conférence plénière abordera les multiples facettes entre Art et Astronomie, entre inspiration, outil, réflexion, ou encore hommage.

### PRÉSENTATION

Imaginez une soirée d'été, au moment où l'étouffante chaleur laisse enfin la place à une température parfaite ; allongé, vous vous laissez prendre par le spectacle des étoiles filantes... Imaginez un matin d'hiver, sur le pas de votre porte ; bien emmitoufflé, vous ne pouvez résister et jetez un œil à ce ciel noir paré d'étoiles innombrables, dont la lueur cristalline marque déjà votre journée d'un sceau apaisant... Le ciel ne laisse pas indifférent : il peut provoquer une angoisse indicible, un bien-être mâtiné de rêverie, mais aussi une inspiration unique ou une curiosité inépuisable. Selon les époques et les caractères, cela conduit parfois à une vocation d'astronome... ou d'artiste !

En effet, on ne compte plus les œuvres dévoilant un bout de ciel... Bien sûr, celui-ci peut « juste » servir de décor d'arrière-plan, sans grand intérêt. Toutefois, il peut aussi imprégner les toiles d'une ambiance particulière, en ravivant les sentiments – tant positifs que négatifs – qui lui sont associés. La nuit, puisque qu'il faut la nommer, fait peur et sert de paravent à d'innombrables activités répréhensibles mais elle cache aussi le premier baiser des amoureux, apporte le repos, et est la complice de nos rêves. Parmi ces œuvres jouant sur l'ambiance, on peut citer en Orient la classique série des « 100 aspects de la Lune », et en Occident les toiles bleues de Chagall.

D'autres artistes décident de tirer le portrait, réaliste, de nos compagnons célestes – Soleil (Munch), Lune (Jin Nong), une étoile esseulée (Childe Hassam, Church), voire des nuits étoilées (Millet, Van Gogh ainsi que, plus récemment, l'hyperréaliste Celmins). Dans certains cas, ce ciel réaliste peut même offrir un éclairage inédit sur l'artiste, l'astronomie devenant alors un outil supplémentaire de l'archéométrie. Ainsi, les détails de la Nuit étoilée de Munch permettent d'affirmer où était le peintre à l'été 1893, la configuration céleste de Route avec Cyprès et ciel étoilé de van Gogh est identifiée comme la conjonction Lune-Vénus-Mercure du 19 avril 1890 tandis que la Comète de 1858 vue des abords de Dartmoor de Palmer montre la conjonction comète-Arcturus du 5 octobre 1858 !

À l'opposé, certains préfèrent l'allégorie pure. Il faut dire que les astres étaient des dieux importants, partout dans le monde : les portraits divins (Râ, Hélios, Hamateratsu, Bouddha Tejaprabha) sont donc aussi des portraits célestes ! Mais ce courant personnifiant ne s'est pas arrêté à l'Antiquité ni ne s'est circonscrit au divin. On le retrouve au Moyen-Âge sous les traits plus profanes d'Astronomia, l'allégorie de l'un des enseignements du quadrivium, remplacée ensuite par Uranie, la muse céleste, au retour du classicisme. La tradition s'étend ensuite à la Lune, le Soleil, la Nuit, et même des étoiles (parfois filantes)... Parmi ce courant, particulièrement vivace au 19<sup>e</sup> siècle, se trouvent plusieurs œuvres célèbres, comme le Phaéon de Moreau, le « cycle de la Lune et des étoiles » de Mucha, ou Night with her train of stars de Hughes.

Il existe aussi la possibilité de viser la perfection céleste – sphère, cercle, ellipse restent en effet les bases de l'astronomie... Ce sont évidemment les peintres abstraits (comme Kandinsky, Kupka, Delaunay) qui ont le mieux joué avec ces formes pures dans des œuvres colorées, d'une pureté céleste évidente. Cela ne se restreint pas au sphérique : l'œil cubiste de Léger n'a pu résister à la beauté des isocontours cométaires... Dans ce cadre, si on pousse la chose à son paroxysme, on peut parfois se retrouver avec de « simples » archétypes : disque solaire, croissant lunaire, étoile à cinq branches, etc. Ces symboles

courants se retrouvent dans les œuvres d'artisans de par le monde, mais aussi sous les doigts d'artistes reconnus (comme Zorio et ses minimalistes Stelle).

Et puis, on peut aussi réfléchir à des concepts célestes, voire s'amuser un peu avec. Dans ce cadre, on retrouve de nombreux travaux sur les Constellations : Arp met en valeur leur côté de regroupement aléatoire, Radisic leur côté sensuel (souvenez-vous des histoires associées, emplies de demoiselles en détresse !), Miro leur côté foisonnant, Vasarely leur composante répétitive. Autre possibilité : le mouvement, associé au ciel par essence même car le Soleil et les étoiles se lèvent tous les jours – les humains, tout auréolés de leur sentiment de supériorité, ne peuvent en dire autant ! Depuis le 20<sup>e</sup> siècle, le caractère mouvant du cosmos s'est d'ailleurs encore plus affirmé : migration de planètes, évasion stellaire, collisions de galaxies, expansion de l'Univers... Mais comment représenter ce mouvement ? Les réponses varient : Vasarely tente des effets d'optiques (Supernova, série Véga), Calder propose des sphères armillaires en mouvement, Balla et Pollock entremêlent les trajectoires. Enfin, il faut aussi représenter l'espace... De nombreuses expériences seront tentées : certains jouent avec la pesanteur, comme Takis et ses aimants ou Klein et son célèbre saut, d'autres avec la 3<sup>e</sup> dimension d'une toile qui n'en possède pourtant que deux (Fontana et ses buchi), d'autres tentent même de représenter l'infini (Malevitch et ses carrés blancs ou noirs) ou notre lien direct avec le ciel (de nombreuses toiles de Remedios Varo).

Il est également possible de représenter, sinon le ciel, ceux qui l'étudient ! Les œuvres s'insèrent ici dans deux courants principaux. Tout d'abord, la représentation d'un astronome connu, paré de ce qui fait sa renommée (lunette pour Galilée<sup>1</sup>). La ressemblance avec le modèle peut s'avérer assez lointaine, surtout si l'œuvre est produite bien après la mort du savant, comme pour l'Ecole d'Athènes de Raphaël. Ensuite, il existe aussi des portraits d'astronomes « génériques » - homme seul, rêveur et mélancolique, entouré des instruments de son art. Le cas le plus célèbre est celui de l'Astronome de Vermeer, mais il en existe bien d'autre, souvent de la même époque quoiqu'il existe quelques œuvres récentes (dont des toiles ironiques de Delvaux). Une œuvre défie cependant toute classification dans ce cadre : le livre Maximiliana ou l'exercice illégal de l'astronomie, par Max Ernst. En s'identifiant à l'astronome (son parcours, ses problèmes, ses conflits), Ernst propose une véritable démonstration du processus scientifique dans ce livre surréaliste.

Il ne faudrait pas oublier l'aide apportée aux astronomes. Si l'astronomie actuelle regorge d'images, les livres astronomiques proposaient au mieux quelques schémas (éclipses, modèle géocentrique, constellations peu réalistes) jusqu'au 17<sup>e</sup> siècle. C'est alors que Galilée utilisa l'image dans son Sidereus Nuncius pour convaincre, et le procédé fut largement adopté en quelques décennies seulement, avec au final une volonté de réalisme très forte. On voit alors surgir des dessins précis de nébuleuses pour voir si elles varient ou de constellations pour repérer les choses convenablement. Hélas, tous les astronomes n'étaient pas doués pour le dessin : les observatoires engagèrent donc des artistes, pour les aider. Rassurez-vous, ils ne se retrouvèrent pas au chômage au moment de l'invention de la photographie, ils adaptèrent simplement le métier ! Ils produisirent désormais des vues d'artistes, qui sont aujourd'hui innombrables : elles illustrent les dernières découvertes, quand l'image n'existe pas – ainsi, les superbes vues exoplanétaires n'ont pas été enregistrées par un instrument, mais proviennent du pinceau et du cerveau des artistes astronomiques ! Signalons au passage que les artistes n'ont pas été que de simples « aides » : avant même la révolution scientifique du 17<sup>e</sup> siècle, et durant celles-ci, ils participèrent à renverser les vues aristotéliennes. Van Eyck présente ainsi dans sa Crucifixion une Lune imparfaite, avec des taches et un terminateur rugueux ; da Vinci, Pacheco et Cigoli discutent, par toiles interposées, de la lumière cendrée et de la transparence de la Lune.

Pour terminer, signalons qu'il existe des œuvres... dans l'espace ! Embarquées sur des satellites, déposées sur la Lune ou Mars, elles constituent les avant-postes de notre conquête spatiale, une trace indubitablement humaine...

#### RÉFÉRENCES

- Nazé Y., 'Art et Astronomie - Impressions célestes', Omnisciences, Octobre 2015
- Nazé Y., Tribute to an astronomer: the work of Max Ernst on Wilhelm Tempel', Journal for the History of Astronomy, in press, preliminary version available as arxiv:1512.05540

<sup>1</sup> Même si Galilée n'a ni inventé la lunette, ni été le premier à la tourner vers le ciel.

## **GENERER ET MANIPULER DES PHOTONS UNIQUES AVEC DES ATOMES ARTIFICIELS**

**Pascale Senellart**

*LPN-CNRS, Laboratoire de Photonique et de Nanostructures, Route de Nozay, 91460 Marcoussis, France*

pascale.senellart@lpn.cnrs.fr

### **RÉSUMÉ**

Les boîtes quantiques semi-conductrices sont des pièges de taille nanométrique pour les électrons. Ce sont de véritables atomes artificiels qui ouvrent la voie à la fabrication de composants efficaces pour les technologies quantiques dans les matériaux de l'optoélectronique. Toutefois, la recherche s'est longtemps heurtée à la variabilité de ces nano-objets : constituée d'un faible nombre d'atomes, chaque boîte quantique est différente de sa voisine et présente une position aléatoire.

Notre équipe a inventée une technologie qui permet de s'affranchir de ces problèmes de variabilité: nous positionnons avec une précision nanométrique une boîte quantique dans une cavité optique. Nous réalisons des expériences d'électrodynamique quantique en cavité et contrôlons à volonté l'émission spontanée d'une boîte quantique. Nous utilisons cette possibilité pour développer des composants très efficaces pour le traitement de l'information quantique. Nous fabriquons des sources de photons uniques indiscernables d'une brillance dix fois supérieure aux sources usuelles. Ces sources permettent d'ores et déjà de réaliser des expériences de Boson Sampling cent fois plus rapidement. Nous démontrons également des non-linéarités optiques à l'échelle du photon unique, qui permettront de réaliser des portes logiques quantiques déterministes, un autre verrou pour le développement des technologies quantiques optiques à grande échelle.

## DYNAMIQUES ULTRARAPIDES PARADOXALES DANS LES LASERS À FIBRE OPTIQUE

Ph. Grelu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne, UMR 6303 CNRS, Université Bourgogne  
Franche-Comté, BP 47870, F-21078 Dijon*

philippe.grelu@u-bourgogne.fr

### RÉSUMÉ

Au cours de cette présentation, nous mettons en lumière la richesse des comportements dynamiques ultrarapides accessibles au sein de cavités laser à fibre optique, dont certains constituent des paradoxes par rapport à une compréhension conventionnelle du blocage de modes, et présentons un cadre élargi permettant d'appréhender ces phénomènes.

**MOTS-CLEFS :** *soliton dissipatif ; laser à fibre ; dynamique ultrarapide ; ondes scélérates*

### 1. INTRODUCTION

A l'instar d'un amplificateur optique à semi-conducteur, un amplificateur à fibre dopée aux terres rares préfigure un gain optique généralement important, apportant flexibilité au design de l'architecture de la cavité laser. L'analogie trouve cependant ses limites, compte tenu des ordres de grandeur qui séparent les dimensions et les temps caractéristiques des deux catégories de milieux laser. Cette différence, exacerbée en régime d'impulsions courtes ou ultracourtes, est également illustrée par la variété des approches fréquemment pratiquées en modélisation. Les descriptions modales ont la préférence pour traiter cavités courtes et micro-résonateurs, tandis que les cavités longues – lorsque le temps de parcours est grandement supérieur à la durée de l'impulsion générée – recourent presque exclusivement à une approche temporelle propagative qui fait généralement disparaître la notion de mode de cavité [1]. Pour obtenir ces régimes ultrarapides de manière passive, on peut mettre en oeuvre plusieurs techniques de blocage, ou verrouillage, de modes particulièrement efficaces. Les impulsions optiques, qui, en circulant incessamment dans la cavité, parcourent l'équivalent de milliards de kilomètres sans que leur profil en soit significativement affecté, entrent ainsi à juste titre dans la catégorie des ondes solitaires optiques. Leur stabilité résulte d'un équilibre entre gain et pertes, doublé d'une compensation entre effets dispersifs et non-linéaires. L'existence de cet équilibre complexe est inhérent à la définition du soliton dissipatif, qui forme un récent cadre conceptuel permettant d'appréhender la dynamique d'impulsions subissant des échanges d'énergie significatifs avec leur environnement [2].

Après deux décennies, le développement de lasers à fibre à impulsions courtes est toujours en plein essor, avec des enjeux applicatifs importants notamment pour l'industrie, le domaine médical, et la métrologie [3, 4]. De nouvelles architectures laser à fibre ont été proposées afin d'améliorer les performances, et en général la compacité de ces dispositifs, produisant des impulsions plus énergétiques, ou bien plus courtes, dans de nouvelles gammes spectrales, à plus haute cadence, etc. Avec certains designs de cavité laser, des régimes de propagation initialement contre-intuitifs sont apparus, comme par exemple au sein de cavités fonctionnant en régime de dispersion chromatique fortement normale [5], à l'encontre du sens commun pour lequel les solitons optiques brillants nécessitent une dispersion anormale. De tels régimes de propagation sont simplement interprétés au moyen du concept de soliton dissipatif. La proche parenté existant entre soliton dissipatif et dynamique non-linéaire permet aussi d'appréhender ce qui se produit aux frontières du blocage de modes conventionnel, lorsque de nombreuses bifurcations du système dynamique peuvent se manifester tandis que les paramètres de la cavité sont modifiés [2].

## 2. DES LIQUIDES DE SOLITONS AUX ONDES SCÉLÉRATES

La formation d'impulsions multiples en cavité laser suit un type de bifurcation étudié de longue date, qui peut cependant employer plusieurs mécanismes [6]. Les régimes multi-impulsionnels sont, parfois recherchés, par exemple pour obtenir un fonctionnement harmonique démultipliant le taux de répétition relativement faible des cavités laser à fibre [7, 8], mais souvent considérés indésirables, puisqu'ils impliquent une limitation de la puissance crête pour l'application visée et compliquent la modélisation. Du point de vue fondamental, l'auto-organisation des régimes multi-impulsionnels a été très étudiée durant ces dernières années, avec la possibilité de former des états analogues à ceux de la matière : molécules, cristaux, et liquides de solitons [9, 10]. Au delà des structures stationnaires dans le référentiel propre, des structures mouvantes et chaotiques peuvent ainsi se propager tout en restant globalement confinées à l'échelle sub-nanoseconde, représentant un paradoxe par rapport aux concepts de blocage de modes et de soliton. On peut ainsi produire des impulsions courtes ou ultracourtes complexes en cavité laser, toujours au moyen du mécanisme d'absorption saturable, mais qui ne correspondent plus précisément à des régimes "modes bloqués". L'exposé développera plus particulièrement ces solitons dissipatifs chaotiques, illustrant également la mise en évidence d'ondes scélérates optiques en cavité laser ultrarapide [11, 12, 13], et tentera d'unifier certaines descriptions et dénominations de dynamiques établies séparément.

### RÉFÉRENCES

- [1] Ph. Grelu (Ed.), *Nonlinear optical cavity dynamics*, Wiley-VCH, 2016.
- [2] Ph. Grelu and N. Akhmediev, "Dissipative solitons for mode locked lasers", *Nat. Photonics*, vol. 6, 84-92, 2012.
- [3] D. J. Richardson, J. Nilsson, and W. A. Clarkson, "High power fiber lasers : current status and future perspectives," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 27, no. 11, B63 (2010).
- [4] J.M. Delavaux, Ph. Grelu, W. Pu, and F.O. Ilday (Eds.), "Special issue on short pulse fiber lasers," *Opt. Fib. Technol.*, vol. 20, 561, 2014.
- [5] A. Chong, W.H. Renninger, and F.W. Wise "All-normal dispersion femtosecond fiber laser with pulse energy above 20 nJ", *Opt. Lett.*, vol. 32, 2408-2410, 2007.
- [6] Voir en particulier les chapitres 4,9 et 10 de la Ref. [1].
- [7] A.B. Grudinin and S. Gray, "Passive harmonic mode locking in soliton fiber lasers", *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 14, no. 1, 144-154, 1997.
- [8] C. Lecaplain and Ph. Grelu, "Multi-gigahertz repetition-rate-selectable passive harmonic mode locking of a fiber laser", *Opt. Express*, vol. 21, 10897, 2013.
- [9] S. Chouli and Ph. Grelu, "Soliton rain in a fiber laser, an experimental study", *Phys. Rev. A*, vol. 81, 063829, 2010.
- [10] F. Sanchez et al. "Manipulating dissipative soliton ensembles in passively mode-locked fiber lasers", *Opt. Fib. Technol.*, vol. 20, 562-574, 2014.
- [11] C. Lecaplain, Ph. Grelu, J. M. Soto-Crespo, and N. Akhmediev, "Dissipative rogue waves generated by a mode locked fiber laser", *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 108, 233901, 2012.
- [12] C. Lecaplain and Ph. Grelu, "Rogue waves among noise-like-pulse laser emission : An experimental investigation," *Phys. Rev. A*, Vol. 90, 013805 (2014).
- [13] A. Runge, C. Agüergaray, N. G. R. Broderick and M. Erkintalo, "Raman rogue waves in a partially mode-locked fiber laser", *Opt. Lett.*, vol. 39, 319 (2014).

## GÉNÉRATION D'HARMONIQUES, MOLÉCULES CHIRALES ET DYNAMIQUES ULTRARAPIDES

Samuel Beaulieu<sup>1,4</sup>, Antoine Comby<sup>1</sup>, Romain Géneaux<sup>3</sup>, Valérie Blanchet<sup>1</sup>, Dominique Descamps<sup>1</sup>, Amélie Ferré<sup>1</sup>, Gustavo A. Garcia<sup>2</sup>, Yann Mairesse<sup>1</sup>, Éric Mével<sup>1</sup>, Laurent Nahon<sup>2</sup>, Stéphane Petit<sup>1</sup>, Bernard Pons<sup>1</sup>, Thierry Ruchon<sup>3</sup>, Baptiste Fabre<sup>1</sup>,

<sup>1</sup> Université de Bordeaux - CNRS - CEA, CELIA, UMR5107, F33405 Talence Cedex, France

<sup>2</sup> Synchrotron SOLEIL, l'Orme des Merisiers, Saint Aubin BP48, F91192, Gif-sur-Yvette, France

<sup>3</sup> CEA, IRAMIS, LIDyL, CEA-Saclay, F91191, Gif-sur-Yvette, France

<sup>4</sup> INRS, Centre ÉMT, Varennes, Québec, Canada

baptiste.fabre@u-bordeaux.fr

### RÉSUMÉ

L'un des objectifs de notre équipe est d'initier puis de suivre des dynamiques ultrarapides (femtosecondes et attosecondes) au sein de molécules chirales en phase gazeuse en utilisant le dichroïsme circulaire de photoélectrons. Nous nous intéresserons pour cela à la mesure de cette observable dans différents régimes d'ionisation afin de mettre en évidence l'intérêt et l'universalité du phénomène.

**MOTS-CLEFS :** *Génération d'harmoniques d'ordre élevé; chiralité; dichroïsme de photoélectrons*

### 1. INTRODUCTION

Depuis sa découverte en 1848 par Pasteur, de nombreuses études se sont intéressées à la chiralité du fait de son intérêt fondamental en physique, biologie, chimie et pharmacologie. En étudiant des sels d'acide tartrique, Pasteur émet l'hypothèse suivante : "certaines molécules peuvent exister sous deux formes, images l'un de l'autre dans un miroir, mais non superposables". Ces deux configurations, de même composition et partageant des propriétés physiques et chimiques identiques, sont appelées énantiomères et généralement notés R (rectus : droit) ou S (sinister : gauche). Ils ne peuvent donc être distingués à moins qu'ils n'interagissent avec un autre système chiral, tel qu'une molécule ou de la lumière polarisée circulairement. Ainsi, la plupart des réactions biologiques sont basées sur le fait qu'une molécule chirale va être ou non reconnue par la molécule du récepteur en fonction de sa configuration. Cette reconnaissance chirale contrôle la manière avec laquelle nous percevons les odeurs ou le goût ainsi que l'efficacité d'action des médicaments. De nombreuses techniques, basées sur cette énantiosélectivité, ont été développées afin de sélectionner l'un ou l'autre de ces énantiomères. Toutefois ces techniques possèdent une sensibilité réduite et ne peuvent par conséquent être utilisées pour mesurer des dynamiques attosecondes ou femtosecondes en phase gazeuse, c'est à dire dans un milieu peu dense où il n'y a pas d'effets de solvation.

### 2. DICHROÏSME CIRCULAIRE DE PHOTOÉLECTRONS

Dans un milieu gazeux, l'explosion Coulombienne initiée par un champ laser intense peut être utilisée pour accéder à la configuration absolue de la molécule cible en imageant directement la géométrie nucléaire. Il est ainsi possible de séparer deux énantiomères sans avoir recours à un support théorique. Toutefois, cette technique est limitée à des molécules chirales de petites tailles du fait de la dégradation du taux de détection en coïncidence avec l'augmentation du nombre de fragments. Ainsi, la mesure du dichroïsme circulaire de photoélectrons, noté PECD (Photoelectron Circular Dichroism) est l'alternative la plus communément utilisée en phase gazeuse. Elle consiste à ioniser un échantillon énantiomériquement pur de molécules chirales non alignées à l'aide d'une onde électromagnétique polarisée circulairement [1].

La distribution angulaire des photoélectrons émis présente alors une grande dissymétrie avant/arrière suivant l'axe de propagation du champ ionisant. Cet effet, initialement observé sur synchrotron, est un effet strictement dipolaire qui résultent des interférences entre les différentes ondes de diffusion ou, en d'autres termes, de la diffusion de l'électron par le potentiel chiral lors de la photoionisation [3]. Si l'on note  $R$  (respectivement  $L$ ) la distribution angulaire de photoélectrons mesurée lors de l'interaction avec un champ polarisé circulairement droit (respectivement gauche), cette mesure différentielle peut être exprimée par :

$$PECD = 2 \frac{L - R}{L + R} \quad (1)$$

Le signal, traduisant l'asymétrie de la distribution angulaire des photoélectrons en fonction de l'hélicité du champ ionisant, est macroscopique, peut atteindre plusieurs dizaines de pourcents et change de signe lorsque l'on passe d'un énantiomère à l'autre ou que l'on inverse le sens de rotation du champ. De plus, ce signal est très sensible à la configuration électronique (orbitales) de la molécule, aux substitutions chimiques ainsi qu'à la conformation ou à l'excitation vibrationnelle [1]. Dans ces conditions, le PECD apparaît comme l'observable la plus adaptée à l'étude de dynamiques de systèmes chiraux en phase gazeuse.

### 3. GÉNÉRATION D'HARMONIQUES QUASI-CIRCULAIRES

Afin de se placer dans ce régime d'ionisation à un photon tout en conservant une résolution temporelle femtoseconde, nous utilisons le processus de génération d'harmoniques d'ordre élevé pour produire des photons dans l'ultraviolet du vide (VUV) avec une polarisation circulaire.

Les harmoniques d'ordre élevé, de part leur mécanisme de génération basé sur la recombinaison d'un paquet d'onde électronique initialement éjecté dans le continuum avec la partie de la fonction d'onde non ionisée, sont généralement obtenues à partir d'un champ polarisé linéairement. Dans ces conditions, les harmoniques obtenues sont elles-mêmes polarisées linéairement. Si l'on augmente l'ellipticité du champ générateur afin d'obtenir des harmoniques polarisées elliptiquement, le flux de ces dernières diminue très rapidement, tandis que leur ellipticité reste toujours inférieure à celle du fondamental. Avec cette technique, il n'est alors pas possible d'obtenir un degré d'ellipticité supérieur à 0.4 [2].

Or, notre équipe a récemment découvert qu'il était possible d'obtenir un très fort degré d'ellipticité des harmoniques tout en conservant un champ fondamental peu elliptique, assurant ainsi un excellent rendement de génération, lorsque ce processus était influencé par la présence de résonances électroniques [6]. Grâce à ce nouveau mécanisme nous avons été en mesure de générer des harmoniques quasiment circulaires dans la molécule de SF<sub>6</sub> qui présente autour de l'harmonique 15 du fondamental (800 nm) une résonance de forme [7].

A l'aide de cette nouvelle source de photons VUV quasi-circulaires, nous avons alors mesuré le signal de PECD après ionisation de la fenchone. Cette mesure, comparable qualitativement à celle obtenue sur synchrotron, va nous servir de référence lors de notre étude du PECD pour les différents régimes d'ionisation.

### 4. UNIVERSALITÉ DU PECD

En augmentant la longueur d'onde des photons ionisants, et donc le nombre de photons absorbés (harmonique 3 du 400 nm obtenue via la génération d'harmoniques résonnante dans SF<sub>6</sub>, 3 photons à 400 nm, 6 photons à 800 nm ou 14 photons à 1850 nm), il est possible de modifier le régime d'ionisation tout en s'assurant que l'énergie cinétique des photoélectrons reste constante. Ainsi, plus le nombre de photons initiaux augmente, plus on s'approche du régime d'ionisation tunnel. Quelque soit le régime considéré, nous mesurons un fort PECD dont les structures reflètent la dynamique d'ionisation, indépendamment de la présence ou non d'une résonance. Cette étude permet donc de mettre en évidence l'intérêt des lasers femtosecondes pour l'étude de dynamiques au sein de systèmes chiraux en phase gazeuse via la mesure du PECD.

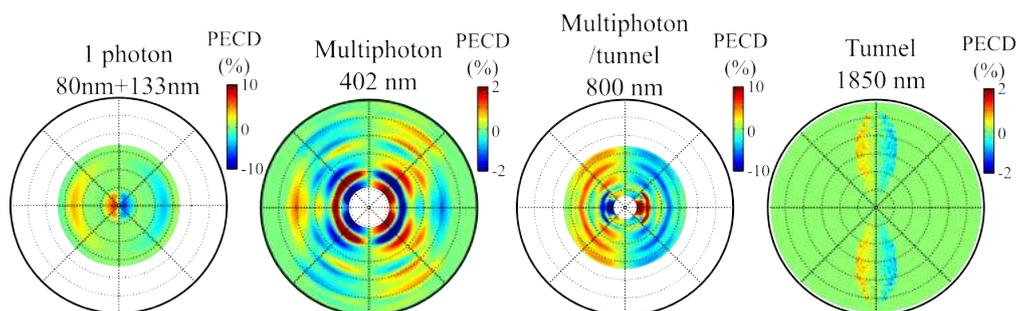


FIGURE 1 : PECD obtenus lors de l'ionisation de la fenchone par des impulsions femtosecondes dans différents régimes d'ionisation : ionisation à 1 photon VUV obtenu par la technique de génération d'harmoniques résonnantes dans SF<sub>6</sub> par des impulsions à 400 nm, ionisation multiphotonique à 400 nm, ionisation dans un régime intermédiaire à 800 nm et ionisation tunnel à 1850 nm. Dans chacun de ces cas, un signal de PECD conséquent est mesuré reflétant dans ses structures la dynamique d'ionisation. L'échelle radiale est comprise entre 0 et 12 eV.

## 5. DYNAMIQUE DE RELAXATION

En guise de première étude dynamique, nous nous sommes intéressés à la relaxation des états de Rydberg de la molécule de fenchone excitées via l'absorption d'un photon linéaire à 200 nm. Ces molécules excitées sont ensuite ionisées par un photon circulaire à 400 nm après un certain délai. En décomposant le signal de PECD obtenu sur la base des polynômes de Legendre, il est possible de suivre l'évolution des structures angulaires de la distribution de photoélectrons au cours du temps. Nous constatons ainsi que le signal de PECD encode une information plus riche et plus détaillée sur la dynamique que celle contenue dans le seul spectre de photoélectrons. Nous avons dès lors exploité cette sensibilité du PECD pour étudier les dynamiques initiées par différents schémas d'excitation que nous présenterons au cours de la conférence.

## RÉFÉRENCES

- [1] L. Nahon, G. A. Garcia, and I. Powis, "Valence shell one-photon photoelectron circular dichroism in chiral systems", *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, **204**, 322–334 (2015).
- [2] Ph. Antoine, B Carré, A L'Huillier, and M Lewenstein. "Polarization of high-order harmonics", *Phys. Rev. A*, **55**, 131–24 (1997)
- [3] B. Ritchie, "Theory of the angular distribution of photoelectrons ejected from optically active molecules and molecular negative ions", *Phys. Rev. A*, **13**, 1411–1415 (1976).
- [4] C. Lux, M. Wollenhaupt, T. Bolze, Q. Liang, J. Köhler, C. Sarpe, and T. Baumert, "Circular dichroism in the photoelectron angular distributions of camphor and fenchone from multiphoton ionization with femtosecond laser pulses", *Chem. Int. Ed.*, **51**, 5001–5005 (2012).
- [5] K. S. Budil, P. Salières, A. L'Huillier, T. Ditmire, and M. D. Perry, "Influence of ellipticity on harmonic generation", *Phys. Rev. A*, **48**, 3437(R) (1993).
- [6] A. Ferré, A. E. Boguslavskiy, M. Dagan, V. Blanchet, B. Brumer, F. Burgy, A. Camper, D. Descamps, B. Fabre, N. Fedorov, J. Gaudin, G. Geoffroy, J. Mikosch, S. Patchkovskii, S. Petit, T. Ruchon, H. Soifer, D. Staedter, I. Wilkinson, A. Stolow, N. Dudovich, and Y. Mairesse "Multi-Channel Electronic and Vibrational Dynamics in Polyatomic Resonant High-Order Harmonic Generation", *Nature Photonics*, **6**, 5952 (2015).
- [7] A. Ferré, C. Handschin, M. Dumergue, F. Burgy, A. Comby, D. Descamps, B. Fabre, G. A. Garcia, R. Généaux, L. Merceron, E. Mével, L. Nahon, S. Petit, D. Staedter, S. Weber, T. Ruchon, V. Blanchet and Y. Mairesse, "A table-top ultrashort light source in the extreme-ultraviolet for time-resolved circular dichroism experiments", *Nature Photonics*, **9**, 93 (2015).

## 2015, ANNEE DE LA LUMIERE EN FRANCE EST UN IMMENSE SUCCES !

Costel Subran<sup>1</sup>

<sup>1</sup> « 2015, Année de la Lumière en France » Comité National d'Optique et de Photonique, 13, Rue Moreau, 75012 Paris, France

Ouverte le 8 janvier, lors d'une prestigieuse manifestation de lancement dans le grand amphithéâtre de la Sorbonne, « 2015, Année de la Lumière en France » a été un grand succès populaire. Nos commissions ont labellisé plus de 1.200 événements. Des événements dans tous les domaines : arts, culture, éducation, jeunesse, astronomie, éclairage, vision, recherche, industrie, santé.

**La Cérémonie de clôture de « 2015, Année de la Lumière en France », à Paris, ville lumière, a eu lieu le 23 février 2016 dans les Salons de l'Hôtel de Ville.** Devant le nombre important de demandes d'organisation d'événements au-delà du 31 décembre 2015, et ce dans tous les domaines, le Comité national de l'Année de la Lumière en France a prolongé cette année exceptionnelle jusqu'au 30 juin 2016.

L'ensemble des régions se sont impliquées dans ces manifestations centrées sur la lumière, de Paris à toutes les métropoles régionales, de petites villes jusqu'aux villages, des salles de spectacles et amphithéâtres aux collèges, lycées et MJC, des festivals aux grandes conférences. On estime les montants investis par tous les acteurs pour assurer les succès de cette année - lumière à plus de 2M€ pour atteindre un public de plusieurs dizaines de milliers de participants.

Les manifestations sont et ont été majoritairement orientées vers les jeunes et le grand public. Enseigner librement la lumière aux jeunes à partir de 7 ans, faciliter la diffusion des connaissances dans les écoles à destination des élèves mais aussi des enseignants et des parents, est notre mission principale tout au long de cette année des lumières.

**Une cérémonie de célébration sera organisée à Lyon au mois de novembre 2016.** Cette cérémonie festive permettra aux acteurs régionaux et nationaux qui auront contribué au succès de l'« Année de la Lumière en France » de participer à un beau rassemblement à connotation artistique: spectacles de lumière, pièces de théâtre, animations visuelles.

## QUELQUES OPTICIENNES (PAS ASSEZ) CÉLÈBRES

**Caroline Champenois<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Aix Marseille Université, CNRS, PIIM UMR 7345, 13397, Marseille, France

caroline.champenois@univ-amu.fr

### RÉSUMÉ

Je présente ici les découvertes liées à l'optique de quelques femmes oubliées des livres de cours.

**MOTS-CLEFS :** *Femmes et Physique, modèles féminins, optique*

### 1. OBJECTIFS

La désaffection des filles pour les sciences dites "dures" a plusieurs causes que de nombreuses études récentes tentent d'explicitier. Une des causes avancées est le manque de modèles féminins que les élèves puis les étudiant.e.s croisent au cours de leurs études<sup>1</sup>. Dans mon exposé, je présenterai les portraits, travaux, et contributions majeures de quelques opticiennes (pas assez célèbres mais qui le mériteraient !) pour que vous puissiez à votre tour vous en emparer et briser ainsi un peu plus l'image d'une science faite uniquement par des hommes.

---

1. voir par exemple le programme Européen GenPORT <http://www.genderportal.eu/projects/pan-european-women-ambassadors-programme-bringing-role-models-schools-and-universities>

## LE MOOC « PHYSIQUE DES OBJETS DU QUOTIDIEN »

Ulysse Delabre<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univ. Bordeaux, LOMA, UMR 5798, F-33400 Talence, France.

<sup>2</sup> Laboratoire Ondes et Matière d'Aquitaine, CNRS, UMR 5798, F-33400 Talence, France.

[ulyссе.delabre@u-bordeaux.fr](mailto:ulyссе.delabre@u-bordeaux.fr)

### RÉSUMÉ

En 2016, un cours en ligne gratuit, ouvert à tous sur le thème de la « Physique des Objets du Quotidien » a été diffusé par l'Université de Bordeaux via la plateforme nationale France Université Numérique. Un des objectifs de ce cours était de présenter la physique associée à 5 objets de notre quotidien et proposer des expériences simples à refaire chez soi autour de ces objets. Cet exposé est l'occasion de revenir sur le déroulement de ce cours et sur les retours des apprenants.

**MOTS-CLEFS :** *cours en ligne ; expériences ; MOOC*

### 1. INTRODUCTION

En 2016, un cours en ligne gratuit, ouvert à tous sur le thème de la « Physique des Objets du Quotidien » a été diffusé par l'Université de Bordeaux via la plateforme nationale France Université Numérique. Un des objectifs de ce cours était de présenter la physique associée à 5 objets de notre quotidien et proposer des expériences simples à refaire chez soi autour de ces objets. Ce cours était divisé en 5 semaines de cours, chacune de ces semaines portant sur un objet de notre quotidien en particulier. La semaine 1 présentait le four à micro-ondes, la semaine 2 discutait du fonctionnement du liquide vaisselle, la semaine 3 s'intéressait aux écrans et afficheurs, la semaine 4 décrivait le fonctionnement des CD, DVD et Blu-ray et enfin la semaine 5 présentait les smartphones et l'utilisation des smartphones en science. A la fin de chaque semaine, des vidéos d'immersion en laboratoire présentaient également comment les mêmes concepts physiques étaient utilisés en recherche fondamentale. Les cours se basaient sur plusieurs vidéos de cours relativement courtes (10 minutes) durant lesquelles les enseignants du MOOC (équipe de 8 enseignants) commentaient et décrivaient les phénomènes physiques d'un point de vue théorique et expérimental.

Pour ce cours, plusieurs vidéos d'expériences ont été filmées pour décrire la physique à partir d'expériences simples. Une des singularités de ce cours était de demander aux apprenants de refaire certaines expériences chez eux pour valider ce MOOC ce qui a été très apprécié par les apprenants. Cet exposé est l'occasion de revenir sur les expériences demandées notamment en optique et de faire un bilan de cette expérience très enrichissante de cours en ligne à distance.



Fig. 1 : Gauche : Affiche du MOOC Physique des Objets du Quotidien. Droite : Carte des apprenants du MOOC. Plus la couleur est foncée plus il y a d'inscrits dans le pays.

<https://www.fun-mooc.fr/courses/ubordeaux/28003/session01/about>

**UNE APPROCHE EXPERIMENTALE DE L'OPTIQUE EN LICENCE****Gaël Latour<sup>1</sup>, Marie Godard<sup>2</sup>, Vincent Guillet<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Laboratoire Imagerie et Modélisation en Neurobiologie et Cancérologie, Université Paris-Sud, CNRS, Université Paris-Saclay, Orsay, France*

<sup>2</sup> *Centre de Sciences Nucléaire et de Sciences de la Matière, Université Paris-Sud, CNRS, Université Paris-Saclay, Orsay, France*

<sup>3</sup> *Institut d'Astrophysique Spatiale, Université Paris-Sud, CNRS, Université Paris-Saclay, Orsay, France*

[gael.latour@u-psud.fr](mailto:gael.latour@u-psud.fr)

**RÉSUMÉ**

L'enseignement de l'optique (géométrique et ondulatoire) se fait sous forme de modules expérimentaux durant les deux premières années de licence à l'Université Paris-Sud.

**MOTS-CLEFS :** *enseignement en licence, optique géométrique, optique ondulatoire, travaux pratiques*

L'enseignement de l'optique en licence se fait sous forme de modules expérimentaux à l'université Paris-Sud. L'enseignement de l'optique géométrique en L1 (450 étudiants) est un module de 30h avec un alternance de cours-TP et de TD. Celui d'optique physique en L2 (100 étudiants) est un module de 25h qui se décline de la façon suivante : 5h de cours, 6h de TD et 4 TP de 3h30.

L'objectif est d'identifier des compétences expérimentales que les étudiants doivent acquérir et que nous évaluons en fin de module à travers des examens de TP individuels. Nous souhaitons également rendre les étudiants plus autonomes et participatifs dans leur apprentissage avec des séances de TP qui s'apparentent à des projets expérimentaux et avec l'utilisation des clickers.

## LE PLATEAU PEDAGOGIQUE LASER DE L'UNIVERSITE DE BORDEAUX AU SERVICE DE LA FORMATION INITIALE ET CONTINUE

**Inka Manek-Honninger**

*CELIA UMR 5107, Université de Bordeaux, 351 Cours de la Libération, 33405 Talence, France, et*

*UF de Physique, Collège Sciences et Technologies, Université de Bordeaux*

[inka.manek-honninger@u-bordeaux.fr](mailto:inka.manek-honninger@u-bordeaux.fr)

### RÉSUMÉ

Le plateau pédagogique laser de l'université de Bordeaux permet de concentrer un maximum d'équipements laser et optique en un lieu unique afin de former à une diversité de matériels, en général inaccessibles pour la formation, et cela de manière très approfondie.

**MOTS-CLEFS :** *laser; formation initiale ; formation continue ; photonique*

Le plateau pédagogique, plateforme mutualisée entre le CRPhy (Centre de Ressource en Physique de l'UF de Physique, Collège ST, Université de Bordeaux) et PYLA (Centre de formation continue du pôle de compétitivité « Route des Lasers ») est un support pour les formations en optique, photonique et laser. Il a pour mission de rechercher l'innovation pédagogique dans ces domaines ; assurant ainsi le lien entre les laboratoires de recherche et les acteurs socio-économiques. Le plateau pédagogique est un lieu de transfert de compétences entre les experts scientifiques.

Cet outil d'excellence technologique et scientifique à caractère collaboratif permet de faire émerger de nouveaux modèles de formation pour accompagner l'évolution des métiers de la filière photonique et ainsi maintenir la formation des étudiants au niveau des attentes du marché présentes et futures. Par ailleurs, la capacité à proposer une formation toujours renouvelée, innovante, unique en France renforce l'attractivité auprès des étudiants de la formation initiale.

Le plateau pédagogique est également une ressource destinée aux industriels pour l'innovation en ingénierie pédagogique : optimiser les échanges entre la formation, la recherche et les industriels, diffuser les bonnes pratiques et proposer des formations adaptées aux situations de travail. Le plateau pédagogique, modulable s'adapte aux besoins spécifiques des industriels. Ainsi la modularité d'exploitation du plateau pédagogique permet de faire profiter aux apprentis et étudiants les échanges constants avec les industriels.

Le plateau pédagogique est installé dans le bâtiment Institut d'Optique d'Aquitaine sur une surface de 500m<sup>2</sup> entièrement dédiés à la formation en optique laser. Le plateau pédagogique est sous la responsabilité du Centre de Ressources de Physique de l'Université de Bordeaux. Un enseignant chercheur en assure la responsabilité. Il est épaulé par un technicien spécialisé en optique laser de l'équipe PYLA dont la mission est entièrement dédiée au maintien en condition opérationnelle des outils pédagogiques.

Du point de vue de la définition de l'offre de formation continue, un enseignant chercheur assure la responsabilité pédagogique.

## **MALLETTE PEDAGOGIQUE POUR L'HOLOGRAPHIE : COMMENT FAIRE DES EXPERIENCES POUR L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR EN S'AFFRANCHISSANT SIMPLEMENT DES VIBRATIONS PARASITES**

**A. Escarguel<sup>1</sup>, R. Baude<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Laboratoire PIIM, UMR 7345 CNRS, case 322, Université d'Aix-Marseille, av. escadrille Normandie-Niemen, 13397 Marseille Cedex 20, France

alexandre.escarguel@univ-amu.fr

### **RÉSUMÉ**

L'holographie fait partie des expériences de base indispensables à toutes les filières d'optique. Elle a beaucoup d'applications et permet d'illustrer de nombreuses propriétés physiques des rayonnements cohérents. D'autre part, il est très valorisant pour un étudiant de réussir un hologramme, objet de curiosité qui garde toujours une petite part de « magie ». Cependant, il est d'habitude nécessaire d'utiliser un dispositif anti-vibratoire très couteux pour réussir ce type d'expériences. Afin de pallier à ce problème, nous avons réalisé un outil pédagogique pour l'holographie monochrome en 2010 [1, 2, 3]. Très compact, tout le matériel nécessaire est contenu dans une petite mallette. Des expériences d'interférométrie double exposition, de réalisation de filtres « notch » ou de réseaux de diffraction peuvent être réalisés sur une simple table. Cet outil est actuellement utilisé dans plusieurs Masters/Licence de l'Université d'Aix-Marseille et est régulièrement prêté à des établissements du secondaire dans le cadre de leurs projets pédagogiques.

En 2015, nous avons développé une nouvelle version de cet outil, permettant de réaliser des hologrammes couleur plus grands et offrant la possibilité de faire plus d'expériences pour les enseignements en Licence ou Master et dans les écoles d'ingénieurs. L'outil permet aussi chaque année de réaliser des journées de formation continue des enseignants du secondaire et est très fréquemment utilisée pour des actions de diffusion de la culture scientifique.

Le stand permettra de réaliser des expériences d'holographie afin d'illustrer les possibilités de l'outil : multiplexage fréquentiel/angular, double hologramme par réflexion/transmission, filtre « notch », réseau de diffraction.

**MOTS-CLEFS :** *holographie ; interférence ; pédagogie ; travaux-pratiques*

### **RÉFÉRENCES**

- [1] T. Voslion, A. Escarguel, « *An easy teaching tool for holography* », Eur. J. Phys. 33 1803–1811 (2012)
- [2] Th. Voslion, A. Escarguel, " *An easy physics outreach and teaching tool for holography* ", International Symposium on Display Holography, MIT Media Lab, Cambridge Massachusetts USA, J. Phys.: Conf. Ser. 415 012001 (2012).
- [3] A. Escarguel, « *Upgrade of the pedagogic/popular science tool for holography: color holography* », 10 International Symposium on Display Holography, St Pétersbourg (2015)

**PHOTONIQUE MONDIALE, STRATEGIE ET PERSPECTIVES****Costel Subran<sup>1</sup>***<sup>1</sup> Société Française d'Optique, 2 Avenue Augustin Fresnel, 91127 Palaiseau Cedex*

La photonique mondiale enregistre, selon les dernières évaluations de l'OSA un chiffre d'affaires d'environ 4Md USD dont environ 10Md USD dans l'industrie du laser. Les principaux secteurs d'intégration verticale sont : énergie, éclairage, sciences de la vie, machine- outils, communications, sécurité. Le marché de la photonique est un marché global entre les ressources en matériaux, la fabrication, l'intégration en produits capacitants. Avec un leadership indéniable dans les écrans, le photovoltaïque et les LED's, l'Asie prends environ 64% du marché mondial, l'Europe arrive avec 17% du marché loin derrière. La photonique mondiale crée des continuellement des emplois chiffrés fin 2015 à plus de 125.000, dans plus de 900 sociétés.

## CNOP - PHOTONIQUE FRANÇAISE, ACTIONS ET PERSPECTIVES

**Philippe BREGI<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*CNOP, 13 rue Moreau, 75012 Paris*

[pbregi@egide.fr](mailto:pbregi@egide.fr)

### RÉSUMÉ

Le Comité National d'Optique - Photonique a pour mission de fédérer et coordonner au niveau national les actions en faveur de la photonique tant en France qu'à l'international. Son président fera un point des actions menées depuis le dernier congrès de la SFO (juillet 2015) et des perspectives pour les années suivantes.

## CREATION D'ENTREPRISES AUTOUR DES LASERS A FIBRES: ENJEU DE L'INTEGRATION

**Benoît Apper-Collin<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Alphanov, Institut d'Optique d'Aquitaine, Rie François Mitterand , 33400 Talence, France*

[benoit.appert-collin@alphanov.com](mailto:benoit.appert-collin@alphanov.com)

### RÉSUMÉ

Les lasers à fibres représentent un marché mondial de plus de 1,5 milliards de dollars en croissance annuelle de l'ordre de 15%. L'enjeu économique est donc très important pour notre filière d'autant que le socle de recherche académique français est au meilleur niveau dans ce domaine. Les initiatives des chercheurs dans les laboratoires publics ou leur association avec des entrepreneurs sont d'ailleurs à l'origine de nombreux succès industriels et plusieurs leaders internationaux ont ainsi émergés sur les 15 dernières années. Illustration avec le centre technologique ALPhANOV de l'aide concrète à ces créations d'entreprises ainsi qu'à leur développement vers les marchés applicatifs : instrumentation, procédés lasers, médical...

**MOTS-CLEFS :** *laser à fibre ; création d'entreprise ; entrepreneuriat ; session industrielle*

## **POIETIS, LA START-UP À L'INTERFACE PHOTONIQUE - BIOIMPRESSION TISSULAIRE**

**Bertrand VIELLEROBE<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Biparc Bordeaux Métropole, 27 allée Charles Darwin, 33600 Pessac, France*

[bertrand.viellerobe@poietis.com](mailto:bertrand.viellerobe@poietis.com)

### **RÉSUMÉ**

La bioimpression par laser est considérée aujourd'hui comme la technologie de rupture nécessaire pour atteindre le niveau de complexité et de précision requis pour imprimer des tissus biologiques similaires aux tissus natifs. POIETIS, première start-up au monde dans ce domaine, a pour ambition de développer cette technologie et ses applications pour de nombreux domaines biomédicaux. La genèse du projet, la structuration de l'entreprise et ses perspectives de développement technologique comme applicatif seront présentées lors de cette conférence.

**MOTS-CLEFS :** *start-up ; bio-impression ; tissu biologique ; session industrie*

## RÉSUMÉ

ACCELERATEURS INNOVANTS DE PARTICULES ET DE RAYONNEMENT PAR LASER  
ULTRA-INTENSEFrançois Sylla<sup>1</sup><sup>1</sup>SourceLAB SAS, 86 rue de Paris, 91400 Orsay[sylla@sourcelab-plasma.com](mailto:sylla@sourcelab-plasma.com)

## RÉSUMÉ

SourceLAB ambitionne de proposer au marché du Contrôle Non Destructif industriel une solution alternative complète de génération de source X, basée sur l'interaction d'un laser intense avec un plasma.

## CETTE TECHNIQUE DE RUPTURE EST ABSOLUMENT INEDITE

- i. **en termes de résolution** : La génération de la source X induit des tailles de sources de 50µm, augmentant significativement la résolution de la mesure radiographique.
- ii. **en termes de débit de dose** : les valeurs sont de l'ordre de la dizaine de Gy/min à 1 m . Ces performances sont très intéressantes laissent envisager une augmentation de la productivité avec un laser haute-cadence (centaine de Hz à kHz).
- iii. **en termes d'énergie** : la technologie SourceLAB permet d'atteindre des énergies de rayons X très élevées, jusqu'à plusieurs centaines de MeV, pour l'analyse de pièces très épaisses et denses.
- iv. **en termes d'accordabilité** : cette technique de génération laser-plasma laisse présager la possibilité de choisir l'énergie du spectre X pour améliorer l'interprétation des images radiographique.
- v. **en termes de radioprotection** : la source envisagée est « ON-OFF », c'est-à-dire que le rayonnement n'est pas émis sans l'action de l'utilisateur.

## MESURE ET CONTRÔLE DU CHAMP D'UN LASER FEMTO-SECONDE

L. Blanco<sup>2</sup>, N. Védrenne<sup>1</sup>, L. M. Mugnier<sup>1</sup>, F. Cassaing<sup>1</sup>, V. Michau<sup>1</sup>, G. Chériaux<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> ONERA – The French Aerospace Lab, F-92322 Châtillon, France

<sup>2</sup> Laboratoire d'Optique Appliquée, ENSTA ParisTech, CNRS, Ecole polytechnique, Université Paris-Saclay, 828 bd des Maréchaux, 91762 Palaiseau cedex, France

<sup>3</sup> Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses, École Polytechnique, 91128 Palaiseau cedex, France

### RÉSUMÉ

Le contexte de cette communication est celui de la focalisation d'un faisceau laser de puissance. Nous présentons d'une part une implantation originale, simple et compacte d'un analyseur de front d'onde plan focal fondé sur la diversité de phase et estimant le champ complexe, d'autre part une méthode de contrôle de l'amplitude du champ fondée sur l'équation de transport de l'intensité et très économe en calculs.

**MOTS-CLEFS :** focalisation laser, analyse de front d'onde, contrôle de front d'onde, propagation

### 1. INTRODUCTION

Le contrôle et la focalisation de faisceaux laser nécessite d'une part la capacité à mesurer le champ complexe issu du laser dans un plan donné, d'autre part la capacité à contrôler le profil d'intensité du laser à partir de miroir(s) déformable(s) agissant sur sa phase. Ces deux défis sont abordés dans les sections 2 et 3 respectivement, et la section 4 synthétise les résultats.

### 2. ANALYSEUR DE CHAMP COMPLEXE PLAN FOCAL COMPACT

Un analyseur de front d'onde pour faisceau laser de puissance est confronté à de fortes perturbations de phase et d'amplitude. Les analyseurs classiques tels que le Shack-Hartmann [1] ou l'interféromètre à décalage [?] requièrent un front d'onde continu, et leurs performances se détériorent en présence de fortes fluctuations de l'amplitude du champ [?]. La diversité de phase est une technique de mesure du front d'onde à partir d'images prises au voisinage du plan focal [2, 3], qui permet d'estimer la phase et l'amplitude du champ incident [4, 5]. Ces images doivent être affectées des mêmes aberrations recherchées et d'aberrations différentielles étalonnées (appelées « diversité »). L'estimation du champ complexe peut être réalisée par une méthode telle que CAMELOT d'optimisation d'un critère de type maximum de vraisemblance [5]. Une réalisation efficace d'un tel senseur est d'enregistrer simultanément trois images affectées de défocalisations différentes sur le même capteur. Une implantation compacte et simple consiste à exploiter les réflexions internes partielles sur une lame comme illustré sur la figure 1.

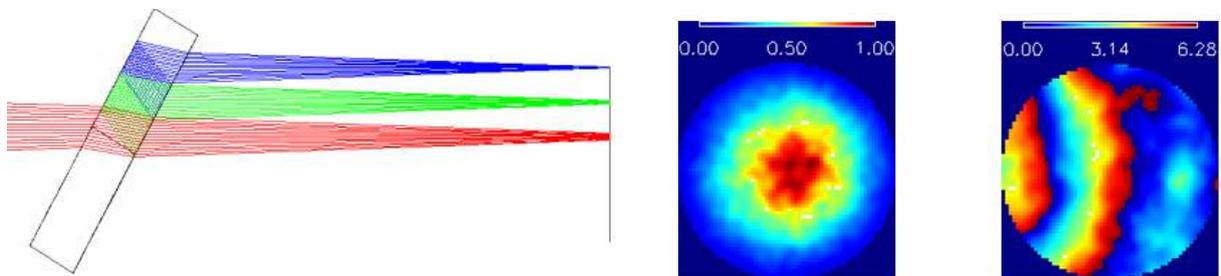


FIGURE 1 : Gauche : schéma du senseur de front d'onde proposé. Les réflexions partielles internes à la lame donnent naissance à plusieurs images avec des défocalisations et astigmatismes étalonnés. Droite : amplitude et phase typiques à mesurer.

Nous avons réalisé des simulations des images enregistrées par ce senseur en prenant en compte un grand nombre de défauts, représentatifs d'un capteur à coût modeste : outre le bruit de photons et le bruit de lecture (9 photo-électrons par pixel et par trame), nous avons pris en compte un bruit de quantification de 12 bits et un bruit spatial fixe consistant en une variation aléatoire du gain de 0,8% et une variation aléatoire de l'offset de 3 photo-électrons. Enfin, le capteur est supposé avoir un puits de 8400 photo-électrons.

En utilisant 2 plans seulement, l'erreur RMS définie comme  $\varepsilon^2 = \langle E_{\text{estimé}} - E_{\text{vrai}} \rangle^2 / \langle E_{\text{vrai}} \rangle^2$  est de l'ordre de 0.1. Lorsqu'on utilise trois images avec des diversités différentes, ainsi que le permet le senseur proposé, cette erreur RMS tombe en dessous de 0.01. Cette erreur ne décroît pas avec le nombre d'images sommées à partir d'environ 10 images : le bruit de photon n'est très vite plus le facteur limitant. Des résultats plus détaillés sont présentés dans [6].

### 3. CONTRÔLE DU PROFIL D'INTENSITÉ

Afin de maximiser la puissance au centre du plan focal d'un laser de puissance il est nécessaire d'en corriger à la fois la phase et l'amplitude, et pas Nous présentons une nouvelle méthode permettant de contrôler l'amplitude du champ d'un laser à l'aide d'un miroir déformable (MD) : connaissant l'intensité  $I_1$  du champ dans un plan  $P_1$ , on recherche la phase  $\phi_1$  à appliquer au MD dans ce plan pour que l'intensité dans un plan  $P_2$  en aval soit une intensité cible  $I_2^c$  donnée. Contrairement aux approches de type Gerchberg-Saxton, celle-ci est fondée sur sur l'équation de transport de l'intensité et n'est pas itérative : le calcul de la solution  $\phi_1$  se ramène à la multiplication d'une matrice dépendant de l'intensité  $I_1$  par le vecteur concaténant les valeurs de  $I_2^c - I_1$ .

Nous avons réalisé des simulations afin d'évaluer les performances de cette méthode. Elles sont présentées sur la figure 2 : L'intensité initiale  $I_1$ , non corrigée, est représentée sur la gauche de l'image. L'intensité cible, représentée au centre de l'image, a été choisie constante sur l'essentiel de la pupille afin de maximiser l'intensité au centre du plan focal suivant avec une apodisation au bord afin d'éviter des discontinuités en bord de pupille. Les conditions de simulation étaient les suivantes : un diamètre du

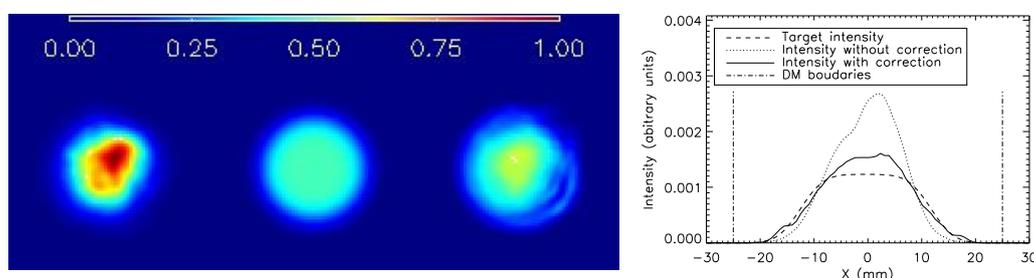


FIGURE 2 : Gauche : intensité non corrigé (plan  $P_1$ ), intensité cible  $I_2^c$  et intensité obtenue  $I_2$  après correction au plan  $P_2$ . Droite : coupes de ces cartes d'intensité.

MD de 5cm, une longueur d'onde de  $\lambda = 850\text{nm}$ , et une distance de propagation égale à la moitié de la distance de Fresnel  $F_d = a^2/\lambda$  pour le pas inter-actionneur  $a$  du MD, de telle sorte que la modulation d'intensité obtenue dans le plan  $P_2$  soit maximale [?]. Pour un MD comportant  $12 \times 12$  actionneurs, cela donne une distance de propagation de 10m. L'intensité  $I_2$  obtenue après correction est représentée sur la droite de l'image Figure 2 ; ce profil est clairement plus proche de l'intensité cible  $I_2^c$  que le profil initial  $I_1$ . L'augmentation de l'intensité maximale au plan focal, en supposant une correction de phase parfaite par un second MD, est de 33%.

Ces travaux sont en partie financés par l'Agence Nationale de la Recherche (projet ANR-12-ASTR-0008-03).

## RÉFÉRENCES

- [1] R. B. Shack and B. C. Plack, "Production and use of a lenticular Hartmann screen (abstract)," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 61, p. 656, 1971.
- [2] R. A. Gonsalves, "Phase retrieval and diversity in adaptive optics," *Opt. Eng.*, vol. 21, no. 5, pp. 829–832, 1982.
- [3] L. M. Mugnier, A. Blanc, and J. Idier, "Phase diversity : a technique for wave-front sensing and for diffraction-limited imaging," in *Advances in Imaging and Electron Physics*, P. Hawkes, Ed. Elsevier, 2006, vol. 141, ch. 1, pp. 1–76. [Online]. Available : <mailto:mugnier@onera.fr>
- [4] S. M. Jefferies, M. Lloyd-Hart, E. Keith Hege, and J. Georges, "Sensing wave-front amplitude and phase with phase diversity," *Appl. Opt.*, vol. 41, no. 11, pp. 2095–2102, 2002.
- [5] N. Védrenne, L. M. Mugnier, V. Michau, M.-T. Velluet, and R. Bierent, "Laser beam complex amplitude measurement by phase diversity," *Opt. Express*, vol. 22, no. 4, pp. 4575–4589, Feb. 2014. [Online]. Available : <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-22-4-4575>
- [6] N. Védrenne, F. Cassaing, L. M. Mugnier, V. Michau, G. Iaquaniello, L. Blanco, and G. Chériaux, "Design and performance of an integrated phase and amplitude diversity sensor," in *CLEO : 2015*. Optical Society of America, 2015, p. STu2N.2. [Online]. Available : [http://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=CLEO\\_SI-2015-STu2N.2](http://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=CLEO_SI-2015-STu2N.2)
- [7] B. Paul, J.-F. Sauvage, and L. M. Mugnier, "Coronagraphic phase diversity : performance study and laboratory demonstration," *Astron. Astrophys.*, vol. 552, no. A48, Apr. 2013.
- [8] L. Blanco, N. Védrenne, V. Michau, L. M. Mugnier, and G. Chériaux, "Adaptive laser beam shaping with a linearized transport-of-intensity equation," in *CLEO : 2015*. Optical Society of America, 2015, p. STu2N.4. [Online]. Available : [http://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=CLEO\\_SI-2015-STu2N.4](http://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=CLEO_SI-2015-STu2N.4)

## L'optique adaptative dans les systèmes Laser de très haute puissance crête

P. Jougl<sup>a</sup>, M. Charbonneau<sup>a</sup>, F. Lureau<sup>a</sup>, S. Laux<sup>a</sup>, G. Matras<sup>a</sup>, E. Durand<sup>a</sup>, C. Radier<sup>a</sup>, O. Chalus<sup>a</sup>, S. Ricaud<sup>b</sup>, A. Soujaeff<sup>a</sup>, L. Boudjemaa<sup>a</sup> et C. Simon-Boisson<sup>a</sup>

<sup>a</sup>THALES OPTRONIQUE, 2 avenue Gay-Lussac, 78995 Elancourt, France

<sup>b</sup>Synchrotron SOLEIL, L'Orme des Merisiers, 91190 Gif-Sur-Yvette, France  
christophe.simonboisson@fr.thalesgroup.com

Les systèmes laser de très haute puissance crête (de 100 TeraWatt à 10 PetaWatt) sont utilisés pour des expériences ultimes d'interaction laser-matière qui requièrent pour le faisceau focalisé sur la cible l'intensité la plus élevée possible. Les dimensions de la tache focale sont donc un paramètre essentiel pour maximiser l'intensité et dépendent de la qualité du front d'onde du faisceau laser. Or les systèmes laser de haute puissance crête sont très complexe et produisent des faisceaux de grande taille qui imposent l'utilisation de composants de très grandes dimensions dont la fabrication est délicate et dont les défauts s'additionnent dans l'ensemble de la chaîne laser. L'utilisation de dispositifs d'optique adaptative se composant d'un système d'analyse du front d'onde du faisceau, d'un système de correction par miroir déformable et d'un algorithme de calcul de la correction à appliquer en fonction du résultat de la mesure a démontré son efficacité sur de tels systèmes laser. Différents exemples de systèmes laser intégrant un dispositif d'optique adaptative et les résultats obtenus sont présentés et commentés.

## CONTROLE DE FRONT D'ONDE POUR L'AUTOFOCALISATION D'HARMONIQUES D'ORDRES ELEVES

Ludovic Quintard, Fabrice Catoire, Éric Mevel, Vasily Strelkov, Dominique Descamps et Éric Constant

Centre Lasers Intenses et Applications UMR 5107, Université de Bordeaux CEA CNRS, 33400 Talence, France

[quintard@celia.u-bordeaux.fr](mailto:quintard@celia.u-bordeaux.fr)

### RÉSUMÉ

Nous générons des harmoniques d'ordres élevés en utilisant un laser fs TW à front d'onde contrôlé par un miroir déformable et montrons que cela permet de focaliser automatiquement le faisceau XUV généré.

**MOTS-CLEFS :** *Génération d'harmoniques d'ordres élevés ; autofocalisation ; Miroir déformable ; impulsions XUV ultrabrèves*

Afin d'étudier des phénomènes ultra-rapides tels que les dynamiques électroniques dans les atomes ou les molécules, l'utilisation d'impulsions de quelques centaines d'attosecondes ( $1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$ ) est nécessaire. Une des méthodes permettant d'obtenir des impulsions aussi brèves est la génération d'harmoniques d'ordres élevés (HHG) dans les gaz [1], qui se produit lorsqu'une impulsion laser intense interagit avec ces derniers et produit un faisceau XUV cohérent. L'efficacité de ce processus de génération est faible ( $\leq 10^{-5}$ ) mais la cohérence du faisceau permet d'obtenir les intensités nécessaires pour l'observation de phénomènes non-linéaires dans le domaine XUV. Utiliser des lasers femtosecondes de forte énergie (laser TW) associés à de grandes longueurs de focalisation pour l'HHG permet d'obtenir de forts flux de photons XUV [2] mais rend peu compact le système expérimental (focale de 10 à 20 m). Une alternative à cette configuration consiste à produire des harmoniques d'ordres élevés en dehors du foyer du laser. Cependant la qualité de front d'onde des sources laser TW réduit l'efficacité de génération des harmoniques en dehors de la zone de Rayleigh et conduit à une détérioration de la qualité spatiale des faisceaux XUV. Notre approche consiste à corriger le front d'onde du laser par un miroir adaptatif spécifique pour pouvoir générer des harmoniques en dehors du foyer laser et utiliser une focale de 2 m. Dans ces travaux nous proposons une approche nouvelle qui consiste à contrôler la phase spatiale des harmoniques directement lors du processus de génération afin de générer les harmoniques avec un front d'onde convergent qui va les amener à s'autofocaliser en un point.

En considérant un milieu générateur infiniment fin, la phase ( $\varphi_q$ ) d'une harmonique  $q$  donnée s'écrit de la manière suivante :

$$\varphi_q(t, r) = q\varphi_{IR}(r) - \alpha(I_{IR})I_{IR}(t, r)$$

où  $\varphi_{IR}$  est le profil spatial de phase du faisceau IR permettant la HHG et où  $I_{IR}$  est l'intensité de ce faisceau. Cette expression montre qu'un contrôle de la phase spatiale et de l'intensité du faisceau IR générateur permet de contrôler la phase des harmoniques émises. Le contrôle du front d'onde résultant peut ainsi permettre une focalisation du faisceau XUV à une distance donnée de la source. L'avantage potentiel de cette méthode est qu'elle ne nécessite pas l'utilisation d'optique sur le trajet des harmoniques et donc qu'elle permet de conserver le flux de ces dernières. Pour contrôler au mieux la phase de l'IR la solution adoptée est l'utilisation d'un miroir déformable couplé à un analyseur de front d'onde qui permet de générer des harmoniques hors foyer. Nous modifions le front d'onde du faisceau IR et son profil spatial en changeant la position du milieu générateur par rapport à la position du foyer du faisceau IR. Le système utilisé pour la correction est composé d'un miroir déformable HIPAO [3] (ISP System, revêtement diélectrique large bande, compatible vide,

haut seuil de dommage) et d'un analyseur de front d'onde HASO (Imagine Optic). La combinaison de ces deux systèmes permet d'obtenir des déformations du front d'onde inférieures à 10 nm RMS.

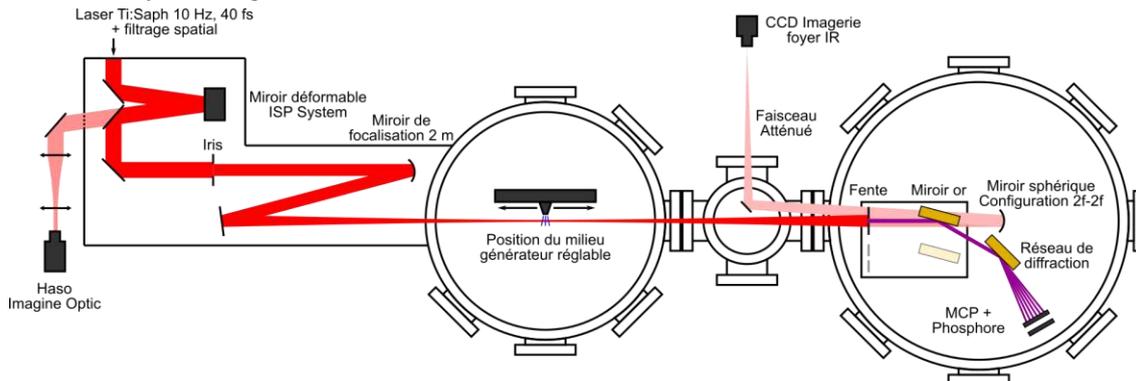


Fig. 1 : Dispositif expérimental permettant de contrôler le front d'onde d'un laser TW sous vide puis de générer des harmoniques d'ordres élevés dans les gaz. Le faisceau XUV est caractérisé spatialement et spectralement avec un spectromètre XUV à champ plan.

Le dispositif expérimental utilisé pour cette expérience (figure 1) est un laser TW (CPA Ti : Sapph), 10 Hz, 40 fs couplé à un dispositif de filtrage spatial installé avant le compresseur. Le front d'onde est ensuite corrigé sous vide à l'aide du couple miroir déformable et analyseur de front d'onde. Le faisceau, après traversée d'un iris de diamètre 20 mm (pour un faisceau incident de 8,4 mm de FWHM) est focalisé par un miroir sphérique de 2 m de focale dans un jet pulsé de néon de 250  $\mu\text{m}$  sur un foyer de 115  $\mu\text{m}$  de largeur (FWHM) correspondant à un paramètre confocal de 4 cm. Le jet est placé sur des platines de translation motorisées, ce qui permet de varier la position du milieu générateur par rapport au foyer de l'IR. Le faisceau harmonique est ensuite analysé à l'aide d'un spectromètre XUV à réseau. Le spectromètre est composé d'une fente d'entrée de 500  $\mu\text{m}$ , d'un miroir en or et d'un réseau XUV sphérique en incidence rasante qui diffracte les différentes longueurs d'ondes vers des galettes de micro-canaux. Ce dispositif permet d'obtenir une caractérisation du faisceau à la fois spatiale (axe vertical) et spectrale (axe horizontal) comme présenté sur la figure 2. La figure 2 présente le spectre harmonique pour deux positions du jet de gaz (20 mm après le foyer et 60 mm avant le foyer). Cette figure montre que la divergence du faisceau XUV change avec la position du jet. Pour un ordre harmonique donné nous avons ensuite extrait le diamètre du faisceau des harmoniques (FWHM). Le résultat est représenté sur la figure 3 où un minimum de divergence est observé en fonction de la position du jet qui de plus diffère en fonction de l'ordre harmonique.

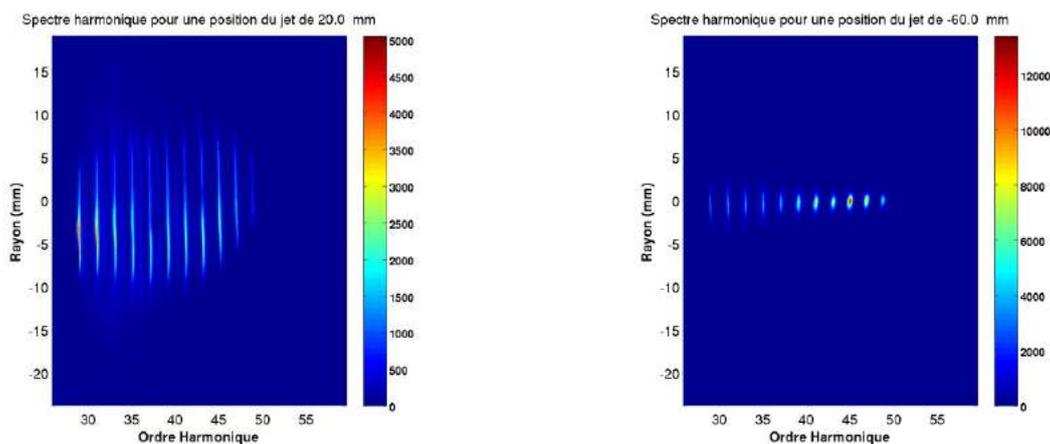


Fig. 2 : Spectres XUV résolus spatialement obtenus pour un jet de gaz placé 20 mm après le foyer (figure de gauche) ou 60 mm avant le foyer (droite).

L'intégration du signal nous permet également d'estimer le nombre de photons XUV détectés. Nous avons observé que pour certaines harmoniques, le minimum de divergence correspond à un maximum de flux de photons ce qui permet de maximiser l'éclairement

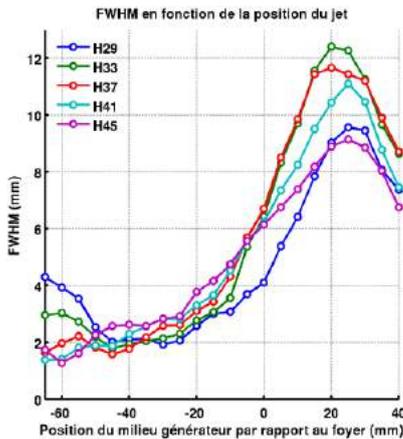


Fig. 3 : Évolution de la largeur à mi-hauteur en fonction de la position du milieu générateur par rapport au foyer (jet de gaz après le foyer pour des valeurs positives).

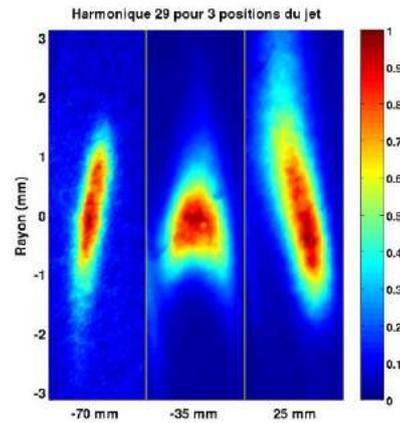


Fig. 4 : Harmonique 29 après introduction d'une dérive de fréquence spatiale dans le faisceau IR générateur pour trois positions du jet de gaz.

Afin de discriminer un minimum de divergence d'une possible focalisation, la même expérience a été réalisée en introduisant une dérive de fréquence spatiale dans le faisceau IR générateur qui le rend asymétrique avec des fréquences rouges en bas du faisceau et des bleus en haut. Les résultats sont présentés sur la figure 4 pour trois positions du jet de gaz. Il apparaît que la dérive de fréquence spatiale sur les harmoniques change de signe suivant la position du milieu générateur, ce qui revient à échanger le haut et le bas du faisceau XUV. Ce changement de signe de la dérive de fréquence spatiale nous indique que le minimum de divergence est bien dû à une focalisation et que le faisceau XUV est effectivement émis avec son front d'onde qui converge. La grande distance d'observation (3 m) impose une taille minimale pour le faisceau XUV au point de focalisation.

Cette preuve de faisabilité montre que le contrôle du front d'onde incident permet de façonner les propriétés spatiales d'un faisceau XUV cohérent ultrabref. Contrôler simultanément le profil d'intensité et le front d'onde du faisceau IR permettrait de contrôler encore plus finement le front d'onde des radiations XUV et d'obtenir des intensités XUV importantes même aux courtes longueurs d'ondes. Cette approche est particulièrement prometteuse pour les nouveaux lasers de forte énergie comme Apollon ou ELI.

Le système optique adaptatif décrit dans cette communication a été réalisé dans le cadre du projet collaboratif HIPAO porté par P. Sauvageot (ISP Système) et incluant les sociétés Imagine Optic (N. Lefaudeux) et ISP Aquitaine (A. Dongieux).

#### REFERENCES

- [1] A. McPherson J.Opt.Soc.Am **4** 595 (1987) et M. Ferray J.Phys. B **21** L31 (1988)
- [2] E.J Takahashi et al. Nat Commun **4** 2691 (2013)
- [3] N.Lefaudeux et al. Proc.SPIE **8236** (2012)

**ADAPTIVE OPTICS FOR HIGH-PRECISION HIGH-STABILITY FEMTOSECOND LASER  
ENGRAVING**

**Clémentine Javaux Léger (ALPhANOV), Arnaud Zoubir (ALPhANOV), Rainer Kling  
(ALPhANOV), Arnaud Royon (Argolight), Guillaume Beaugrand (Imagine Optic), Xavier  
Levecq (Imagine Optic)**

**RÉSUMÉ**

In the frame of the LASHARE European project, the LASAO laser equipment assessment (LEA) aims to validate a closed loop control wavefront correction system for the optimization and long-term stabilization of femtosecond laser beam parameters for femtosecond laser engraving. A specific attention is given to the improvement of the manufacturing process of innovative calibration standards for calibrating and monitoring fluorescence imaging systems. More generally, it will expand the possibilities for femtosecond machining as an industrial tool.

## Laser Apollon : efforts mis en œuvre pour sa qualité spatiale de faisceau

J. P. Zou, G. Chériaux, D. N. Papadopoulos, C. Le Blanc, F. Druon, L. Martin, A. Fréneaux, A. Beluze, N. Lebas,  
I. Taghzout, J. L. Paillard, F. Mathieu, B. Le Garrec, P. Audebert

*Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses, CNRS, Ecole Polytechnique, CEA, Université Paris-Saclay, Palaiseau, France.*

Le projet CILEX APOLLON vise à installer, sur le site de l'Orme des Merisiers, à Saclay, un Centre Inter disciplinaire de la Lumière EXtrême. L'installation phare de ce centre sera APOLLON, un système laser multi-PW, capable de générer des impulsions ultra-brèves avec une cadence de fonctionnement d'un tir par minute. Pour atteindre cette puissance crête extrêmement élevée, Apollon est basé sur la génération d'impulsions de 15 fs à un niveau d'énergie de 150 J. L'architecture hybride est utilisée pour la conception d'Apollon : le pilote laser de haute qualité est basé sur la technologie OPCPA ; l'amplification de puissance du faisceau Apollon portera l'énergie à 300 J grâce à 5 amplificateurs successifs à Ti : Sa. Après compression temporelle, 2 des 4 faisceaux générés à l'issue de l'amplification délivreront respectivement 1 PW et 10 PW. Pour générer des sources de particules ultra-intenses ainsi que pour les différentes expériences laser-plasma, une parabole hors-axe sera utilisée afin de produire une tache focale dont l'intensité lumineuse sur cible dépassera la barrière de  $2 \cdot 10^{22}$  W/cm<sup>2</sup>.

La qualité spatiale du faisceau ainsi que celle de sa tache focale sont deux des paramètres majeurs du système Apollon, puisque déterminants pour l'intensité laser sur cible. Par contre, tout au long de la chaîne Apollon, le faisceau laser subit des modifications qui impactent son front d'onde et son profil spatial. Dans cette présentation, après une description sur la conception et l'implantation d'Apollon, nous présenterons tous les efforts mis en œuvre pour garantir une qualité spatiale de faisceau compatible avec l'exigence des expériences : relais d'image, filtrage spatial, mesure de front d'onde et contrôle dynamique de la surface d'onde à l'aide de deux boucles d'optique adaptative. Ces deux boucles comprendront un miroir de 160 x 225 mm<sup>2</sup> utilisé à 45° d'incidence pour compenser les distorsions apportées par l'amplification laser et un second de 500 mm de diamètre positionné avant la chambre d'expérience pour optimiser la tache focale.

## LA PLATEFORME PEMOA : OUTIL DE DIFFUSION DE L'OPTIQUE ADAPTATIVE

Oriane Mollet<sup>1</sup>, Jean-François Sauvage<sup>2</sup>, Kacem El-Hadi<sup>3</sup>, Thierry Fusco<sup>2</sup>, Vincent Michau<sup>2</sup>, Jérôme Lopez<sup>1</sup>, Marc Ferrari<sup>3</sup>, Katia Mirochnitchenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> OPTITEC, Technopôle de Château-Gombert, 38 rue Joliot-Curie, 13388 MARSEILLE cedex 13

<sup>2</sup> ONERA, 29 avenue de la Division Leclerc, 92322 CHATILLON

<sup>3</sup> Laboratoire d'Astrophysique de Marseille, Aix-Marseille Université, 13388 MARSEILLE cedex 13

[oriane.mollet@pole-optitec.com](mailto:oriane.mollet@pole-optitec.com)

### RÉSUMÉ

**Résumé** Retour d'expérience, valeur ajoutée et perspectives de la plateforme PEMOA, première plateforme technologique mutualisée en Optique Adaptative, accessible aux académiques et industriels.

**MOTS-CLEFS :** *plateforme technologique, matériel mutualisé, optique adaptative, ophtalmologie (quatre au maximum)*

### 1. INTRODUCTION

La plateforme technologique PEMOA est implantée sur le site de Château-Gombert à Marseille depuis novembre 2014. Elle repose sur l'association de trois partenaires, l'ONERA et le LAM pour l'expertise technique en optique adaptative et les liens académiques avec les formations de l'Université, et le pôle de compétitivité Optitec, qui assure la gestion opérationnelle.

Son objectif est de promouvoir l'Optique Adaptative (OA) ainsi que les compétences françaises dans le domaine, au niveau régional et au-delà. PEMOA vise à transférer la technologie développée pour l'astronomie vers des applications telles que l'ophtalmologie, la microscopie in vivo, les lasers de puissance, les télécommunications optiques en espace libre (FSO) ou d'autres applications pour lesquelles le potentiel de l'OA doit encore être démontré (applications industrielles par exemple). Pour la réalisation de ces objectifs, la plateforme est équipée de ressources mutualisées à l'état de l'art, réparties sur trois bancs : une caméra d'imagerie rétinienne dédiée à l'ophtalmologie (système commercial), un banc didactique conçu pour une utilisation en TP et un banc technologique pour les preuves de concept et la validation de composants.

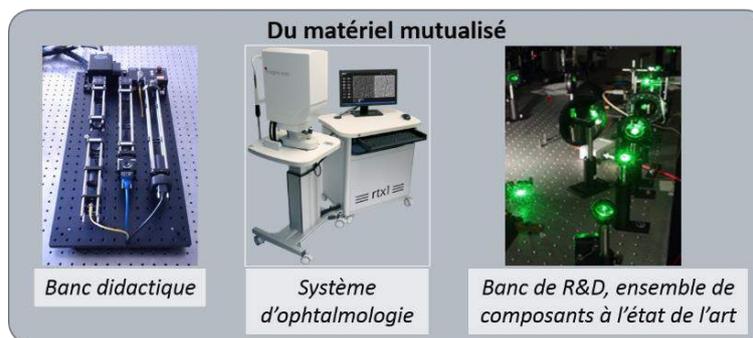


Figure 1: Le matériel mutualisé

### 2. LA FORMATION

Essentiel dans la diffusion de la technique auprès de l'écosystème académique et industriel, la formation est une activité clef de la plateforme. Pour permettre aux participants d'appréhender les fondamentaux de l'OA, l'équipe a mis en place un ensemble de formations initiales et continues, en attachant une importance particulière à la manipulation pratique d'une boucle d'OA sur le banc

didactique, dans le but de se familiariser avec les différents composants (analyseur, miroir déformable) et leur opération (étalonnage, loi de contrôle). De plus, les autres bancs disponibles sur la plateforme permettent la réalisation de formations variées et adaptables au public visé.



Figure 2: Formation initiale avec l'Ecole Centrale Marseille

L'objectif des formations étudiantes est de permettre aux élèves d'avoir accès à des moyens technologiques de pointe et d'acquérir une connaissance applicative des technologies de l'OA. En 2015, ces sessions de TP ont permis aux élèves de l'Ecole Centrale Marseille (ECM) d'étudier la formation d'images à travers la turbulence et de mettre en évidence l'intérêt de l'OA. Les étudiants de la filière génie biomédical de Polytech Marseille se sont concentrés sur l'application de l'OA en ophtalmologie avec, en préparation à leur insertion dans le monde professionnel, les problématiques d'intégration de l'OA dans un système médical (ergonomie, sécurité, réglementation).

La formation continue participe elle aussi à la diffusion de l'OA vers un public d'ingénieurs et chercheurs en optique. Cette formation est inscrite aux catalogues de CNRS Formation Entreprise et AMU Formation et proposée aussi en direct par Optitec. Elle utilise le banc didactique et aborde le principe et l'utilité de l'OA, les composants et les paramètres importants d'une boucle d'OA, ainsi que les aspects de traitement d'image. Elle permet de balayer un ensemble d'applications à l'extérieur du domaine de l'astronomie telles que l'ophtalmologie, la microscopie, etc.

### 3. LE DEVELOPPEMENT DE NOUVELLES BRIQUES TECHNOLOGIQUES

L'utilisation de l'OA sur de nouvelles applications nécessite un investissement important en matériel à des fins de test ou de validation. La plateforme se place en support de ces activités en proposant l'accès à son matériel par le biais de la location de composants ou l'utilisation ouverte de la plateforme. En complément de la formation, cette activité offre un autre accès, privilégié, à la connaissance regroupée sur la plateforme puisque les composants mis à disposition ont été préalablement caractérisés par les experts de la plateforme, qui peuvent aussi fournir conseil et expertise à l'utilisateur.

L'accès à une plateforme ouverte permet aussi la création d'une communauté d'utilisateurs, qui viennent enrichir et compléter la connaissance disponible sur la plateforme grâce à leurs activités.

### 4. OUVERTURE ET LIENS VERS LE MONDE MEDICAL

PEMOA se focalise en particulier sur l'application en ophtalmologie en accompagnant la technique vers les utilisateurs finaux. Cela se traduit par la création de liens locaux vers les acteurs du médical et l'accompagnement des médecins à l'utilisation de systèmes d'OA.

La plateforme a permis de tisser des liens avec l'AP-HM (Assistance publique – Hôpitaux de Marseille) et particulièrement le département d'ophtalmologie de l'hôpital de la Timone. Ces liens se sont concrétisés avec la mise à disposition pour six mois, de la caméra d'imagerie rétinienne haute résolution disponible sur la plateforme, pour la réalisation d'une étude clinique dirigée par le Pr Matonti. L'objectif est d'utiliser différentes modalités d'imagerie dont l'imagerie rétinienne pour analyser des patients souffrant de troubles psychiatriques dont la schizophrénie. En mettant ce système à disposition des médecins, PEMOA contribue à faire connaître cette nouvelle technique

d'imagerie très prometteuse, obtenir des retours utilisateurs utiles pour des développements futurs et, en permettant la réalisation d'études cliniques originales, ouvrir de nouveaux marchés applicatifs en ophtalmologie.



Figure 3: Mise à disposition du RTX1 à l'hôpital de la Timone

## 5. APPORT DE LA PLATEFORME PEMOA POUR L'EMERGENCE DE PROJETS

Un effet direct de l'implication de PEMOA auprès des communautés d'utilisateurs, comme les médecins, est la détection de nouvelles applications pouvant bénéficier de l'OA.

Ainsi, la présence de PEMOA sur le campus de la Timone a permis de faire émerger les besoins de chercheurs de l'Institut des Neurosciences qui travaillent sur des modèles animaux, et de définir avec eux de nouvelles applications potentielles de l'OA en imagerie corticale et sur le couplage de l'OA avec une imagerie de fluorescence.

Ainsi, la plateforme grâce à la visibilité qu'elle apporte à la technique de l'OA est un outil efficace pour susciter l'émergence de projets collaboratifs dans ce domaine. L'implication d'industriels dans la plateforme et, plus largement, le réseau Optitec confère à PEMOA une dimension mixte académique-industriel, permettant des mises en relation qualifiées entre de potentiels utilisateurs de la techno OA et les experts, pouvant donner lieu à de futurs projets de R&D.

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Suite au démarrage des différentes activités en 2015, l'année en cours va permettre de consolider l'activité de la plateforme sur les différents volets.

En particulier, l'activité de formation, essentielle à la plateforme va être renforcée, avec l'ouverture de nouvelles formations initiales et d'une session de formation vers les industriels, les 22 et 23 septembre prochains, rendu possible par l'enregistrement d'OPTITEC en tant qu'organisme de formation auprès du préfet de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur.

En parallèle, la location de composants et l'accès au banc technologique vont être développés, en proposant aussi l'élargissement de la plateforme avec des éléments non situés sur le banc mais disponibles à la demande par son intermédiaire.

Afin, l'ensemble de ces actions permettent aussi d'inscrire PEMOA dans la dynamique industrie du futur, une application prospective de l'OA qui sera présentée lors d'une journée d'animation Optitec dédiée au contrôle non destructif.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient CG13, Région Paca, MPM, Feder et DR PACA et les PME partenaires (ALPAO, CILAS, IMAGINE-EYES, PHASICS et SHAKTI) pour leur soutien et le financement de la plateforme.

## NANO CORRECTION OF BIMORPH X-RAY MIRRORS FOR SYNCHROTRON RADIATION SOURCES AND XFELS

L. Peverini<sup>1</sup>, S. Perrin<sup>1</sup>, H. Guadalupi<sup>1</sup>, C. du Jeu<sup>1</sup>, J. J. Ferme<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Thales SESO S.A.S., Aix en Provence, 13593, France

[luca.peverini@fr.thalesgroup.com](mailto:luca.peverini@fr.thalesgroup.com)

### ABSTRACT

**The principle and performance of a set of elliptical bimorph mirrors for a synchrotron beamline is presented.** The control of the mirror profile to obtain the desired mirror shape and local radius is obtained from inspection of interferometry data profile and it allows obtaining ultimate mirror shaping within few iterations. A metrology with sub-nm accuracy has been specifically developed for this purpose adapting a set of conventional interferometry techniques to the specific case of X-ray mirrors. An intense round-robin campaign with world-leading X-ray metrology laboratories and equipped with NOM/LTP-based profilers has been realized to validate our approach.

**KEYWORDS:** *X-ray mirrors; adaptive optics; ion figuring; synchrotron optics.*

### 1. CONTEXT

Modern synchrotron radiation sources (3rd generation and Free Electron Lasers) need very high quality optics to exploit the full power and preserve the coherence of the radiation. The target specifications for X-ray mirrors that needs be fulfilled simultaneously for present and future X-ray sources are the following: sub-nm surface figure errors, roughness at the atomic scale and slope errors well below 200 nrad over mirror length that can reach 1.5 m. Bimorph X-ray mirrors represent a valuable solution to this need and lead to a set of competitive advantages with state of the arts super-polished optics [6].

Thales SESO has been pioneering this field and is keeping a leading role in the fabrication of a very compact adaptive x-ray mirror based on the properties of piezoelectric ceramics. Two bimorphs mirrors concepts have been patented [3-4], the so called 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> generation, while more than 80 bimorph mirror systems based on these technologies have been already delivered to various synchrotron facilities worldwide. Once properly shaped they can be used to focus, collimate or for beam shaping in a variety of application. In contrast to traditional mirrors with mechanical benders or fixed curvature mirrors, where the user gets only few degree of freedom to adjust the mirror radius and coma aberrations, bimorph mirrors come with many degree of freedom (typically from 8 to 32) thus allowing to suppress higher order aberrations and middle-high spatial frequencies with periods larger than 20 mm.

### 2. BIMORPH MIRROR TECHNOLOGY

The first examples of actively deformable mirrors in the hard X-ray domain were reported in the early nineteen's [1-2]. Basing on these works the so-called 1<sup>st</sup> generation of bimorphs mirrors was developed and commercialized by Thales SESO (former Société Européenne de Systèmes Optiques) in a variety of shapes and dimensions also exceeding 1 m in lengths. In their original design Bimorphs are assembled in a sandwich by gluing together two pairs of bilayers consisting of an active element (piezoelectric ceramic) and a neutral fused silica plate, which is then polished. A shortcoming of this design is that the electrodes are glued directly below the thin optical substrate that may introduce a periodic deformation of the optical surface often not acceptable with present beamline needs [5]. In order to address these limitations Thales SESO has recently developed a new

concept of bimorph (2<sup>nd</sup> generation), with piezo bonded to the side faces of a monolithic substrate and is shown in the following figure [5].



Figure 1: Elliptical Bimorph of 2<sup>nd</sup> generation mirror integrated in its frame and equipped with 16<sup>th</sup> electrodes. The systems will be used for hard X-ray focusing on a synchrotron beamline.

In this design metallic coatings are applied along the length of each piezoelectric ceramic and non-conductive gaps in the metal coatings create discrete electrodes. In contrast to a 1st gen. bimorph, the procedure for constructing a next generation bimorph also makes it easier to pre-polish monolithic silicon or fused silica substrates using super-polishing techniques such as ion beam figuring (IBF). This polishing process typically involves high heat load and it is not suitable on 1<sup>st</sup> generation bimorphs. The uses of IBF allow in particular achieving very low figure errors and Bimorphs to be competitive with state of the arts super-polished optics [6].

### 3. STATE OF THE ARTS IN FABRICATION AND METROLOGY FOR BIMORPHS MIRRORS

During the last year at THALES SESO we have been able to design, set-up and deliver more than 10 integrated elliptical bimorphs as the one presented in Fig. 1 and with slope errors rms below 200 nrad over their full active lengths. These are elliptical mirror optics that can be operated as focusing device over an extremely wide range of focal distances (from  $q_{min}=0.5$  m to  $q_{max}=25$  m). The performances achievable with this type of device are illustrated on Fig. 2 summarizing the results on a set of mirrors realized for a unique synchrotron beamline.

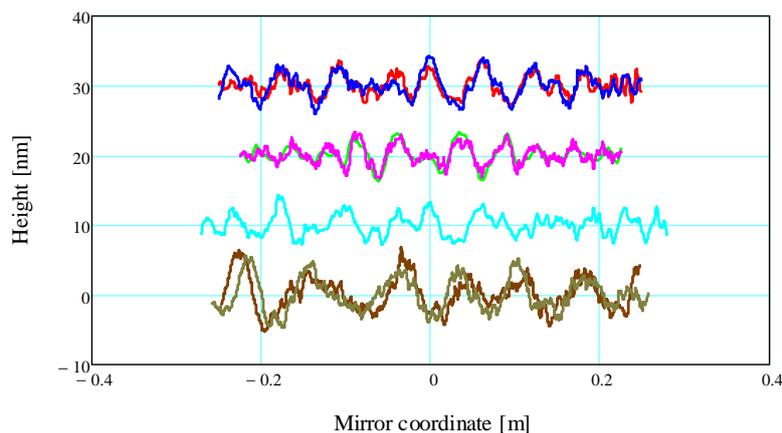


Figure 2: Comparison of residual surface profiles obtained on 4 elliptical bimorph mirror systems composed of 16<sup>th</sup> piezoelectric actuators and after elliptical shaping. Each mirror data set is presented shifted vertically for clarity.

The data illustrate the results of our elliptical shaping process in terms of residual shape errors (real shape-ellipse). The shape errors for all the systems is found below 10 nm PTV and the corresponding slope errors rms for each mirrors lie between 120 nrad to 180 nrad, as confirmed by

customer measurements realized using scanning laser deflectometry (slope sensitive). The first two sets of measurement (red and blue curves) are residual obtained after shaping for two different focal distances ( $p=50$  m,  $q=1.976$  m and  $\theta=3.5$  mrad) and demonstrate that bending does not introduce additional artifacts despite very different bending radius. All the other set of curves refers to different mirror systems, each one shown with a different vertical offset. The overlapping curve (except the blue and red) compares different metrology schemes and demonstrates a metrology with sub-nm sensitivity. A cross-comparison between our interferometry methods and a NOM profiler is finally presented in Fig. 3 and is given in slope units for another flat mirror with a curvature radius exceeding 100 km.

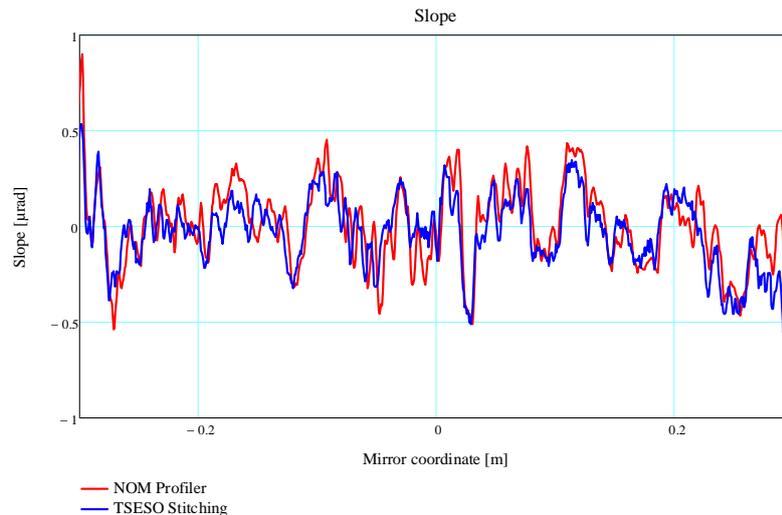


Fig. 3: Cross-comparison between different metrologies realized on a flat 2<sup>nd</sup> generation bimorph mirror without voltage applied. NOM profiles (blue curve) are compared with interferometry measurements realized at Thales SESO using classical interferometry (red curve).

An excellent agreement is observed comparing interferometry and NOM data allows inferring a slope errors r.m.s. 150 nrad over 600 mm length after shape optimization. The observed agreement validates our metrology approach and it is sufficient to ensure further deterministic polishing actions.

### CONCLUSION

A set of bimorph mirrors has been realized using the 2<sup>nd</sup> generation technology developed by Thales SESO. The integrated mirror systems have been successfully shaped with residual errors below 10 nm *PTV* and slope errors well below 200 nrad rms. Further reduction of the profile errors will be possible by deterministically polishing, e.g. by ion beam figuring, these profile errors as obtained after shaping.

The authors gratefully acknowledge R. Signorato (CineI, Italy), F. Siewert (HZB, Germany), M. Idir (NSLS II, USA) and the optics group at Diamond Light Source (DLS, UK) for fruitful discussion and for sharing useful slope data.

### RÉFÉRENCES

- [1] J. Susini, et. al, Rev. Sci. Instrum. 66, p. 2229-2231, (1995).
- [2] R. Signorato, O. Hignette, & J. Goulon, Synchrotron. Rad. 5, 797-800 (1998).
- [3] J.-F. Carre', (2009) US 7618149 B2
- [4] J.-F. Carre', (2011) EP 2354832 A1
- [5] Simon G. Alcock, et al., J. Synchrotron Rad. 22, (2015).
- [6] K. Yamauchi, H. Mimura, K. Inagaki, and Y. Mori: Rev. Sci. Instrum. 73 (2002) 4028.

## **Détecteurs courbes et déformables: nouveaux composants pour l'optique active et adaptative**

W. Jahn<sup>a</sup>, E. Hugot<sup>b</sup>, M. Ferrari<sup>b</sup>, J.-F. Sauvage<sup>c</sup> et T. Fusco<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Aix-Marseille Université, CNRS, Laboratoire d'Astrophysique de Marseille, France

<sup>b</sup>LAM - Laboratoire d'Astrophysique de Marseille, Pôle de l'Étoile Site de Château-Gombert, 38, rue Frédéric Joliot-Curie, 13388 Marseille, France

<sup>c</sup>ONERA, 29 avenue de la Division Leclerc, 92322 Chatillon, France  
wilfried.jahn@lam.fr

Nous présentons de nouvelles fonctionnalités et applications en imagerie active et adaptative, offertes par la possibilité de courber les détecteurs et de contrôler leurs déformations

## **FAME: un prototype de miroir freeform actif, nouveau composant pour les systèmes actifs et adaptatifs**

E. Hugot<sup>a</sup>, M. Ferrari<sup>a</sup> et S. Lemared<sup>b</sup>

<sup>a</sup>LAM - Laboratoire d'Astrophysique de Marseille, Pôle de l'Étoile Site de Château-Gombert, 38, rue Frédéric Joliot-Curie, 13388 Marseille, France

<sup>b</sup>Aix Marseille université, CNRS, Laboratoire d'Astrophysique de Marseille, 38 rue F. Joliot Curie, 13388 Marseille, France  
emmanuel.hugot@lam.fr

Nous présentons les premières performances d'un miroir freeform actif à 24 actionneurs, ouvert à F/2, réalisé avec le LAM (Fr), ASTRON (NL), et UK-ATC (UK).

## **Les miroirs déformables à actionneurs magnétiques Alpao : applications, performances et développements.**

B. Charlet

Alpao, 345, rue Lavoisier, 38330 Montbonnot, France

bertrand.charlet@alpao.fr

Afin d'améliorer leur résultats, les applications de l'optique adaptative nécessitent des performances toujours plus importantes pour les miroirs déformables. C'est pourquoi Alpao, dont la technologie est basée sur un actionnement magnétique du miroir, maximise son effort dans le développement technologique. Une course plus importante, un temps de réponse minimum, des solutions OEM sont maintenant proposés. Cela permet de choisir les performances les plus adaptées en fonction de l'application envisagée. De plus, des nouveaux développements notamment pour augmenter le nombre d'actionneur sont en cours. Nous montrerons ici des résultats obtenus grâce à nos miroirs déformables suivies des nouveaux développements qui ont permis l'acquisition de ces images. Puis la future génération de DM Alpao sera présentée.

## Optique adaptative pour les futurs télescopes de 30-40 mètres de diamètre.

J.-L. Beuzit

Université de Grenoble Alpes, Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble, 38000 Grenoble, France  
jean-luc.beuzit@obs.ujf-grenoble.fr

Les progrès significatifs réalisés durant les 15 dernières années dans le domaine de l'optique adaptative pour l'astronomie ont porté cette technique d'observation à un niveau de maturité permettant aujourd'hui d'obtenir de manière routinière des résultats astrophysiques de tout premier plan, que ce soit en imagerie à haut contraste (détection et caractérisation de planètes extrasolaires et de disques circumstellaires) ou en imagerie grand champ (étude d'amas stellaires, de populations galactiques, etc.). La prochaine étape consiste maintenant à développer et à mettre en oeuvre de tels systèmes sur la future génération de très grands télescopes, de 30 à 40 mètres de diamètre, et notamment sur l'Extremely Large Telescope Européen (E-ELT) dont le déploiement a été récemment approuvé par les États membres de l'European Southern Observatory (ESO), pour une mise en service prévue à l'horizon 2025. Les objectifs scientifiques ambitieux de ces futurs télescopes se traduisent par une augmentation de la complexité des systèmes d'optique adaptative destinés à équiper aussi bien les télescopes eux-mêmes que leurs instruments focaux, ce qui exigera le développement de nouveaux composants, mais aussi l'élaboration de nouveaux concepts système, de nouvelles stratégies de contrôle, de nouvelles méthodes de reconstruction de données, etc. Nous présentons les principaux développements en cours pour la première génération d'instruments de l'E-ELT.

## L'OPTIQUE ADAPTATIVE AU SERVICE DES GRANDS TELESCOPES TERRESTRES

**N. Moussaoui<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Faculté de Physique, USTHB, BP N° 32 Al-Alia Bab Ezzouar, Alger, Algérie*

### RESUME

Les grands télescopes terrestres (ou télescopes géants) dédiés à l'observation astronomique à partir du sol, dans le domaine optique, sont entrain de retrouver toutes leurs capacités grâce à l'apport des systèmes d'Optique Adaptative (OA). Une utilisation optimale de ces systèmes d'OA nécessite des étoiles de références suffisamment brillantes se trouvant dans le champ de vision de ces télescopes. Le nombre des étoiles « naturelles » susceptibles de jouer ce rôle ne permet pas une bonne couverture du ciel observable à partir du sol. Une solution alternative est de recourir à des étoiles « artificielles ». Ces dernières sont connues sous le nom « Laser Guide Stars » (LGSs). Elles sont générées par l'interaction Laser-particules.

Un intérêt particulier est accordé aux étoiles artificielles produites par l'interaction du faisceau laser avec les atomes de sodium mésosphérique.

**MOTS CLES :** *Optique Adaptative, Astronomie*

# PSF reconstruction for LGS MOAO systems

O. Martin<sup>\*,1</sup>, C. Correia<sup>1</sup>, É. Gendron<sup>2</sup>, G. Rousset<sup>2</sup>

<sup>1</sup> : LAM, 38 rue F. Joliot-Curie, 13013 Marseille

<sup>2</sup> : LESIA, 5 place Jules Janssen, 92190, Meudon

## ABSTRACT

These works concern the technical pathfinder of MO-SAIC, CANARY, the mixed NGS/LGS MOAO system that provides, since 2010, a large amount of required information to prepare the future MOS on ELTs. In the context of galaxies survey with MOSAIC, we have developed a PSF reconstruction algorithm dedicated to MOAO systems. Such tools are mandatory to get accurately the science photometry, and deconvolve science images from the AO PSF to increase the Encircled Energy. We propose then to illustrate statistically our PSF reconstruction algorithm, dedicated to CANARY, from data sets acquired on-sky. Contrary to existing techniques, in MOAO we do not have any measurements of the phase residue. The MOAO PSF-R problem required thus specific methods to be solved. In using system telemetry and a MMSE approach, we illustrate we are able to get the reconstructed PSF with less than 1% of error on the Strehl Ratio.

## 1 Science context

Point Spread Function Reconstruction (PSF-R) is a post-processing required technique to improve the scientific exploitation of science images. Basically, at the Adaptive Optics (AO) system focal plane, we have the convolution between the science object and the instrument PSF. The knowledge of this PSF is thus required to get accurate characteristics on photometry and astrometry of the science source. Moreover, PSF-R may be involved for Integral Field Spectrograph (IFS) for gathering more flux in a given field of view.

In the context of MOSAIC, the future Multi-object Spectrograph (MOS) proposed for the E-ELT ([3]) for primordial galaxies formation and evolution, we propose to revisit the actual PSF-R method dedicated to Multi-Object Adaptive Optics (MOAO) systems. Such a technique has been successfully demonstrated on-sky thanks to the technical pathfinder CANARY ([6]).

In 2013, we have acquired on-sky data during the phase B configuration ([5]). CANARY was operating using four Rayleigh Laser Guide Stars (LGS) Wave Front

Sensor (WFS) and three Natural Guide Stars (NGS) WFS, off by less than a minute from the axis.

We propose to describe our method to reconstruct the PSF using the system telemetry in a MOAO case. We then illustrate statistically the performance of our method on data acquired in September 2013.

## 2 PSF-R method

### 2.1 OTF decomposition

The Optical Transfer Function (OTF) delivered from a AO system is commonly derived as a multiplication between the telescope OTF,  $OTF_{Tel+stat}$  and an AO OTF characterizing the correction performance of the system ([7]). This later OTF is then split into a *parallel part*,  $OTF_{\epsilon_{\parallel}}$ , i.e. every spatial frequencies on which the system has operated, and an *orthogonal part*,  $OTF_{\epsilon_{\perp}}$  that gathers all the spatial frequencies above the DM cut-off frequency. The OTF at the science camera location,  $OTF_{\epsilon}$ , can be written as follows :

$$OTF_{\epsilon} = OTF_{Tel+stat} \times OTF_{\epsilon_{\perp}} \times OTF_{\epsilon_{\parallel}}. \quad (1)$$

The quantity  $OTF_{Tel+stat}$  is derived from the pupil function and static modes. They come from Non Common Path Aberrations (NCPA) calibrated using a phase diversity algorithm ([2]), and from quasi static aberrations from telescope and derotator.

The  $OTF_{\epsilon_{\perp}}$  designs the fitting error of CANARY : the system is only able to compensate low spatial frequency below  $1/2d$ , the DM cut-off frequency, with  $d$  the DM pitch. This OTF is readily computed from the atmospheric phase Wiener spectrum.

The challenge we have in MOAO is to be able to estimate  $OTF_{\epsilon_{\parallel}}$  without measurements of the phase residue delivered by the system. To do so, we propose to consider the *RTC-based method* : it consists in estimating using a MMSE approach the residual phase from the system telemetry (DM commands, WFS measurements on uncompensated phase, system matrices).

\*olivier.martin@lam.fr

## 2.2 RTC-based method

The quantity  $\text{OTF}_{\varepsilon_{\parallel}}(\rho/\lambda)$  is derived from the average residual parallel phase Structure Function (SF)  $\bar{D}_{\phi_{\varepsilon_{\parallel}}}$  by :

$$\text{OTF}_{\varepsilon_{\parallel}}(\rho/\lambda) = e^{-0.5 \times \bar{D}_{\phi_{\varepsilon_{\parallel}}}(\rho)}, \quad (2)$$

where the SF results from the following sum :

$$\bar{D}_{\phi_{\varepsilon_{\parallel}}}(\rho) = \sum_i^n \sum_j^n \Sigma_{\varepsilon_{\parallel}\varepsilon_{\parallel}}(i, j) U_{ij}(\rho), \quad (3)$$

where the  $U_{ij}$  functions are defined in [7] and  $n$  is the number of modes, here the number of DM actuators. The actual problem to be solved is to determine the modal covariance matrix  $\Sigma_{\varepsilon_{\parallel}\varepsilon_{\parallel}}$ . If we were working on a SCAO system, it would be enough to get the WFS measurements and manage the noise and aliasing, it was done by Veran for the PUEO system.

We then estimate the residual phase using a MMSE approach. We have acquired mixed NGS/LGS measurements of the uncompensated phase in different directions. We note  $\mathbf{a}_{\parallel}^{\text{off}}$  the concatenation of modal projections of these measurements.

If note  $\mathbf{R}$  the modal MMSE reconstructor of the on-axis uncompensated phase. See [4] to know exactly how to get  $\mathbf{R}$ . It is computed from analytic covariance matrices that have been fitted over measurements using the Learn&Apply algorithm ([8]). The quantity  $\mathbf{R}\mathbf{a}_{\parallel}^{\text{off}}$  is thus the MMSE estimation of the on-axis modal phase, without AO compensation.

To get the residual phase, frame by frame, we subtract from  $\mathbf{R}\mathbf{a}_{\parallel}^{\text{off}}$  the DM modes, called  $\mathbf{m}_{\text{DM}}$ , that have been applied during the observation :

$$\hat{\varepsilon}_{\parallel} = \mathbf{R}\mathbf{a}_{\parallel}^{\text{off}} - \mathbf{m}_{\text{DM}}. \quad (4)$$

However, the MMSE reconstruction comes with a *topographic error*. Without measurements of the on-axis phase, we can not determine this error frame by frame, but we are able to compute analytically the covariance matrix of this error ([1]). We note it  $\Sigma_{ee}$  and it depends on the reconstructor  $\mathbf{R}$  and turbulence characteristics ( $C_n^2(h)$  profile,  $L_0(h)$  profile, problem geometry).

The required matrix  $\Sigma_{\varepsilon_{\parallel}\varepsilon_{\parallel}}$  in Eq. 3 can be thus derived by follows :

$$\Sigma_{\varepsilon_{\parallel}\varepsilon_{\parallel}} = \langle \hat{\varepsilon}_{\parallel} \hat{\varepsilon}_{\parallel}^t \rangle + \Sigma_{ee}, \quad (5)$$

## 3 Results

We have processed about a thousands of data sets acquired by CANARY in September 2013. The system was actually in phase B configuration ([5]) and included three off-axis 7x7 Shack Hartmann (SH) NGS WFS, four 7x7

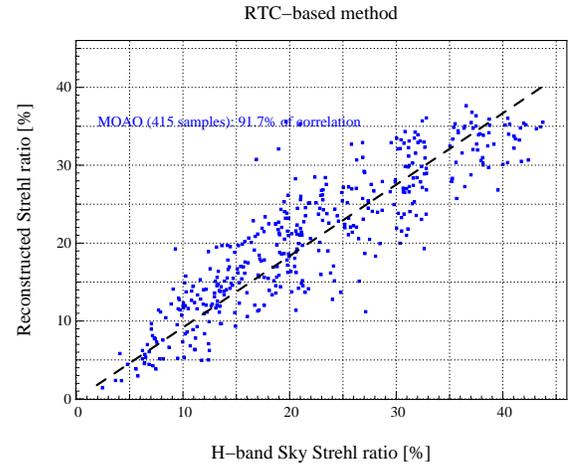


Figure 2: H-band Reconstructed Strehl ratio versus sky Strehl ratio for the RTC-based method. The dashed line results from linear regression of reconstructed SR on sky ones.

SH Rayleigh LGS WFS, focused at 21 km, and one on-axis 7x7 SH WFS. This later was used to close the loop in SCAO MOAO and for calibration purpose.

In Fig. 1, we present a comparison between a sky PSF, acquired on September 13th night, in NGS/LGS MOAO configuration. We got 0.5" of seeing at 500 nm, with 66% of turbulence below 1 km, 9.0 m for the outer scale and 6.1 m/s for the wind speed. In terms of SR, we have 23.8% of SR on reconstructed PSF against 24.0% on the sky PSF. On the residue, we notice a homogeneous error over the PSF core and static aberrations above the DM cut-off frequency (290 mas). These residue are particularly due to a lack of calibration (NCPA and DM modes), that have been replaced by analytic expressions. It means we have flexibility to improve the RTC-based method.

To confirm this results, we have processed several hundred of data sets acquired in September 2013. In Fig. 2, we report the H-band Strehl ratio (SR) determined on reconstructed PSF as function of the sky one, and the linear regression between them. On 415 samples, acquired over different observation conditions, we get about 92% of correlation. Considering we are able to improve this method in getting required calibrations, we expect to reach better performance.

## 4 Conclusions

We have discussed a PSF reconstruction method dedicated to MOAO systems. Using system telemetry, we are able to estimate the residual phase in any directions, and then the residual OTF. In a particular data set acquired by CANARY in September 2013, we reconstruct 23.8% of Strehl ratio against 24.0% on-sky. The residue comes majorly from static aberrations that can not be

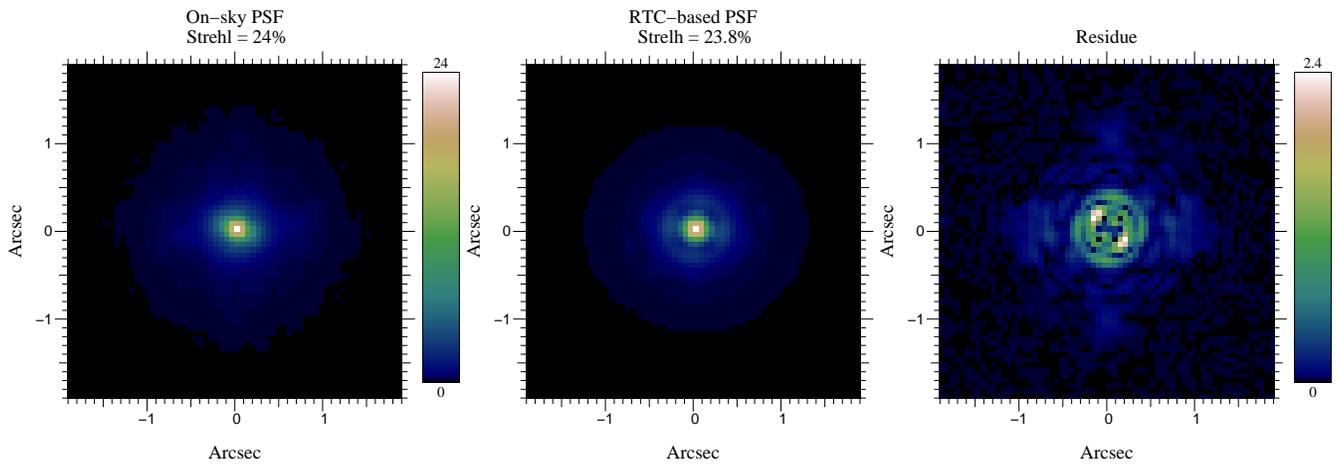


Figure 1: **Left:** H-band sky PSF. **Middle:** H-band reconstructed PSF using the RTC-based method. **Right:** Residue of the correction.

properly included because a lack of calibration. On more than 400 samples, we get 92% of correlation between the reconstructed SR and the sky SR.

Such a PSF-R method is available for MOAO systems. It provides an efficient tool for future MOS on ELT, equipped with MOAO system, to evaluate photometry and astrometry characteristics of science sources, and deconvolving science images from PSF system to increase our angular resolution.

## References

- [1] E. Gendron, C. Morel, J. Osborn, O. Martin, D. Gratadour, F. Vidal, M. Le Louarn, and G. Rousset. *Robustness of tomographic reconstructors versus real atmospheric profiles in the ELT perspective*, volume 9148 of *Proc. SPIE*, page 4. Aug. 2014.
- [2] D. Gratadour, E. Gendron, and G. Rousset. Practical issues with phase diversity for NCPA compensation resolved on the CANARY demonstrator. In S. Esposito and L. Fini, editors, *Proceedings of the Third AO4ELT Conference.*, Dec. 2013.
- [3] F. Hammer, B. Barbuy, J. G. Cuby, L. Kaper, S. Morris, C. J. Evans, P. Jagourel, G. Dalton, P. Rees, M. Puech, M. Rodrigues, D. Pearson, and K. Disseau. *MOSAIC at the E-ELT: A multi-object spectrograph for astrophysics, IGM and cosmology*, volume 9147 of *Proc. SPIE*, page 27. Aug. 2014.
- [4] O. Martin, É. Gendron, T. Morris, A. Basden, Z. Hubert, D. Gratadour, J. Osborn, F. Vidal, F. Chemla, G. Rousset, and R. Myers. *Detailed analysis of the Canary on-sky results at the WHT using Rayleigh laser guide stars*, volume 9148 of *Proc. SPIE*, page 91482N. July 2014.
- [5] T. Morris, E. Gendron, A. Basden, O. Martin, J. Osborn, D. Henry, Z. Hubert, G. Sivo, D. Gratadour, F. Chemla, A. Sevin, M. Cohen, E. Younger, F. Vidal, R. Wilson, T. Butterley, U. Bitenc, A. Reeves, N. Bharmal, H.-F. Raynaud, C. Kulcsar, J.-M. Conan, J.-M. Huet, D. Perret, C. Dickson, D. Atkinson, T. Bailie, A. Longmore, S. Todd, G. Talbot, S. Morris, G. Rousset, and R. Myers. *CANARY phase B: on-sky open-loop tomographic LGS AO results*, volume 9148 of *Proc. SPIE*, page 1. July 2014.
- [6] R. M. Myers, Z. Hubert, T. J. Morris, E. Gendron, N. A. Dipper, A. Kellerer, S. J. Goodsell, G. Rousset, E. Younger, M. Marteau, A. G. Basden, F. Chemla, C. D. Guzman, T. Fusco, D. Geng, B. Le Roux, M. A. Harrison, A. J. Longmore, L. K. Young, F. Vidal, and A. H. Greenaway. *CANARY: the on-sky NGS/LGS MOAO demonstrator for EAGLE*, volume 7015 of *Proc. SPIE*. July 2008.
- [7] J.-P. Veran, F. Rigaut, H. Maitre, and D. Rouan. Estimation of the adaptive optics long-exposure point-spread function using control loop data. *Journal of the Optical Society of America A*, 14:3057–3069, Nov. 1997.
- [8] F. Vidal, E. Gendron, and G. Rousset. Tomography approach for multi-object adaptive optics. *JOSA A*, 27:A253–A264, Nov. 2010.

## APPROCHE PSEUDO-ANALYTIQUE POUR SIMULER L'OA À DEUX ÉTAGES DU SPECTROGRAPHE MULTI-OBJET E-ELT/MOSAIC

Carine MOREL<sup>1</sup>, Eric GENDRON<sup>1</sup>, Gérard ROUSSET<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Observatoire de Paris, LESIA, CNRS, Univ. Paris Diderot, UPMC, 92190 MEUDON, France

carine.morel@obspm.fr

### RÉSUMÉ

Nous montrons ici comment nous avons développé une approche pseudo-analytique pour modéliser le système d'optique adaptative à deux étages de l'instrument E-ELT/MOSAIC.

**MOTS-CLEFS :** *optique adaptative ; tomographie ; E-ELT ; MMSE ;*

### 1. INTRODUCTION

Pour estimer les performances d'un système MOAO (optique adaptative multi-objet) de type woofertweeter, nous utilisons une approche pseudo-analytique développée précédemment pour un miroir déformable (DM) unique et fondée sur le calcul de la matrice de covariance de l'erreur tomographique [1] que nous avons adapté au cas d'un système à deux étapes de correction. Nous présentons ici deux méthodes différentes : la première est plus approximative mais aussi plus rapide et modélise les deux DM comme un unique miroir à hauts ordres. La seconde méthode, plus précise mais plus lourde, simule l'erreur sur chacun des deux miroirs distinctement.

### 2. MOSAIC : UN SYSTÈME COMPLEXE

MOSAIC[2] est le futur spectrographe multi-objets de l'E-ELT. Afin de permettre d'observer simultanément plusieurs galaxies lointaines et peu lumineuses à haute résolution angulaire en proche infra-rouge, il sera équipé de 10 à 20 canaux scientifiques comprenant chacun un DM réalisant une correction tomographique dédiée à sa direction d'observation. Chacun de ses miroirs devra travailler de concert avec le DM du télescope qui effectuera une compensation de la couche au sol. Pour mesurer la déformation du front d'onde, le système est équipé de nombreux analyseurs de front d'onde hors-axe : 6 pour des étoiles guides laser (LGS) et de 1 à 5 pour les étoiles naturelles (NGS) disponibles dans le champ.

#### 2.1 Le DM du télescope : M4

L'E-ELT dispose de son propre miroir, appelé M4, qui travaille en boucle fermée et réalise une correction globale de la couche au sol (GLAO) dans tout le champ d'observation. Sa loi de commande est indépendante de celle des miroirs secondaires de MOSAIC :

$$\vec{v}_4 = -D_4^\dagger R_{\text{ground}} \vec{m} = -M_4 \vec{m} \quad (1)$$

où  $\vec{v}_4$  est le vecteur des tensions de M4 et  $\vec{m}$  le vecteur des mesures de tous les analyseurs hors-axe.  $D_4^\dagger$  est la matrice de commande étalonnée du miroir M4 et  $R_{\text{ground}}$  le reconstruteur GLAO. Plusieurs solutions sont possibles pour  $R_{\text{ground}}$ . Dans la suite, on a choisi d'utiliser un reconstruteur tomographique calculé comme indiqué ci-dessous avec un profil turbulent ne comprenant qu'une couche au sol.

#### 2.2 Reconstruteur tomographique

Le reconstruteur tomographique  $R$  est de type MMSE. Il est déterminé de sorte à minimiser la norme  $\|\vec{t} - R\vec{m}\|^2$  où  $\vec{t}$  est le vecteur des pseudo-mesures d'un analyseur fictif placé sur l'axe (appelé TS pour Truth Sensor) et  $\vec{m}$  est le vecteur des mesures de tous les analyseurs hors-axe. Il vaut :

$$R = C_{tm} C_{mm}^{-1} \quad (2)$$

où  $C_{mm}$  est la matrice de covariance des mesures des analyseurs hors-axe et  $C_{tm}$  celle entre les mesures du TS et celles des analyseurs hors-axe.

### 2.3 Les miroirs MOAO

Le travail d'un miroir MOAO de MOSAIC consiste à corriger la turbulence dans une certaine direction du champ et donc à compléter le travail de M4. Il réalise pour cela une correction correspondant à la différence entre la GLAO de M4 et le contrôle tomographique.

$$\vec{v}_0 = -D_0^\dagger(R - D_4M_4)\vec{m} = -M_0\vec{m} \quad (3)$$

où  $D_0^\dagger$  est la matrice de commande du miroir MOAO pour la direction du champ considéré, R comme défini dans Eq. (2),  $D_4$  la matrice d'interaction du miroir M4 et  $M_4$  comme définie dans Eq. (1).

## 3. ERREUR TOMOGRAPHIQUE

### 3.1 Méthode 1 : projection sur les pseudo-mesures du TS, avec un unique DM global

Cette première méthode suppose que l'erreur résiduelle du front d'onde peut être décrite par un unique DM avec le même nombre d'actionneurs que celui qui en a le plus entre M4 et les secondaires. L'erreur tomographique s'écrit alors :

$$\vec{e} = \vec{t} - D_4M_4\vec{m} - D_0M_0\vec{m} = \vec{t} - L\vec{m} \quad (4)$$

où  $D_0$  est la matrice d'interaction du miroir MOAO. La matrice de covariance de l'erreur vaut :

$$C_{ee} = C_{tt} - C_{tm}L^t - LC_{tm}^t + LC_{mm}L^t \quad (5)$$

Comme on simule l'erreur sur un unique DM global, la matrice de covariance des tensions est :

$$C_{vv} = D_H^\dagger C_{ee} D_H^{\dagger t} \quad (6)$$

où  $D_H^\dagger$  est soit  $D_4^\dagger$ , soit  $D_0^\dagger$ , selon le miroir qui a le plus grand nombre d'actionneurs.

### 3.2 Méthode 2 : projection dans l'espace des phases sur les deux DM

Cette seconde méthode utilise l'erreur projetée sur les phases, plutôt que sur les mesures du TS.

$$\vec{e}_\phi = \vec{\phi} - F_4M_4\vec{m} - F_0M_0\vec{m} \quad (7)$$

$$= \vec{\phi} - F_0D_0^\dagger R\vec{m} - (F_4M_4 - F_0D_0^\dagger D_4M_4)\vec{m} \quad (8)$$

où  $\vec{\phi}$  est la phase dans la direction du TS.  $F_4$  et  $F_0$  sont les fonctions d'influence des miroirs M4 et MOAO. La première partie  $\vec{\phi} - F_0D_0^\dagger R\vec{m}$  de Eq. (8) correspond à l'erreur tomographique pure, et la seconde partie  $-(F_4M_4 - F_0D_0^\dagger D_4M_4)\vec{m}$  correspond à l'erreur résiduelle de compensation du travail du miroir M4 par le miroir MOAO.

On considère ensuite que l'erreur de fitting (contribution des hauts ordres non accessibles par un DM) est déterminée par le nombre d'actionneurs du miroir MOAO et qu'on ne l'inclue pas dans l'erreur tomographique. Cela nous permet de remplacer la phase  $\vec{\phi}$  par un contrôle fictif sur le miroir MOAO directement lié aux mesures du TS :  $F_0D_0^\dagger \vec{t}$ . Finalement, on peut calculer les matrices de covariances des tensions pour chacun des deux miroirs et pour le terme croisé :

$$C_{vv00} = D_0^\dagger C_{tt} D_0^{\dagger t} - D_0^\dagger C_{tm} M_0^t - M_0 C_{tm}^t D_0^{\dagger t} + M_0 C_{mm} M_0^t \quad (9)$$

$$C_{vv44} = M_4 C_{mm} M_4^t \quad (10)$$

$$C_{vv04} = -D_0^\dagger C_{tm} M_4^t + M_0 C_{mm} M_4^t \quad (11)$$

### 3.3 Reconstruction de la fonction d'étalement de point (PSF en anglais)

La reconstruction de la PSF se fait à partir des matrices de covariances des tensions suivant la méthode explicitée dans Gendron et al. (2016) [1]. Dans le cas de la méthode 1 (cf §3.1), on peut appliquer directement cet algorithme alors que pour la méthode 2 (cf §3.2), on détermine la fonction de structure de la phase résiduelle pour chacune des matrices de covariances des tensions des équations Eq. (9, 10, 11) avant de les sommer, en prenant en compte celle du terme croisé deux fois (pour  $C_{vv_{04}}$  et  $C_{vv_{40}} = C_{vv_{04}}^t$ ).

## 4. RÉSULTATS

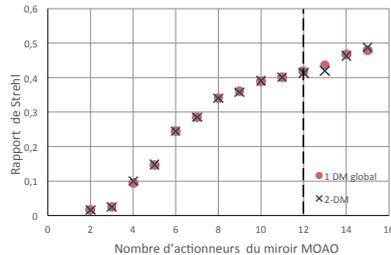


FIGURE 1: Rapports de Strehl calculés pour différents nombres d'actionneurs pour le miroir MOAO (dans un diamètre). Le miroir M4 a ici 12 actionneurs sur son diamètre. Les ronds : méthode 1 (cf §3.1); les croix : méthode 2 (cf §3.2).

Les deux méthodes produisent des rapports de Strehl similaires au pourcent près. Comme dans le cadre des ELT, les matrices de covariances utilisées (Eq. 5 et Eq. 9, 10, 11) ont un grand nombre d'éléments (près de 8 milliards pour 10 analyseurs de 78x78 sous-pupilles), ce résultat est très intéressant : il nous permet d'utiliser la méthode 1, nettement moins coûteuse en temps de calcul.

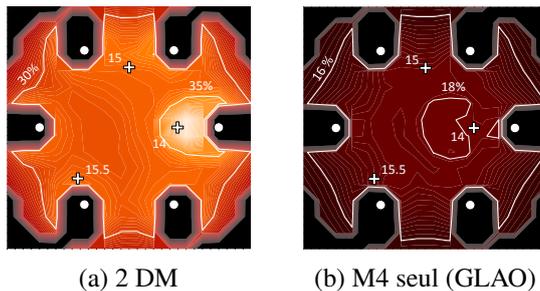


FIGURE 2: Cartes d'Énergie Encadrée (EE) dans 160 mas pour un champ de 10x10 arcmin avec un miroir MOAO de 64x64 actionneurs et un miroir M4 de 79x79 actionneurs, en bande H avec 6 LGS et 3 NGS de magnitude 14, 15 et 15.5.

Les deux simulations numériques de la Figure 2 montrent les performances de l'OA de MOSAIC : la première (Fig. 2a) est réalisée pour un miroir MOAO de 64x64 actionneurs et la seconde (Fig. 2b) prend en compte uniquement la compensation de la couche au sol par M4. Les cartes correspondent à une grille de 16x16 points où les PSF et l'EE ont été calculées avec notre méthode. Cela montre que le miroir MOAO est nécessaire pour atteindre une EE de 30% dans une grande partie du champ de l'instrument.

## CONCLUSION

Nous avons développé deux méthodes différentes pour calculer l'erreur tomographique et montré qu'elles produisent des résultats très similaires, nous permettant d'utiliser la méthode la plus rapide pour simuler MOSAIC. L'étape suivante consistera à comparer les performances prédites par ce modèle à celles obtenues sur le ciel par le démonstrateur de MOAO, Canary [3].

## RÉFÉRENCES

- [1] Gendron, É., et al., "A novel fast and accurate pseudo-analytical simulation approach for MOAO," in [Adaptive Optics Systems IV], *Proc. SPIE* **9148**, 91486L (Aug. 2014).
- [2] Hammer, F., et al., "MOSAIC at the E-ELT : A multi-object spectrograph for astrophysics, IGM and cosmology," in [Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy V], *Proc. SPIE* **9147**, 914727 (Aug. 2014).
- [3] Gendron, E., et al., "MOAO first on-sky demonstration with CANARY," *A&A* **529**, L2 (May 2011).

## CONTROLE COHERENT SPATIOTEMPOREL DE LA LUMIERE DANS LES MILIEUX MULTI-DIFFUSANT

Mickael Mounaix<sup>1</sup>, Daria Andreoli<sup>1,2</sup>, Hugo Defienne<sup>1</sup>, Giorgio Volpe<sup>1,3</sup>, Ori Katz<sup>4</sup>, Samuel Grésillon<sup>2</sup>, Sylvain Gigan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Kastler Brossel, ENS-PSL Research University, CNRS, UPMC-Sorbonne universités, Collège de France ; 24 rue Lhomond, F-75005 Paris, France

<sup>2</sup> ESPCI ParisTech, PSL Research University, CNRS, Institut Langevin, 1 rue Jussieu, F-75005, Paris, France

<sup>3</sup> Department of Chemistry, University College London, 20 Gordon Street, London WC1H 0AJ, UK

<sup>4</sup> Department of Applied Physics, The Selim and Rachel Benin School of Computer Science and Engineering, The Hebrew University of Jerusalem, Jerusalem 9190401, Israel

[mickael.mounaix@lkb.ens.fr](mailto:mickael.mounaix@lkb.ens.fr)

### RÉSUMÉ

Les milieux diffusants sont souvent perçus comme un obstacle pour l'imagerie optique, où l'information optique semble irrémédiablement perdue à cause de la diffusion multiple. En mesurant la matrice de transmission multi spectrale (MSTM en anglais) d'un milieu multi-diffusant, nous pouvons retrouver la relation complexe mais linéaire entre le champ incident et le champ en sortie d'un milieu diffusant, en fonction de la longueur d'onde. A l'aide de cette information, il est possible, en manipulant le front d'onde incident, de contrôler une impulsion ultra-brève en sortie du milieu diffusant, permettant ainsi de la focaliser spatialement et temporellement, mais également de manipuler à volonté et de manière déterministe le profil temporel.

**MOTS-CLEFS :** *contrôle de front d'onde ; milieu diffusant ; laser ultracourt*

### 1. INTRODUCTION

L'imagerie optique dans ou à travers les milieux diffusants est un problème extrêmement difficile. En effet, les informations d'amplitude et de phase sont mélangées par les événements multiples de diffusion, limitant ainsi la résolution, le contraste en profondeur. Avec une méthode similaire à l'optique adaptative, on peut utiliser un modulateur spatial de lumière (SLM) et une lumière cohérente, pour contrôler le motif de *speckle*, résultat de l'interférence multiple à la sortie d'un milieu fortement diffusant, en façonnant le front d'onde. Cette technique permet notamment de focaliser la lumière [1-2], ou bien d'imager à travers les milieux diffusants [3].

Cependant, si le laser génère une onde ultracourte de large bande spectrale, le signal transmis s'allonge temporellement. En effet, le milieu diffusant répond différemment pour les différentes composantes spectrales de l'impulsion [4-5].

Dans ce travail, nous allons présenter une technique permettant de mesurer la matrice de transmission multi spectrale du milieu, permettant ainsi de décrire complètement la propagation d'une impulsion courte à travers un milieu multi diffusant. Une fois la matrice apprise, avec les techniques de contrôle du front d'onde, il est alors possible de contrôler à la fois les degrés spatiaux et spectraux du champ en sortie du milieu avec le même SLM. On met pour cela à profit cette matrice pour, par exemple, choisir de focaliser différentes longueurs d'onde à différentes position [6]. Mais le contrôle des degrés de liberté spectraux permet également accès au profil temporel de l'impulsion en sortie. Ici, nous démontrons expérimentalement une recompression temporelle de l'impulsion proche de sa durée initiale après le milieu diffusant, permettant ainsi une excitation plus

efficace d'un processus biphotonique. Nous démontrons également le façonnage à volonté du profil temporel de l'impulsion courte en sortie du milieu diffusant. [7]

## 2. MATRICE DE TRANSMISSION MULTI SPECTRALE

Nous présentons l'analogie de la matrice de transmission optique pour une onde de large bande spectrale, la matrice de transmission multi spectrale. La dimension ajoutée par rapport à la matrice de transmission optique [2] est la dimension spectrale, permettant de caractériser la réponse en longueur d'onde du milieu à une impulsion large bande incidente [1,7]. La première étape correspond à la mesure de la largeur spectrale de corrélation du milieu ( $L_c$ ), donnant l'écart en longueur nécessaire pour que le *speckle* change. Le rapport entre la largeur de la bande spectrale de l'impulsion ( $\Delta\lambda$ ) et  $L_c$  indique le nombre de degrés de liberté spectraux (N), c'est à dire le nombre de matrice monochromatiques minimal à mesurer pour caractériser spatialement et spectralement la propagation d'une impulsion donnée. Ainsi, la MSTM à mesurer pour contrôler une impulsion est un tenseur à 3 dimensions comportant N matrices de transmission monochromatiques, séparées de  $L_c$  en longueur d'onde, chacune reliant le front d'onde incident et le champ en sortie du milieu diffusant.

Pour focaliser l'impulsion temporellement, il suffit alors de connaître la phase relative entre les différentes longueurs d'onde à une position en sortie, et de les égaliser afin de compenser la dispersion dans le milieu diffusant. Au delà de la compression temporelle, il est également envisageable de générer un profil temporel arbitraire, en connaissant la relation phase spectrale à imposer entre les longueurs d'onde de l'impulsion en sortie du milieu diffusant.

Afin de mettre en évidence une compression temporelle après passage dans le milieu diffusant, nous utiliserons une mesure interférométrique à corrélation croisée impliquant une ligne à retard, donnant accès directement au profil temporel de l'impulsion en sortie du milieu.

## 3. MONTAGE EXPERIMENTAL

Dans cette partie nous présentons le schéma expérimental (Fig 1). La source laser est un Ti:Saph, délivrant une impulsion de 100fs, correspondant à un signal de largeur spectrale 10nm (FWHM) centré sur 800nm. Celui-ci peut également fonctionner en laser monochromatique accordable. Le SLM (Cristaux liquides, Hammamatsu) est utilisé en réflexion, en 32x32 macropixels. Le milieu diffusant est une poudre d'oxyde de zinc, caractérisée par  $L_c=0.5\text{nm}$ . Avec  $\Delta\lambda=10\text{nm}$ , la MSTM doit donc être mesurée pour 20 matrices monochromatiques. La référence extérieure comporte une ligne à retard, permettant de jouer sur les interférences entre l'impulsion de référence et l'impulsion après passage dans le milieu diffusant, recombinaison avec un cube séparateur (BS).

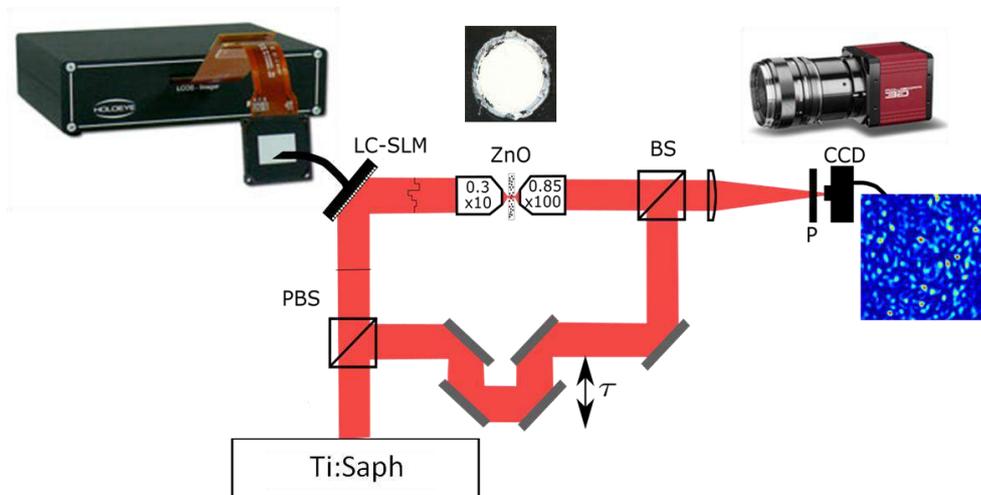


Fig1 : Schéma expérimental

## 4. RESULTATS EXPERIMENTAUX

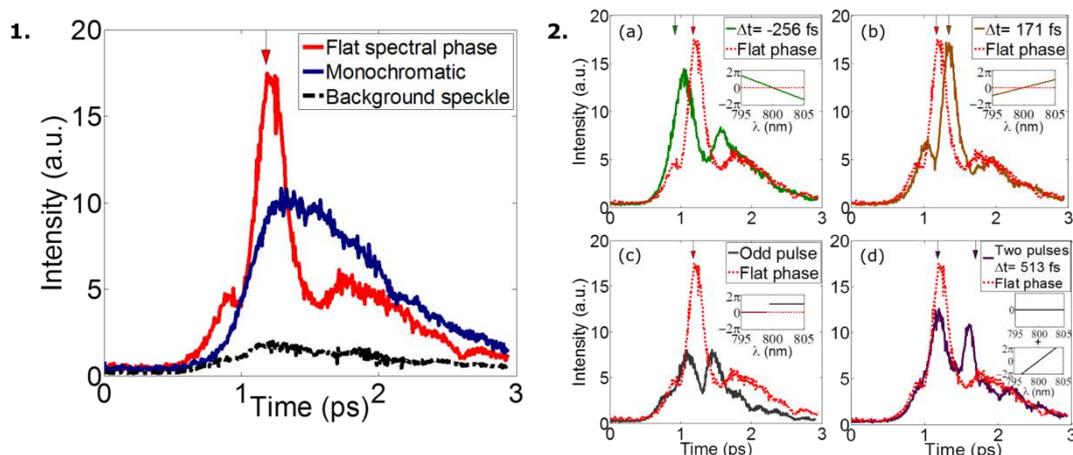


Fig. 2: (1) Une recompression spatio-temporelle ou spatiale uniquement à un temps donné et une position donnée sont achevées de manière déterministe. (2) Tout profil spectral peut être obtenu. Quatre exemples sont présentés, avec la phase spectrale correspondante insérée à côté de chaque profil (cf texte). (tiré de [7])

La Figure 2(1) illustre un résultat expérimental typique. Il est possible de comprimer de manière déterministe l'impulsion à sa durée temporelle initiale en imposant une relation de phase plate entre les longueurs d'onde. La compression spatiale est possible en focalisant uniquement une seule longueur d'onde de l'impulsion de sortie.

La MSTM permet également l'accès à un profil spectral plus sophistiqué, si la relation de phase spectrale est connue. Par exemple, la Figure 2(2) illustre un façonnage spectral de l'impulsion de sortie, en décalant avec un retard contrôlé le temps d'arrivée de l'impulsion en imposant une phase spectrale linéaire (de pente variable). Une impulsion dite « impaire » (utile en contrôle cohérent) peut également être générée en imposant un saut de phase de  $\pi$  au centre du spectre. Dernier exemple, deux impulsions avec un retard contrôlable sont également générées à la même position, ouvrant ainsi la voie à des expériences de type "pompe-sonde" en milieu diffusant.

## CONCLUSION

La MSTM permet ainsi de mesurer les degrés de libertés spatiaux et spectraux d'un milieu diffusant. Nous mettons cette information à profit pour comprimer l'onde spatialement et temporellement. Nous avons également montré qu'il est possible de générer un profil temporel arbitraire à partir de la relation connue de phase spectrale imposée en sortie du milieu.

La MSTM pourrait permettre l'excitation de nano-objets localisés en milieux diffusants, générant des signaux non linéaires. L'interaction entre le signal non linéaire et le milieu diffusant permet a priori d'étudier l'interaction lumière-matière dans les milieux complexes. Il est également envisageable d'utiliser la MSTM à des fins théoriques sur la propagation spatiale et spectrale d'une impulsion courte.

## RÉFÉRENCES

- [1] S. Popoff et al, *Physical Review Letters*, 2010
- [2] I. Vellekoop et al, *Optics Letters*, 2008
- [3] S. Popoff et al, *Nature Communications*, 2010.
- [4] J. Aulbach et al., *Physical Review Letters*, 2011.
- [5] D. McCabe et al., *Nature Communications*, 2011.
- [6] D. Andreoli et al., *Scientific reports*, 2015
- [7] M. Mounaix et al, arXiv preprint 1512.07753, 2015

## CONTRÔLE DE FRONT D'ONDE ULTRA RAPIDE POUR FOCALISER DANS DES MILIEUX DIFFUSANTS BIOLOGIQUES

**Baptiste Blochet<sup>1</sup>, David Martina<sup>1</sup>, Laurent Bourdieu<sup>2</sup>, Sylvain Gigan<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Laboratoire Kastler Brossel, ENS-PSL Research University, CNRS, UPMC-Sorbonne universités, Collège de France ; 24 rue Lhomond, F-75005 Paris, France*

<sup>2</sup> *Ecole Normale Supérieure, IBENS, CNRS UMR8197, INSERM U1024 46 rue d'Ulm, Paris, F-75005 France*

[baptiste.blochet@lkb.ens.fr](mailto:baptiste.blochet@lkb.ens.fr)

### RÉSUMÉ

La microscopie optique des tissus (OCT, microscopie de fluorescence, microscopie confocale) utilise les photons balistiques pour reconstruire l'information en profondeur. Récemment, des techniques de contrôle de front d'onde par des modulateurs spatiaux de lumière (SLM) ont été développées pour reconstruire l'information portée par les photons multi-diffusés et imager en régime de diffusion multiple. Le temps rapide de décorrélation des tissus vivants impose cependant l'utilisation de SLMs également rapides. Nous avons mis en œuvre un SLM à base de MEMS, ultra-rapide (10 kHz) et montré la focalisation à travers des solutions colloïdales diffusantes, ouvrant la perspective d'une imagerie optique multi-diffusante dans des tissus dynamiques.

**MOTS-CLEFS :** *Contrôle de front d'onde ; Imagerie médicale ; Microscopie*

### 1. INTRODUCTION

La lumière se propageant dans un tissu biologique est diffusée dans de nombreuses directions par les hétérogénéités du milieu. Dans le cas d'une lumière cohérente, la recombinaison des rayonnements diffusés crée une figure d'interférence complexe appelée speckle optique. Récemment, des méthodes de contrôle de front d'onde ont été développées afin de manipuler de manière cohérente l'intensité de la figure de speckle. Les expériences réalisées dans des milieux multi-diffusants comme des couches de peintures ont démontré la possibilité d'imager ou de focaliser à travers ces milieux [1,2]. Malheureusement, la dynamique naturelle des tissus vivants provoque une décorrélation très rapide de la figure de speckle. Ainsi, l'utilisation de ces méthodes dans les milieux biologiques est fortement dépendante de la vitesse de fonctionnement des dispositifs de modulation de front d'onde (SLM) et de détection (camera et électronique rapide) utilisés.

Dans notre travail, nous avons mis au point un dispositif rapide de contrôle de front d'onde pour manipuler la lumière dans des milieux complexes dynamiques. L'utilisation d'un SLM à micro-miroirs MEMS (Boston Kilo DM segmenté) associé à une électronique de contrôle actif à base de FPGA, permet de travailler à des fréquences proches de la vitesse maximum du SLM, suffisante pour les tissus vivants.

### 2. MONTAGE EXPÉRIMENTAL

Un schéma du dispositif expérimental est représenté sur la figure 1. Un MEMS contrôle la phase réfléchi de la lumière émise par un laser vert continu (532nm). Le faisceau est focalisé sur un échantillon diffusant par un objectif de microscope (4x/0.10). La lumière multi-diffusée transmise est collectée par un second objectif (20x/0.40) et permet d'imager le speckle transmis par l'échantillon, simultanément sur une caméra et un photomultiplicateur. Le MEMS est composé de

32x32 micromiroirs indépendants et peut fonctionner jusqu'à une cadence de 10 kHz. Chaque miroir contrôle localement la phase de notre onde entre 0 et  $2\pi$ . Le signal est détecté par le photomultiplicateur et la caméra EMCCD sert de contrôle. Une carte FPGA (module NI FlexRIO FPGA) interface le modulateur et le détecteur pour implémenter une boucle fermée avec un temps de réponse le plus bref possible.

Dans cette expérience, la lumière est focalisée à travers le milieu diffusant en utilisant un algorithme d'optimisation [3] utilisant comme métrique l'intensité mesurée par le photomultiplicateur.

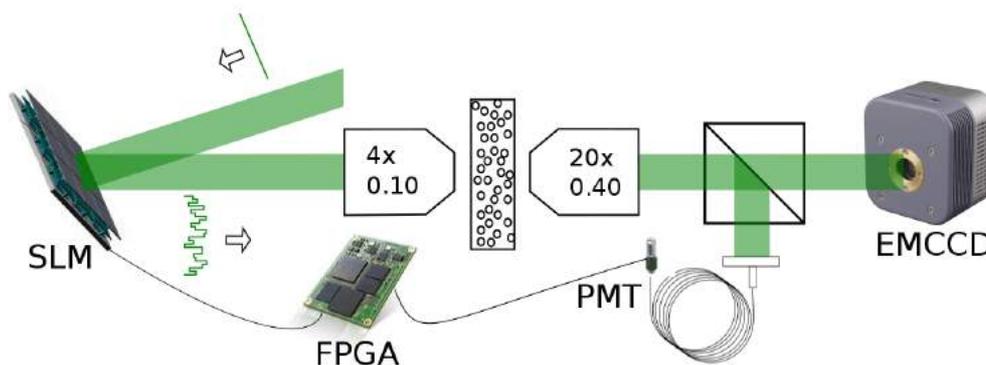


Fig 1 : Schéma du montage expérimental. Le faisceau laser à 532 nm est réfléchi sur un SLM. Le premier objectif (4x/0,10) permet de focaliser la lumière sur l'échantillon diffusant. Le deuxième objectif (20x/0,40) collecte la lumière diffusée et permet d'imager la face de sortie sur une caméra EMCCD et un photomultiplicateur (PMT). Une carte FPGA optimise le signal mesuré sur le PMT en contrôlant le masque de phase affiché sur le SLM. L'image obtenue sur la caméra EMCCD permet de visualiser et de contrôler le processus de focalisation.

### 3. DESCRIPTION DE L'ALGORITHME D'OPTIMISATION

L'algorithme actuel est en boucle fermée. Une itération comporte les étapes suivantes. Un mode spatial (mode de Hadamard) du MEMS est sélectionné. Il est déphasé de manière linéaire et continu entre 0 et  $2\pi$ . Trois valeurs sont acquises quand le déphasage appliqué est de 0,  $2\pi/3$  et  $4\pi/3$ . Le signal variable d'intensité lumineuse mesuré sur le PMT est interpolé pour en déterminer le maximum ainsi que la phase optimale correspondante pour le mode spatial considéré. Le masque optimisant la focalisation est ainsi construit en sommant les différents modes avec leur phase optimale puis est appliqué au MEMS avant le début de l'itération suivante.

En boucle fermée, l'optimisation d'un seul mode se fait à une cadence de 4,1 kHz, l'optimisation des 1024 modes de Hadamard que l'on peut réaliser avec ces miroirs prend 250 ms. A notre connaissance, il s'agit du système de contrôle de front d'onde par optimisation en boucle fermée le plus rapide pour les milieux diffusants.

### 4. RÉSULTATS

Les temps de décorrélation des tissus biologiques sont peu caractérisés et s'étendent a priori sur une grande gamme dynamique s'étendant au moins de 1ms à 1s. Pour tester l'efficacité de notre système à corriger de tel dynamique, plusieurs solutions colloïdales diffusantes ( $TiO_2$  dans du Glycerol) avec des temps de décorrélations de 5 ms à 1s ont été testées. Le gain de focalisation (intensité au point de focalisation sur intensité moyenne du speckle) s'étale de 5 pour les solutions les plus rapides à 200 pour les solutions statiques, il est proportionnel au rapport temps de décorrélation sur

temps d'optimisation d'une base complète. Un exemple de focalisation à travers une solution décorrélatant en 200 ms est présenté sur la figure 2.

Une étude systématique de l'influence du temps de décorrélation sur le gain est en cours. La dynamique des solutions sera contrôlée en modifiant la température du système laissant les réglages optiques, l'échantillon et donc les propriétés de diffusion de la lumière constants.

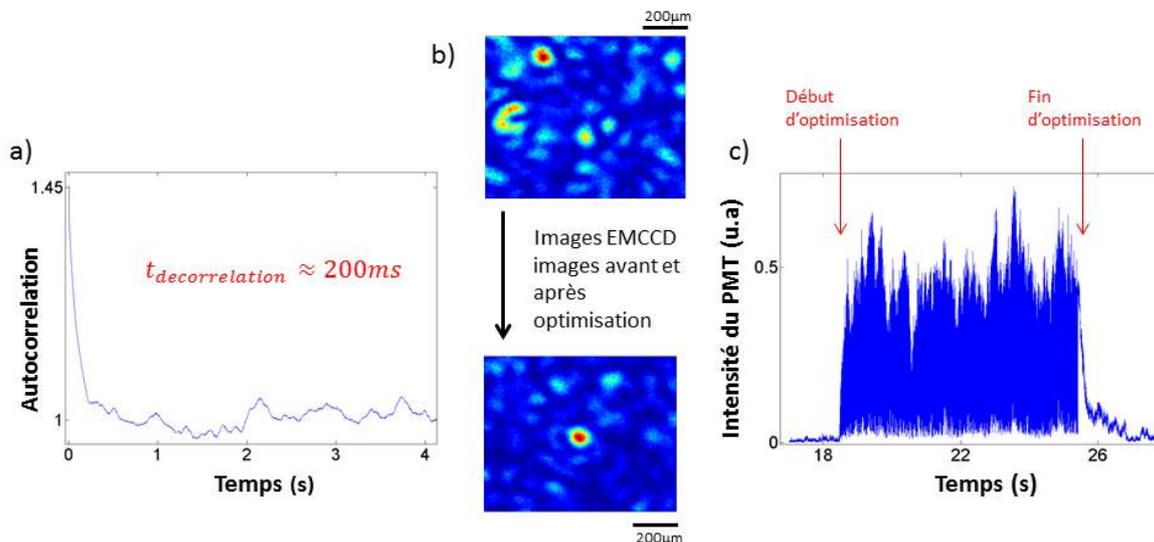


Fig. 2 : Résultats de focalisation à travers une solution colloïdale de  $TiO_2$ . a : Mesure de la fonction d'autocorrelation du speckle transmis, le temps de décorrelation est estimé à 200ms ; b : Image du speckle avant focalisation et après focalisation à la caméra EMCCD ; c : Intensité mesurée au PMT pendant le processus d'optimisation. Le gain (intensité au point de focalisation sur l'intensité moyenne du speckle) maximum obtenu est de 50 pour cet échantillon.

## CONCLUSION

Nous avons développé un système de contrôle de front d'onde (électronique rapide et SLM) limité seulement par la vitesse de translation des miroirs du SLM et non plus par des étapes de calcul. Nous avons montré que notre dispositif possède déjà les caractéristiques suffisantes (vitesse, nombre d'actuateurs) pour étudier des tissus biologiques.

Une fois l'étape de caractérisation franchie, nous pourrions étudier des tissus biologiques comme des tranches de cerveaux fraîches puis enfin aller vers l'imagerie in vivo. A long terme, nous couplerons ces techniques de contrôle avec l'imagerie non linéaire dans l'objectif d'obtenir des images à deux photons ultra-profonde du cerveau de rat.

## RÉFÉRENCES

- [1] Vellekoop, I. M., & Mosk, A. P. (2007). Focusing coherent light through opaque strongly scattering media. *Optics letters*, 32(16), 2309-2311.
- [2] Popoff, S. M., Lerosey, G., Carminati, R., Fink, M., Boccarda, A. C., & Gigan, S. (2010). Measuring the transmission matrix in optics: an approach to the study and control of light propagation in disordered media. *Physical review letters*, 104(10), 100601.
- [3] Vellekoop, I. M., & Mosk, A. P. (2008). Phase control algorithms for focusing light through turbid media. *Optics Communications*, 281(11), 3071-3080.

## STABILISATION AU NANOMETRE D'UN MICROSCOPE OPTIQUE PAR IMAGERIE DE PHASE QUANTITATIVE

Pierre Bon<sup>1</sup>, Jérôme Wenger<sup>2</sup>, Sandrine Lévêque-Fort<sup>3</sup>

1 : Laboratoire Photonique Numérique et Nanosciences UMR CNRS 5298, IOGS, Bordeaux Univ. 33400 Talence, France

2 : Institut Fresnel, UMR CNRS 7249, CNRS, Aix Marseille Univ, Ecole Centrale Marseille, 13013 Marseille, France

3 : Institut des Sciences Moléculaires d'Orsay, UMR CNRS 8214, Paris-Sud Univ., Orsay 91405

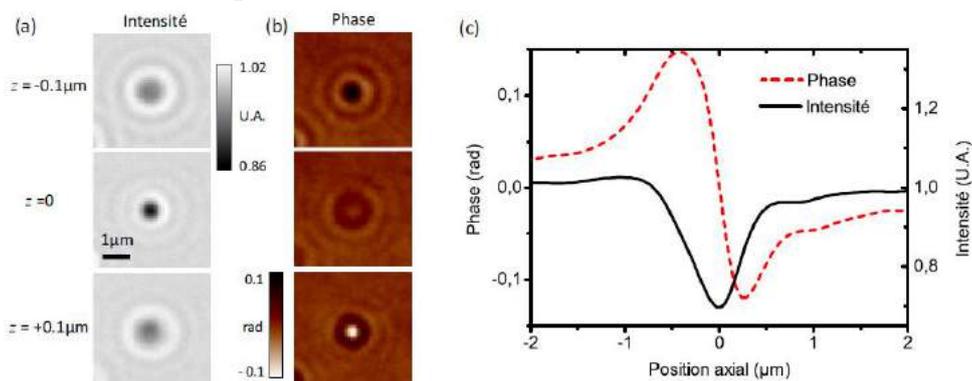
[pierre.bon@institutoptique.fr](mailto:pierre.bon@institutoptique.fr)

### RÉSUMÉ

L'imagerie de phase quantitative a été développée pour l'observation des objets semi-transparents. Je montrerai comment ce concept peut être transposé à l'imagerie de nano-objets absorbant et comment on peut obtenir une localisation de ces objets, en 3D, avec une précision nanométrique. Ce signal peut servir de signal d'asservissement pour stabiliser un système optique.

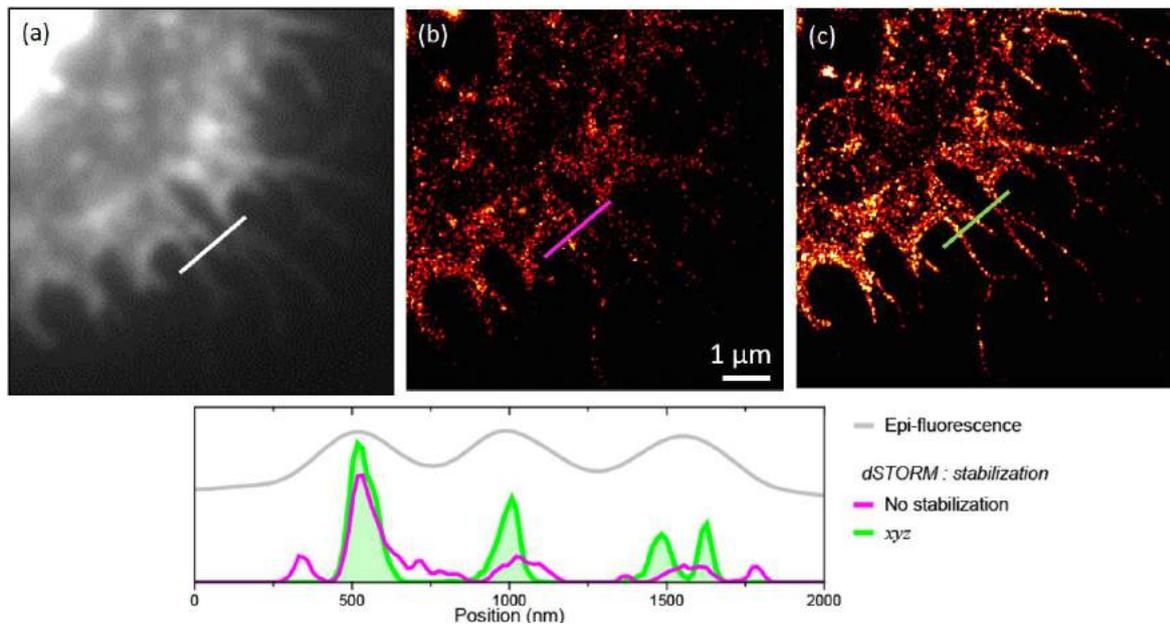
**MOTS-CLEFS :** Super-résolution, imagerie de phase, nano-objets, 3D

L'imagerie de phase quantitative a été d'abord développée pour l'imagerie en lumière blanche d'objets semi-transparents comme des cellules avec une source ne générant aucune tavelure [1]. Cependant, rien n'empêche d'observer avec le même montage optique des échantillons plus petits que la limite de diffraction comme des nanoparticules d'or par exemple [2]. Avec dans ce cas, l'information conjointe d'intensité et de phase peut servir à localiser en 3D les nanoparticules avec une précision sub-nanométrique.



**Figure 1 :** Imagerie de lumière blanche, en intensité (a) et en phase (b) de nanoparticules d'or (100 nm). (c) Dépendance en phase et intensité en fonction du positionnement axial de l'objet par rapport au plan de mise au point

Ce signal de positionnement (obtenue à 50Hz) a été utilisé dans un contexte de microscopie de super-résolution (de type dSTORM) pour stabiliser le microscope. L'imagerie de super-résolution permet d'obtenir théoriquement une résolution d'imagerie en dessous de la limite de diffraction, jusqu'à quelques dizaines de nanomètres. Cependant pour obtenir de telles précisions, il est nécessaire d'avoir un système d'acquisition qui soit stabilisé en 3D mieux que la précision de reconstruction en super-résolution et ce pendant la totalité de l'acquisition (jusqu'à 40 min).



**Figure 2 : Imagerie de fluorescence (Actine-phalloïdine-A647) conventionnelle (a), super-résolue dSTORM sans stabilisation (b), avec stabilisation 3D du microscope (c). 60x NA=1.49**

Grâce à notre technique, la stabilisation à haute cadence du microscope devient possible ce qui permet d'obtenir des reconstructions en imagerie de super-résolution meilleure que l'état de l'art [2].

#### REFERENCES

- [1] Bon *et al.* „Quadriwave lateral shearing interferometry for quantitative phase microscopy of living cells“, Opt. Express, 2009
- [2] Bon *et al.* „Three-dimensional nanometre localization of nanoparticles to enhance super-resolution microscopy“, Nat. Comm., 2015

# EXPLORATION 3D DE LA RETINE POUR LA CHIRURGIE LASER ET L'IMAGERIE

Pedro Baraçal de Mecê<sup>1,2</sup>, Serge Meimon<sup>1</sup>, Michel Paques<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ONERA/DOTA/HRA, 92332 Châtillon, France

<sup>2</sup> Quantel Medical, 63808 Cournon d'Auvergne, France

<sup>3</sup> Centre d'Investigation Clinique 1423, Hôpital des Quinze-Vingts, 75571, Paris, France

pedro.mece@onera.fr

## RÉSUMÉ

L'objectif de l'étude est de mettre au point un démonstrateur de laser ophtalmologique permettant cibler en profondeur les zones pathologiques et épargner les tissus sains environnants. Dans ce but, nous commençons pour étudier un système de stabilisation 2D de la rétine en temps réel (200Hz).

**MOTS-CLEFS :** *Optique Adaptative ; Optique Ophtalmique ; Photocoagulation au Laser .*

## 1. CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE

Les maladies des vaisseaux de la rétine, en particulier la rétinopathie diabétique, sont des causes majeures de perte de vision en France [1]. Le traitement habituel de ces oedèmes consiste à réaliser une photocoagulation (i.e. une cautérisation à l'aide d'un faisceau laser) dans la zone concernée de la rétine.

La cible thérapeutique du laser peut se situer à deux niveaux : l'épithélium pigmentaire rétinien ou les vaisseaux. Les zones à traiter sont d'une dimension typique en profondeur de l'ordre de  $60 \mu\text{m}$ , environnés de tissus sains à préserver (Figure 1). Dans les systèmes de photocoagulation laser actuels l'impact laser en profondeur est mal maîtrisée (dimension du faisceau en profondeur est typiquement de  $300 \mu\text{m}$ ), à cause des mouvements involontaires et les défauts optiques de l'oeil [2], ce qui entraîne un certain degré de lésion des tissus sains. De plus, les systèmes actuels ne permettent pas de visualiser en temps réel le volume des tissus atteints par la photocoagulation.

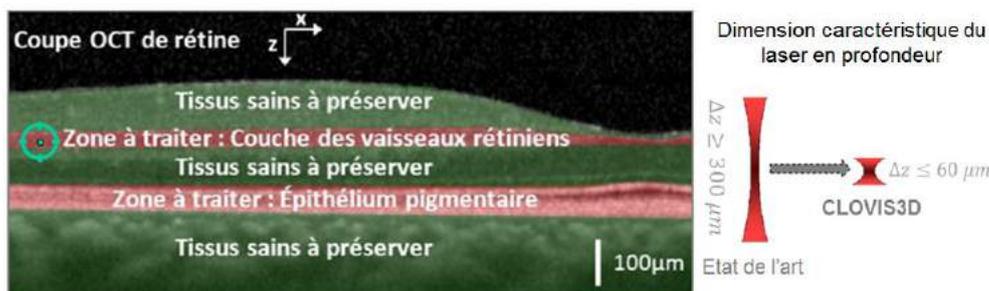


FIGURE 1 : Les zones à traiter sur la rétine et l'objectif du projet

## 2. OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

L'objectif du projet CLOVIS3D est de mettre au point un démonstrateur de laser ophtalmologique permettant 1) de cibler les zones pathologiques en profondeur tout en épargnant au maximum les tissus sains adjacents, 2) de visualiser l'effet du laser en profondeur (intégration d'une visualisation 3D en temps réel par OCT) pour guider le chirurgien, 3) de confiner (i.e. contrôle de la taille 3D du spot) et

4) de verrouiller la position 3D de l'impact laser de photocoagulation (Figure 2).

Nous présenterons les premiers résultats de la méthode choisie pour la stabilisation 2D de la rétine en temps réel, basée sur le recalage d'images par corrélation dans l'espace de Fourier. Nous présenterons aussi la problématique de détection des micro-saccades de l'oeil, afin de couper le laser thérapeutique et garder un confinement en profondeur de l'ordre de  $60\mu\text{m}$  assuré par l'Optique Adaptative.

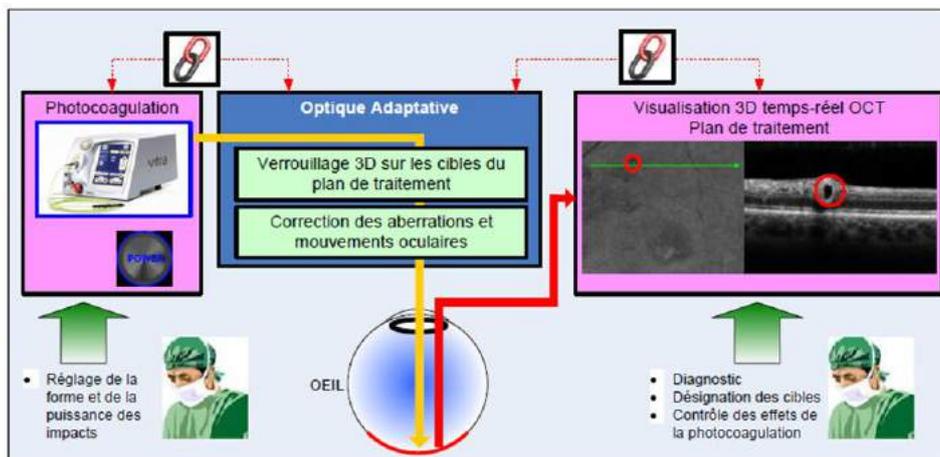


FIGURE 2 : Schéma fonctionnel simplifié du démonstrateur livré à l'issue du projet

## RÉFÉRENCES

- [1] OMS, <http://www.who.int/blindness/causes/priority/fr/index6.html>.
- [2] J. Jarosz, S. Meimon, J.M. Conan, M. Paques, "High temporal resolution ocular aberrometry with pupil tracking", *Proc. SPIE 8930, Ophthalmic Technologies XXIV, 89300D*, February 28, 2014.

## PARIS'S HIGH SPEED ADAPTIVE OPTICS FLOOD ILLUMINATION OPHTHALMOSCOPE

E.Gofas Salas<sup>1,2</sup>, M. Paques<sup>2</sup>, C. Petit<sup>1</sup>, L.Mugnier<sup>1</sup>, A.Bonnefois<sup>1</sup>, L.Blanco<sup>1</sup>, B.Fleury<sup>1</sup>,  
J.Montri<sup>1</sup>, F.Mendez<sup>1</sup> et S. Meimon<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> CIC 1423, INSERM, Quinze-Vingts Hospital, Paris, France

[elena.gofas@onera.fr](mailto:elena.gofas@onera.fr), [cyril.petit@onera.fr](mailto:cyril.petit@onera.fr), [serge.meimon@onera.fr](mailto:serge.meimon@onera.fr)

### SUMMARY

A high-speed wide field Flood Ophthalmoscope has been developed at the Quinze-Vingts for retinal imaging using the latest advances in adaptive optics in astronomical systems.[1] Apart from standard flood imaging, this platform will host several high performance innovative instruments, corresponding to different imaging modality (multiangle, multifocal, multispectral...).

**KEY-WORDS :** *Adaptive-optics; retinal imaging ;*

### 1. PURPOSE

We first investigate the potential of high-speed (>100Hz) wide field of view (>2°) retinal imaging with a high performance adaptive optics platform. Then, we study the development of new imaging modalities in the platform.

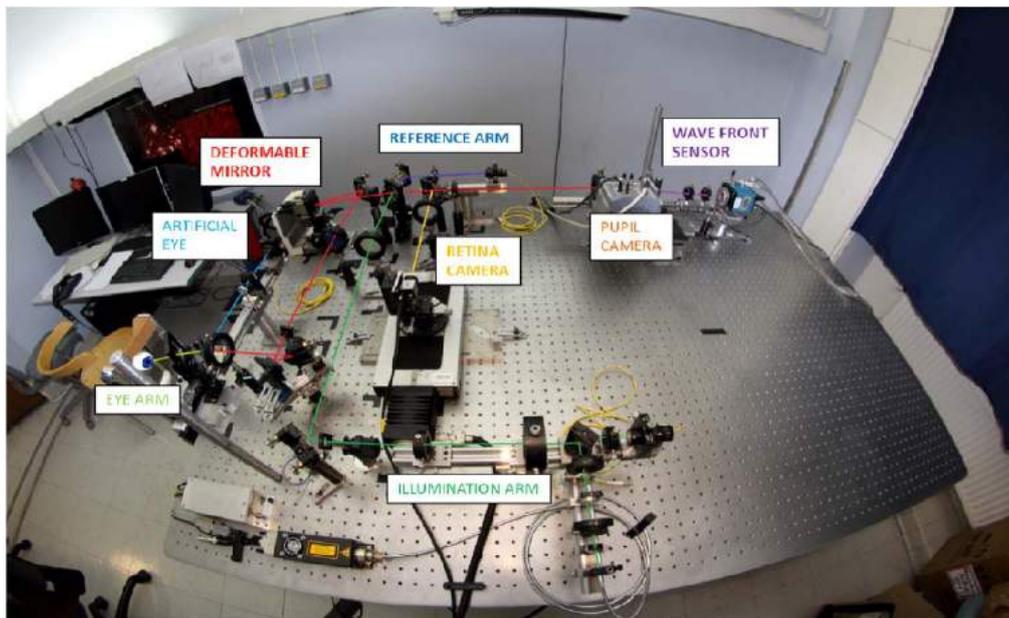


Fig. 1 : Picture of ECUROeil platform at Quinze-Vingt Ophtalmology hospital.

## 2. METHODS

PARIS (Paris Adaptive-optics Retinal Imaging & Surgery) group gathers physicians and physicists around an experimental adaptive optics (AO) platform, located inside Quinze-Vingt Ophthalmology hospital, with a direct access to patients. The AO platform consists in a custom made AO flood illumination ophthalmoscope, featuring a fast AO loop (faster than 60Hz), an 88 actuator deformable mirror (ALPAO) and a high speed SCMOS camera (Hamamatsu Orca Flash4-V2). It provides retinal video stacks acquired at more than 100Hz on 3° field of view with an 860nm SLD source (OMICRON).

Design was based on an original aberrometry campaign on 69 normal eyes from which an error budget analysis was made. In particular, the opportunity of stabilizing the pupil is discussed.[2] [3]

## 3. RESULTS

Continuous frame rates of up to 200 Hz were achieved for imaging a bit more than 2 deg retinal patches. The adaptive optics software (custom made LabView+IDL) made possible to image subjects without dilation or cycloplegia, revealing for instance the photoreceptor layer or blood flow in retinal vessels.

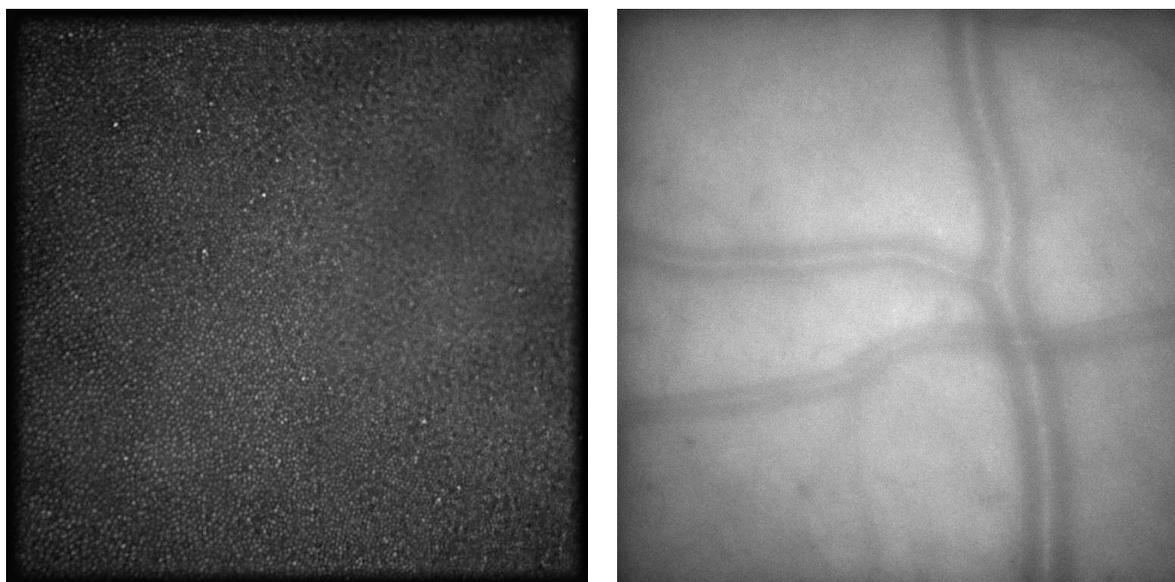


Fig. 2 : Images of the retinal photoreceptors (left) and retinal vessels (right) obtained with ECUROeil platform

### CONCLUSIONS

We demonstrated on several subjects high-speed (>100Hz) wide field of view (>2°) retinal imaging without dilation or cycloplegia. This high performance AO-platform will soon host innovative imaging instruments (starting in Spring 2016).

### RÉFÉRENCES

- [1] Serge Meimon, Jessica Jarosz, Jean-Marc Conan, Michel Paques, Nicolas Vedrenne, Bruno Fleury, and Joseph Montri. "What would be the best suited correction strategy in adaptive optics for retina imaging?" *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 56(7):5983-5983, 2015.
- [2] J.Jarosz, J.M. Conan, C.Petit, M.Paques, and S.Meimon. "High temporal resolution aberrometry on a 69 healthy eye population and implications on adaptive optics error budget." *Optical Society of America*, 2015.
- [3] S.Meimon, J.Jaroz, C.Petit, G.Chenegros, J.M. Conan, B.Sorrente, B.Emica, M. Paques, and K.Irsch. "Uncovering entrance pupil motion in adaptive optics retinal imaging." *Optical Society of America*, 2014.

## DESIGN OPTIQUE INNOVANT POUR L'IMAGERIE CORTICALE A GRAND CHAMP

W. Jahn<sup>1</sup>, J.-F. Sauvage<sup>1,2</sup>, T. Fusco<sup>1,2</sup>, F. Chavane<sup>3</sup>, S. Roux<sup>3,4</sup>, E. Hugot<sup>1</sup>, M. Ferrari<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Aix Marseille Université, CNRS, LAM (Laboratoire d'Astrophysique de Marseille) UMR 7326, 13388, Marseille, France

<sup>2</sup> Office National d'Etudes et de Recherches en Aérospatiales, 29 avenue de la Division Leclerc 92322 Châtillon, France

<sup>3</sup> Institut de Neurosciences de la Timone, Faculté de Médecine, 27, boulevard Jean Moulin 13005 Marseille - France

<sup>4</sup> VECT-HORUS S.A.S, Campus Santé Nord (Faculté de Médecine secteur Nord), CS80011 51, Bd Pierre Dramard, 13344 Marseille - France

wilfried.jahn@lam.fr

### RÉSUMÉ

L'imagerie corticale du petit animal (rat ou macaque) est un champ de recherche fondamentale très actuel des neurosciences. Ce type d'imagerie est limité par plusieurs aspects. Tout d'abord par la courbure physique du cortex, assimilable à une courbure de champ optique, qui rend une image nette seulement sur un champ de vue restreint. Ensuite, par l'évolution de cette courbure au cours de l'observation due à l'activité du sujet (battements du cœur, respiration). Enfin, par le changement de sujet et donc le changement de taille du cortex. Nous présentons dans cet article une approche optique innovante qui permet d'améliorer considérablement les capacités d'imagerie du cortex en utilisant les détecteurs à courbure variable.

**MOTS-CLEFS :** *optique innovante, détecteurs courbes, imagerie corticale (quatre au maximum)*

### 1. INTRODUCTION

### 2. DESCRIPTION DU PROBLEME OPTIQUE

### 3. SOLUTIONS A BASE DE DESIGN OPTIQUE PUR

### 4. SOLUTION OPTIMALE : PLAN FOCAL COURBE

### CONCLUSION

### RÉFÉRENCES

**N'oubliez pas, le fichier doit être soumis au format pdf exclusivement !**

**Vérifiez que tous les caractères spéciaux, e.g., les équations,  
sont bien convertis lors de la génération du fichier pdf.**

## IMAGERIE DE PHASE QUANTITATIVE EN MICROSCOPIE

Sherazade AKNOUN<sup>1</sup>, Julien SAVATIER<sup>2</sup>, Benoit WATTELLIER<sup>1</sup>, Serge MONNERET<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Phasics, Bâtiment Explorer, Parc Technologique, Route de l'Orme des Merisiers, 91190 Saint Aubin, France*

<sup>2</sup> *Aix Marseille Université, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel, UMR 7249, F-13013 Marseille, France*

bw@phasics.fr

### RÉSUMÉ

Nous présentons les applications en microscopie de l'imagerie de phase quantitative par analyse de surface d'onde.

**MOTS-CLEFS :** *microscopie, imagerie de phase quantitative, tomographie, polarisation*

L'imagerie de phase quantitative est un domaine récent de l'imagerie qui consiste à quantifier dans des conditions d'imagerie les retards optiques induits par la propagation de la lumière à travers des milieux inhomogènes. Elle est appliquée à la microscopie pour l'imagerie cellulaire et tissulaire.

La mesure de surface d'onde est une des techniques permettant ce type d'imagerie. En particulier, l'interférométrie à décalage quadrilatéral [1] a été adaptée avec succès à l'imagerie microscopique [2]. Son grand avantage est que pour réaliser des images de phase quantitatives, il suffit de remplacer une caméra d'imagerie standard par un analyseur de surface d'onde.

Au départ, nous nous sommes attachés à utiliser le système pour l'observation à fort contraste des cellules mais aussi pour la mesure de la masse sèche des cellules, à travers l'intégration du chemin optique sur la surface de la cellule. Nous avons également exploré des imageries plus complexes nécessitant la combinaison de plusieurs acquisitions.

Nous avons dans un premier temps étudié l'utilisation de notre technique en lumière incohérente spatialement et trouvé que ce mode d'utilisation permettait de créer du sectionnement optique. Nous avons ainsi conçu un tomographe permettant d'obtenir des coupes 3D en phase à la même résolution qu'en fluorescence [3].

Nous avons également montré qu'il est possible de combiner plusieurs acquisitions d'images de phase pour différentes polarisations afin de déduire les propriétés d'anisotropie des objets microscopiques. On crée alors un nouveau type de contraste, dit de retardance [4]. Ce contraste est alors spécifique des composants anisotropes et permet de détecter avec une grande sensibilité les fibres dans les cellules et les tissus.

Dans ce papier, nous présenterons des exemples des dernières avancées pour ces différentes applications.

### RÉFÉRENCES

- [1] Primot, J. and Guérineau, N. , "Extended Hartmann Test Based on the Pseudoguiding Property of a Hartmann Mask Completed by a Phase Chessboard," *Appl. Opt.* 39, 5715-5720 (2000)
- [2] P. Bon, G. Maucort, B. Wattellier, and S. Monneret, « Quadriwave lateral shearing interferometry for quantitative phase microscopy of living cells, » *Opt. Express* 17, pp. 13080-13094, Jul 2009.
- [3] Sherazade Aknoun, Pierre Bon, Julien Savatier, Benoit Wattellier, and Serge Monneret « Quantitative retardance imaging of biological samples using quadriwave lateral shearing interferometry, » *Optics Express*, Vol. 23, No. 12, pp. 16383-16406 (2015)
- [4] Pierre Bon, Sherazade Aknoun, Serge Monneret, and Benoit Wattellier, « Enhanced 3D spatial resolution in quantitative phase microscopy using spatially incoherent illumination, » *Opt. Express* 22, 8654-8671 (2014)

# APPROCHE MATRICIELLE DE LA PROPAGATION DES ONDES EN MILIEUX COMPLEXES : APPLICATION A L'IMAGERIE

**Amaury Badon, Geoffroy Lerosey, Albert Claude Boccara, Mathias Fink, Alexandre Aubry**

*Institut Langevin, ESPCI ParisTech, PSL Research University, CNRS UMR 7587, 1 rue Jussieu, 75005 Paris*

amaury.badon@espci.fr

## RÉSUMÉ

Nous présentons une approche matricielle pour imager à travers des milieux diffusants. Celle-ci consiste en la mesure d'une matrice de réflexion, puis la séparation des contributions de diffusion simple et multiple.

**MOTS-CLEFS :** *microscopie ; diffusion multiple ; aberrations ;*

## 1. INTRODUCTION

Les techniques d'imagerie conventionnelle reposent sur une propagation balistique de la lumière entre l'objet étudié et le système de mesure. Ce principe n'est plus vérifié lorsque des hétérogénéités présentes au sein de l'objet ou dans le milieu environnant entraînent la diffusion de la lumière. La force de cette diffusion est matérialisée par le libre parcours moyen de diffusion  $l_s$  qui correspond à la distance moyenne entre deux événements de diffusion. Au-delà de cette limite, la quantité de lumière balistique comparée à la lumière diffuse n'est plus suffisante pour l'obtention d'une image correcte de l'objet. Les techniques d'imagerie conventionnelle échouent ainsi à imager des tissus en profondeur, mais de nombreuses alternatives ont été proposées [1]. Parmi celles-ci, on peut citer la discrimination spatiale (imagerie confocale) ou temporelle (Tomographie à Cohérence Optique) de la lumière balistique par rapport à la lumière diffusée. Néanmoins, à l'heure actuelle même la technique la plus performante est limitée à environ  $6-7 l_s$ , soit environ 1 mm de profondeur dans les tissus biologiques. Inspirés par des travaux effectués en acoustique [2,3] ainsi que par le développement de techniques de contrôle de front d'onde [4], nous proposons ici une approche matricielle associée à une discrimination spatiale et temporelle afin de repousser cette limite.

## 2. APPROCHE MATRICIELLE DU PROPAGATEUR

Cette approche repose sur la mesure d'une matrice de réflexion  $R$  [5,6] résolue en temps (voir Fig. 1.a). Cette matrice est mesurée comme suit : un champ incident provenant d'un laser femto seconde et contrôlé par un modulateur spatial de lumière (SLM) illumine l'échantillon après avoir traversé l'objectif de microscope. Le champ rétrodiffusé correspondant est mesuré à l'aide d'une caméra CCD pour un temps de vol  $t$  correspondant à l'onde balistique grâce au bras de référence. Une transformée de Fourier spatiale permet ensuite d'obtenir ce champ dans un plan conjugué du plan focal du microscope. Ce champ obtenu forme une colonne de la matrice  $R$ . La matrice totale  $R$  est obtenue en reproduisant la procédure pour un nombre  $N$  d'illuminations incidentes, contenant ainsi les différentes réponses entre les points  $r_{in}$  et  $r_{out}$  du plan focal. Nous utilisons ici la base des ondes planes au niveau du SLM, ce qui correspond à une position donnée  $r_{in}$  dans le plan focal du microscope. A l'aide du SLM nous effectuons ainsi une procédure d'imagerie par balayage avec  $N$  le nombre de degrés spatiaux de liberté. Il est donné par  $N = (FOV/\delta)^2$ , avec FOV le champ de vue, et  $\delta$  le pas spatial utilisé.

Dans le cas de la diffusion simple la matrice  $R$  est diagonale, une image confocale peut alors être obtenue à partir des éléments diagonaux  $r_{in}=r_{out}$  ( cf figure 2.b ). Néanmoins en présence d'un milieu fortement diffusant, la matrice présente du signal sur tous les éléments. Il n'y a plus de relation simple reliant l'entrée et la sortie de notre matrice, celle-ci peut être statistiquement décrite par la théorie des matrices aléatoires. Dans ces conditions une image confocale ne permet pas de retrouver l'image de l'objet, le speckle n'a aucun lien apparent avec la réflectivité de l'objet.

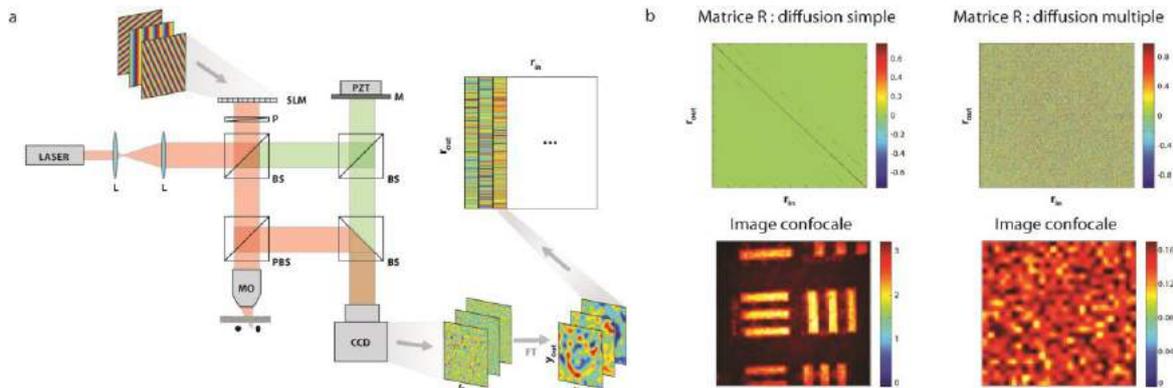


Fig. 1 : (a) Montage expérimental réalisé pour la mesure de la matrice de réflexion  $R$  résolue en temps. (b) Exemple de matrice de réflexion pour un cas de diffusion simple (diagonale) et de diffusion multiple avec les images confocales associées.

### 3. SEPARATION DIFFUSION SIMPLE / DIFFUSION MULTIPLE

Nous nous intéressons ici à la détection d'une bille de  $3 \mu\text{m}$  de diamètre à travers un milieu diffusant. Afin de retrouver l'image de notre objet nous devons séparer les contributions de diffusion simple et de diffusion multiple. Notre approche se présente alors en deux étapes : premièrement nous avons appliqué un filtre numérique qui permet de les séparer spatialement. Ce filtre numérique consiste en l'application d'un pinhole digital qui élimine toutes les contributions correspondant à  $r_{in} - r_{out} > l_{coh}$ , avec  $l_{coh}$  la taille du pinhole numérique. Cela revient à réaliser un microscope confocal digital [7]. La matrice filtrée résultante est donc recentrée autour de la diagonale ( Fig2.a ).

Puis afin de s'affranchir de la diffusion multiple résiduelle ainsi que des aberrations rencontrées lors de la traversée du milieu diffusant, nous avons appliqué la méthode D.O.R.T ( Décomposition de l'Opérateur de Retournement Temporel [8] ) dans le but de retrouver l'image de notre objet à travers le milieu diffusant. Cette opération consiste en une décomposition en valeurs singulières de la matrice de réflexion. Le spectre des valeurs singulières nous permet de détecter la cible car la valeur singulière associée est supérieure au continuum correspondant à la diffusion multiple. Celle-ci est d'ailleurs correctement prédite par la théorie des matrices aléatoires ( cf Fig. 2.b ).

Nous avons ainsi pu détecter avec succès une bille de  $3 \mu\text{m}$  de diamètre à travers un milieu diffusant d'épaisseur optique 12, ici composé de feuilles de papier fin. Dans ces conditions l'intensité balistique est atténuée d'un facteur  $e^{-24}$ , correspondant à un rapport d'intensité balistique sur l'intensité diffuse d'environ  $10^{-9}$ . Cela correspond à la détection d'un photon parmi 1 milliard. Fort de cette preuve de concept, nous nous sommes ensuite intéressés à imager des objets à travers des milieux diffusants réels, notamment des tissus biologiques.

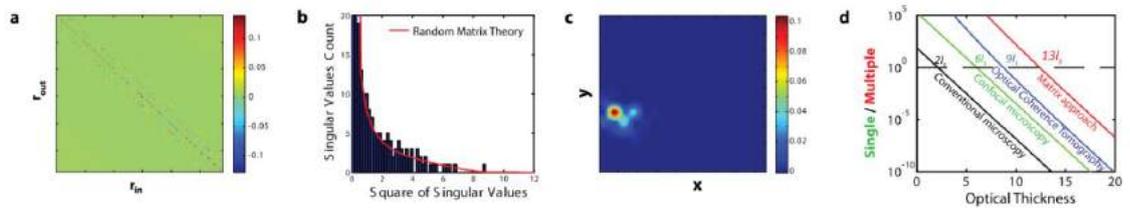


Fig. 2: (a) Matrice de réflexion filtrée. (b) Spectre des valeurs singulières associé à la matrice filtrée. (c) Image associée à la valeur singulière la plus élevée, nous retrouvons l'image de l'objet recherché. (d) Comparaison des performances théoriques des différentes techniques de détection.

#### 4. IMAGERIE A TRAVERS DES MILIEUX BIOLOGIQUES

Nous nous intéressons ensuite à l'imagerie d'une mire de résolution ( USAF 1951 ) à travers une tranche de foie de rat de  $700 \mu\text{m}$  d'épaisseur. Cela correspond à une épaisseur optique de 7-8. La diffusion dans les milieux biologiques étant principalement vers l'avant, la matrice  $R$  ne présente plus de signal sur toute la matrice, mais seulement sur la partie centrée autour de la diagonale. Ici nous imagons un objet étendu, lors de l'application de la méthode D.O.R.T, nous ne considérons plus seulement la 1ere valeur singulière, mais l'ensemble des valeurs singulières les plus élevées. Nous démontrons ici la possibilité d'appliquer notre technique pour réaliser de l'imagerie à travers des tissus biologiques épais.

#### CONCLUSION

Nos travaux montrent ici la pertinence d'adopter une approche matricielle pour décrire la propagation des ondes en milieux complexes. Nous avons pu caractériser les propriétés de la diffusion simple, de la diffusion multiple, et ainsi tirer profit de la mesure de la matrice de réflexion afin de réaliser de l'imagerie et de la détection. Cette approche a ensuite été appliquée à l'étude d'objets étendus à travers des milieux diffusants réels, démontrant l'applicabilité de cette technique.

#### REFERENCES

- [1] C. Dunsby, and P.M.W. French, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **36**, R207–R2, 2003
- [2] A. Aubry and A. Derode, *Phys. Rev. Lett* **102**, 084301, 2009
- [3] A. Aubry and A. Derode, *J. Appl. Phys* **106**, 044903, 2009
- [4] A. P. Mosk, A. Lagendijk, G. Lerosey, and M. Fink, *Nature Photon.* **6**, 283 (2012).
- [5] S. M. Popoff et al., *Phys. Rev. Lett* **104**, 100601, 2010
- [6] S. M. Popoff et al., *Phys. Rev. Lett* **107**, 263901, 2011
- [7] Goy, A. S., & Psaltis, D., *Optics Express*, **20**, 22720-22727, 2012
- [8] C. Prada and M. Fink, *Wave motion* **20**, 151, 1994
- [9] A Badon, D Li, G Lerosey, AC Boccara, M Fink, A Aubry, arXiv:1510.08613

## OPTIQUE ADAPTATIVE POUR L'IMAGERIE DE L'ACTIVITE NEURONALE DE LA SOURIS EVEILLEE

Dorian Champelovier<sup>1</sup>, Arnaud Malvache<sup>2</sup>, Rosa Cossart<sup>2</sup>, Hervé Rigneault<sup>1</sup>, Serge Monneret<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Aix-Marseille Université, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel UMR 7249, 13013 Marseille, France

<sup>2</sup> Institut de Neurobiologie de la Méditerranée, INSERM U901, BP13 13273 Marseille Cedex 09, France

serge.monneret@fresnel.fr

### RÉSUMÉ

Nous présentons un microscope prototype muni d'un système d'optique adaptative destiné à imager en temps réel l'activation d'un réseau de neurones situé en profondeur dans le gyrus denté de la souris. Pour cela, nous avons défini une métrique spécifique à notre application, pour l'évaluation de l'efficacité de la correction apportée. Avec les corrections apportées, la qualité des images est typiquement améliorée d'un facteur de 20%. Nous discutons aussi les tailles caractéristiques des zones d'observation pour lesquelles les corrections apportées sont valides.

**MOTS-CLEFS :** *microscopie à deux photons, neurosciences, gyrus denté*

### 1. INTRODUCTION - CONTEXTE

Ce travail se place dans le cadre de l'étude biologique de certaines formes d'épilepsies, à savoir l'épilepsie du lobe temporal, impliquant l'hippocampe. Les événements épileptiques sont caractérisés par des phénomènes d'hypersynchronisation du réseau neuronal, se traduisant par l'activation simultanée d'un très grand nombre des cellules de ce réseau, provoquant une vague d'excitation venant saturer l'hippocampe. Notre objectif est d'étudier ce phénomène d'hypersynchronisation, en imageant en temps réel l'activation de nombreux neurones, placés dans une région d'intérêt particulier. Plus précisément, nous souhaitons imager les neurones du gyrus denté, porte d'entrée de l'hippocampe, placée à environ 700  $\mu\text{m}$  de profondeur chez la souris (figure 1).

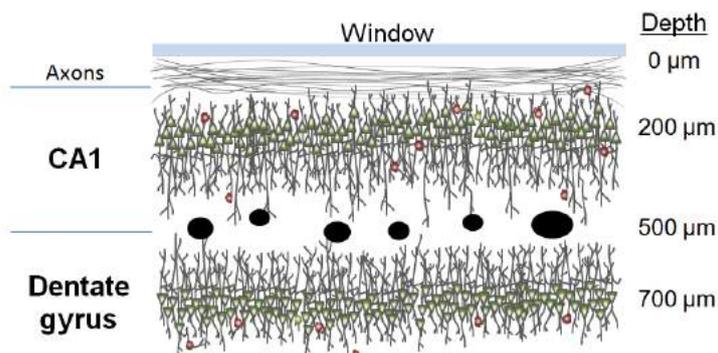


Fig. 1 : Structure de l'hippocampe, comprenant des couches successives de neurones, ainsi que des vaisseaux sanguins (dont les coupes sont représentées sous forme d'ellipses noires).

A de telles profondeurs, les conditions d'imagerie sont difficiles : il faut traverser un tissu biologique diffusant, qui est de plus constitué de zones successives aux propriétés optiques différentes. En conséquence, les images sont bruitées (diffusion) et de mauvaise résolution (génération d'aberrations optiques), permettant rarement l'observation de neurones individuels de

façon satisfaisante. L'optique adaptative, associée à la microscopie de fluorescence à balayage à deux photons, semble un bon choix pour imager un grand nombre de neurones simultanément et suivre leur activation en réseau.

## 2. OPTIQUE ADAPTATIVE POUR L'IMAGERIE DU GYRUS DENTÉ

Nous avons construit un microscope prototype spécifiquement destiné à répondre à la problématique biologique présentée ci-dessus. La fluorescence permet de bénéficier d'images très contrastées grâce au marquage calcique développé pour le suivi de l'activation neuronale (marquage GCaMP). L'activation de cette fluorescence dite « à deux photons » permet quant à elle d'obtenir un sectionnement optique en profondeur, ainsi qu'une meilleure pénétration à l'intérieur du cerveau. Les images obtenues sont issues d'un balayage d'un faisceau laser focalisé, sur la zone d'intérêt.

Toute la difficulté du travail consiste à tenter de compenser les dégradations des images obtenues dues à la « mauvaise » qualité optique du tissu cérébral. Si la diffusion semble pour l'instant difficile à contourner, il est possible de compenser les aberrations apportées par ce tissu inhomogène afin de restaurer des images de qualité suffisante pour l'observation de neurones individuels du gyrus denté. Mais contrairement à ce qui est utilisé en astronomie, nous n'avons pas la possibilité de mesurer la forme détériorée du front d'onde lors de l'excitation de la fluorescence, puisque cette excitation se produit dans la profondeur du cerveau.

La solution retenue consiste donc à placer un miroir déformable sur le trajet optique en amont du microscope, de façon à déformer au préalable le faisceau exciteur de la fluorescence, puis à identifier la forme optimale du front d'onde à appliquer pour maximiser le niveau de fluorescence local, et donc l'intensité des images obtenues. Il s'agit donc d'une procédure indirecte, sans mesure de front d'onde, impliquant un algorithme de recherche de la meilleure déformation du miroir, ainsi qu'une métrique de qualification de l'efficacité de l'excitation de la fluorescence.

## 3. TRAVAUX REALISES

Nous présenterons le montage expérimental mis en place, ainsi que la technique d'optimisation de la forme du miroir retenue, basée sur l'utilisation d'une base modale des modes de Zernike [1]. La métrique originale que nous avons définie pour optimiser la procédure adaptative sera présentée en détails. Enfin, nous évaluerons les caractéristiques principales des aberrations introduites par la traversée du cerveau jusqu'au gyrus denté, avec en particulier la dépendance spatiale de ces aberrations dans un champ de vue donné, déjà mise en évidence dans [2].

## CONCLUSION

Nous présenterons un travail essentiellement expérimental ayant conduit à définir puis construire un microscope prototype, pour imager le gyrus denté de la souris. Ces images permettent de suivre l'activité neuronale de dizaines de neurones simultanément, par microscopie de fluorescence à deux photons. Afin d'améliorer la qualité des images obtenues, nous avons mis en place une technique d'optique adaptative à partir d'un miroir déformable, d'un algorithme issu d'une base modale, et d'une métrique adaptée à l'imagerie de neurones. Les gains sont de l'ordre de 20% sur la qualité des images obtenues.

## RÉFÉRENCES

- [1] D. Débarre, E. J. Botcherby, T. Watanabe, S. Srinivas, M. J. Booth, and T. Wilson, "Image-based adaptive optics for two-photon microscopy", *Opt. Lett.*, 34, 2495-2497 (2009).
- [2] J. Zeng, P. Mahou, M-C Schanne-Klein, E. Beaufort and D. Débarre, "3D resolved mapping of optical aberrations in thick tissues", *Biom. Opt. Expr.* 3(8), 1898-1913 (2012).

## OPTIQUE ADAPTATIVE POUR L'OPTIMISATION DE LA FOCALISATION DE LASERS JUSQU'À F/1

Ivan DOUDET, Djamel BRAHMI, Benoit WATTELLIER<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Phasics, Bâtiment Explorer, Parc Technologique, Route de l'Orme des Merisiers, 91190 Saint Aubin, France

doudet@phasics.fr

### RÉSUMÉ

Nous présentons une boucle d'optique adaptative optimisant la focalisation de lasers ouverts jusqu'à  $f/1$  grâce à l'interférométrie à décalage quadrilatéral.

**MOTS-CLEFS :** *optique adaptative, surface d'onde, laser, grande ouverture*

### 1. INTRODUCTION

L'utilisation de boucles d'optiques adaptatives dans les installations lasers est maintenant très courante et il existe plusieurs solutions industrielles pour cette fonction optimisées pour les contraintes de ces installations. Cependant, il est souvent impossible de placer l'analyseur de surface d'onde après la parabole hors d'axe qui focalise le laser sur l'échantillon avec lequel il interagit. La solution retenue est donc de créer un faisceau de diagnostic grâce à un prélèvement de la lumière en amont de la parabole. On va ensuite commander le miroir déformable grâce à la mesure du front d'onde de ce faisceau de diagnostic.

Or, même si le plus grand soin est mis dans ce faisceau de diagnostic, la différence de chemin optique entre le vrai faisceau et celui du faisceau de diagnostic est généralement supérieure à la précision sur la tache focale finale. Notamment les aberrations introduites par l'alignement de la parabole dominent la différence entre les deux faisceaux. C'est pourquoi la mesure de front d'onde doit être étalonnée afin que la boucle d'optique adaptative converge vers un faisceau parfaitement sphérique en sortie de parabole.

Mesurer la tache focale au foyer d'une optique ouverture n'est pas simple dès lors qu'une optique de reprise est nécessaire. On n'est jamais complètement sûr si l'on mesure les aberrations de la parabole ou celles de l'optique de reprise. C'est encore plus complexe si l'on doit en mesurer le front d'onde. La solution la plus simple, et *a priori* la plus fiable, est de mesurer directement le front d'onde de l'onde sphérique après focalisation.

L'interférométrie à décalage quadrilatéral [1] est une technique de surface d'onde capable de mesurer directement des faisceaux ouverts jusqu'à mieux que  $f/1$ . C'est l'utilisation d'un réseau de diffraction pour échantillonner le front d'onde qui confère à cette technique cette propriété unique chez les analyseurs de surface d'onde.

Dans ce papier, nous allons montrer le principe de la boucle d'optique adaptative pour la caractérisation et la correction de faisceaux très ouverts. Plusieurs exemples de configurations expérimentales seront présentés.

### RÉFÉRENCES

[1] Primot, J. and Guérineau, N. , "Extended Hartmann Test Based on the Pseudoguiding Property of a Hartmann Mask Completed by a Phase Chessboard," Appl. Opt. 39, 5715-5720 (2000)

## MALLETTE PÉDAGOGIQUE POUR L'HOLOGRAPHIE : COMMENT FAIRE DES EXPÉRIENCES POUR L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR EN S'AFFRANCISSANT SIMPLEMENT DES VIBRATIONS PARASITES

A. Escarguel<sup>1</sup>, R. Baude<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire PIIM, UMR 7345 CNRS, case 322, Université d'Aix-Marseille, av. escadrille Normandie-Niemen, 13397 Marseille Cedex 20, France

alexandre.escarguel@univ-amu.fr

### RÉSUMÉ

L'holographie fait partie des expériences de base indispensables à toutes les filières d'optique. Elle a beaucoup d'applications et permet d'illustrer de nombreuses propriétés physiques des rayonnements cohérents. D'autre part, il est très valorisant pour un étudiant de réussir un hologramme, objet de curiosité qui garde toujours une petite part de « magie ». Cependant, il est d'habitude nécessaire d'utiliser un dispositif anti-vibratoire très coûteux pour réussir ce type d'expériences. Afin de pallier à ce problème, nous avons réalisé un outil pédagogique pour l'holographie monochrome en 2010 [1, 2, 3]. Très compact, tout le matériel nécessaire est contenu dans une petite mallette. Des expériences d'interférométrie double exposition, de réalisation de filtres « notch » ou de réseaux de diffraction peuvent être réalisés sur une simple table. Cet outil est actuellement utilisé dans plusieurs Masters/Licence de l'Université d'Aix-Marseille et est régulièrement prêté à des établissements du secondaire dans le cadre de leurs projets pédagogiques.

En 2015, nous avons développé une nouvelle version de cet outil, permettant de réaliser des hologrammes couleur plus grands et offrant la possibilité de faire plus d'expériences pour les enseignements en Licence ou Master et dans les écoles d'ingénieurs. L'outil permet aussi chaque année de réaliser des journées de formation continue des enseignants du secondaire et est très fréquemment utilisée pour des actions de diffusion de la culture scientifique.

Le stand permettra de réaliser des expériences d'holographie afin d'illustrer les possibilités de l'outil : multiplexage fréquentiel/angular, double hologramme par réflexion/transmission, filtre « notch », réseau de diffraction.

**MOTS-CLEFS :** *holographie ; interférence ; pédagogie ; travaux-pratiques*

### RÉFÉRENCES

- [1] T. Voslion, A. Escarguel, « *An easy teaching tool for holography* », Eur. J. Phys. 33 1803–1811 (2012)
- [2] Th. Voslion, A. Escarguel, " *An easy physics outreach and teaching tool for holography* ", International Symposium on Display Holography, MIT Media Lab, Cambridge Massachusetts USA, J. Phys.: Conf. Ser. 415 012001 (2012).
- [3] A. Escarguel, « *Upgrade of the pedagogic/popular science tool for holography: color holography* », 10 International Symposium on Display Holography, St Pétersbourg (2015)

**HOBIT : HYBRID OPTICAL BENCHES FOR INNOVATIVE TEACHING**

**Bruno Bousquet<sup>1</sup>, Lionel Canioni<sup>1</sup>, Jean-Paul Guillet<sup>1</sup>, Martin Hachet<sup>1</sup>, Stéphanie Fleck<sup>2</sup>,  
David Furio<sup>1</sup>, Benoit Coulais<sup>1</sup>, Jeremy Bergognat<sup>3</sup>,**

*<sup>1</sup>Université de Bordeaux, 351 cours de la Libération, 33405 Talence*

*<sup>2</sup>Université de Lorraine, Ecole Supérieure du Professorat et de l'Éducation - ESPE - Site de  
Metz/Mont, 57045 Metz*

*<sup>3</sup>Cohabit, IUT de Bordeaux, 15 rue Naudet CS102017, 33175 Gradignan*

[bruno.bousquet@u-bordeaux.fr](mailto:bruno.bousquet@u-bordeaux.fr)

**RÉSUMÉ**

HOBIT est un projet d'innovation pédagogique soutenu par le numérique pour l'enseignement de l'optique. La première déclinaison présentée ici est un simulateur d'un interféromètre de Michelson. Comparée à une approche purement numérique où l'interaction avec le système se fait au travers d'une interface clavier/souris, nous cherchons à mettre les apprenants en situation réelle d'expérimentation. Concrètement, l'opérateur manipule des répliques de composants optiques imprimés en 3D et équipées de capteurs électroniques. Ces composants sont reliés à la simulation numérique qui calcule en temps réel le résultat des interférences à afficher sur une surface de projection. Au delà de la simulation du phénomène observable dans la réalité, nous augmentons l'expérimentation par des soutiens pédagogiques projetés directement dans l'espace de travail (affichage du chemin de la lumière, état d'un composant, formule mathématique...). Cela a pour objectif de faciliter la mise en relation de notions théoriques avec l'expérimentation. Une expérimentation avec une centaine d'étudiants a été réalisée pendant 3 mois à l'IUT de Bordeaux et une évaluation très détaillée du dispositif a été conduite. Les premiers résultats mettent clairement en évidence les avantages du dispositif de réalité augmentée et ouvrent des perspectives en matière de transformation des pratiques d'enseignement par travaux pratiques en pédagogie du supérieur.

## LA TOMOGRAPHIE PAR COHERENCE OPTIQUE : UN PROJET EXPERIMENTAL

Gaël Latour<sup>1</sup>, Marie Godard<sup>2</sup>, Vincent Guillet<sup>3</sup>, Marion Jacquy<sup>4</sup>

<sup>1</sup> IMNC, Université Paris-Sud, CNRS, Université Paris-Saclay, Orsay, France

<sup>2</sup> CSNSM, Université Paris-Sud, CNRS, Université Paris-Saclay, Orsay, France

<sup>3</sup> IAS, Université Paris-Sud, CNRS, Université Paris-Saclay, Orsay, France

<sup>4</sup> LAC, CNRS, Université Paris-Sud, ENS Cchan, Université Paris-Saclay, Orsay, France

[gael.latour@u-psud.fr](mailto:gael.latour@u-psud.fr)

### RÉSUMÉ

Ce projet expérimental vise à monter, aligner et exploiter un dispositif de tomographie par cohérence optique afin d'obtenir des images tridimensionnelles avec une résolution micrométrique.

**MOTS-CLEFS :** *interféromètre de Michelson, OCT, microscopie tridimensionnelle*

Ce projet expérimental s'adresse à des étudiants de niveau master en physique (M1). L'objectif est de les familiariser expérimentalement avec les notions de cohérence temporelle en interférométrie et d'utiliser ensuite ces propriétés pour réaliser et caractériser un système d'imagerie tridimensionnelle possédant une résolution micrométrique : la tomographie par cohérence optique (OCT).

Les **objectifs pédagogiques** pour les étudiants sont :

- la maîtrise des concepts liés à l'interférométrie et en particulier la cohérence temporelle,
- l'apprentissage de la méthodologie liée aux réglages optiques et à l'imagerie : alignement, réglages, caractérisation.
- l'acquisition, le traitement des images et l'exploitation de données 3D.
- la prise d'autonomie face à un montage expérimental optique complexe.

L'**originalité de ce projet expérimental** réside dans :

- La réalisation d'un montage optique complet (alignement et réglages optiques) à partir de matériel optique utilisé en laboratoire. La finalité, concrète, nécessite d'avoir bien intégré les concepts liés à l'interférométrie en lumière blanche et à l'imagerie.
- Le format sur trois jours qui permet de confronter directement les étudiants aux problématiques expérimentales et de leur laisser du temps pour de la prise d'initiative.
- Le montage de 6 bancs optiques d'imagerie OCT afin d'accueillir un effectif de 12 étudiants simultanément, ce qui permet de bénéficier d'une dynamique de groupe.

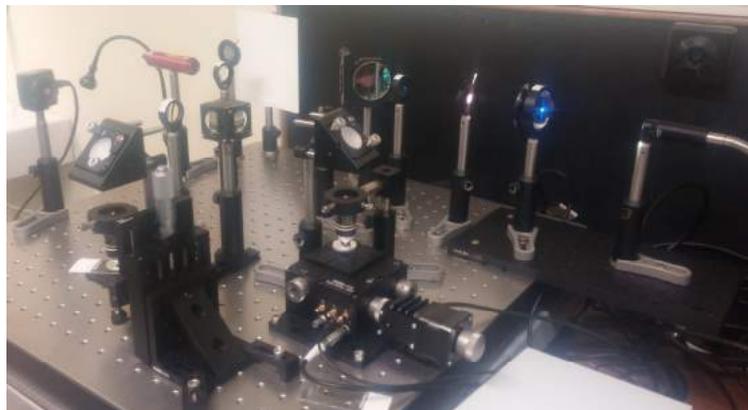


Fig. 1 : Dispositif d'imagerie OCT monté, aligné, caractérisé et exploité par les étudiants.

Ce projet a bénéficié des soutiens du Labex PALM, de l'Université Paris-Saclay, de l'Université Paris-Sud et de la société Thorlabs.

## VP2L : UN « SERIOUS GAME » EN REALITE VIRTUELLE 3D APPLIQUE A LA FORMATION AUX TECHNOLOGIES OPTIQUE ET LASER

L. Dutertre<sup>1</sup>, B. Fabre<sup>2</sup>, E. D'humière<sup>2</sup>, S. Petit<sup>2</sup>, D. Lyoen<sup>3</sup>, J. Dronval<sup>1</sup>, E. Boeri<sup>4</sup> and E. Cormier<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup> IDSC,

<sup>2</sup> CELIA Université de Bordeaux- CNRS-CEA-UMR 5107, 33405 Talence, France

<sup>3</sup> NOVO3D,

<sup>4</sup> PYLA,

[laurent.dutertre@idsc-group.com](mailto:laurent.dutertre@idsc-group.com), [baptiste.fabre@u-bordeaux.fr](mailto:baptiste.fabre@u-bordeaux.fr), [emmanuel.dhumieres@u-bordeaux.fr](mailto:emmanuel.dhumieres@u-bordeaux.fr),  
[stephane.petit@u-bordeaux.fr](mailto:stephane.petit@u-bordeaux.fr), [dlyoen@novo3d.fr](mailto:dlyoen@novo3d.fr), [julien.dronval@idsc-group.com](mailto:julien.dronval@idsc-group.com),  
[e.boeri@pyla-routedeslasers.com](mailto:e.boeri@pyla-routedeslasers.com), [e.cormier@pyla-routedeslasers.com](mailto:e.cormier@pyla-routedeslasers.com)

### RÉSUMÉ

Nous présentons un outil pédagogique pour l'enseignement de l'optique et du laser basé sur le concept de « serious game » dans un univers 3D virtuel.

**MOTS-CLEFS :** *Réalité virtuelle et augmentée, serious game, laboratoire virtuel, immersion*

Le développement récent de grandes infrastructures laser en Europe notamment associé à l'expansion du tissu économique local et national autour de l'optique, des lasers et de la photonique a déclenché une demande très forte en formation d'étudiant et de professionnels sur de très courtes durées. Dans ce contexte et pour répondre à cette demande, nous avons réfléchi à de nouvelles approches permettant de former des personnels à différents niveaux sur des connaissances et du savoir faire autour des lasers. De manière tout à fait indépendante, l'industrie du jeu investit fortement dans la technologie et le logiciel pour simuler des environnements 3D en temps réel avec un rendu et une fluidité extraordinaire. En partenariat avec des industriels du jeu et du graphisme, nous avons donc lancé le développement d'un outil de formation empruntant le concept de « serious game » ayant pour objectif d'immerger le stagiaire en formation dans un laboratoire d'optique totalement virtuel, grâce à un casque de réalité virtuelle. Dès lors il est présenté au stagiaire un ensemble de travaux pratiques lui permettant de s'entraîner à l'alignement de faisceaux, le réglage de télescope, la réalisation d'une cavité laser, la manipulation de la polarisation, ... De nombreuses informations sont à disposition dans l'univers virtuel sous forme de références, de mini tutoriaux filmés et de paramètres affichables en réalité augmentée.

Dans le Virtual Photonics Learning Lab (VP2L), l'utilisateur dispose d'éléments optiques qu'il doit assembler pour réaliser le système optique ou laser procurant les paramètres définis dans le cahier des charges de l'exercice. Le logiciel reproduit les véritables propriétés optiques de chaque élément afin de simuler un comportement virtuel aussi près de la réalité.

Cet outil de formation aux technologies optique et laser en réalité virtuelle représente :

1. une solution économique qui permettra un accès facilité à la mise en pratique dans tout type d'établissement, y compris ceux non équipés d'installations laser et/ou de personnel compétent pour son fonctionnement
2. une solution permettant de développer la formation à distance à tous les niveaux, notamment en formation continue pour les entreprises et les organismes de recherche français ou européens
3. une réelle innovation pédagogique, ouvrant sur des méthodes attractives pour les apprenants, plus intuitives pour aborder des concepts qui peuvent être complexes.



## UN ENSEMBLE POLYVALENT D'EXPÉRIENCES OPTIQUES DE DÉMONSTRATION

**Renaud Mathevet<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> LNCMI, UPR 3228, CNRS-INSU-UJF-UPS, Grenoble et Toulouse, France

renaud.mathevet@lncmi.cnrs.com

### RÉSUMÉ

Nous présentons une quinzaine d'expériences de démonstration en optique facilement reproductible et transportable. Elles permettent d'animer plusieurs types d'interventions à différents niveaux. Des manipulations sur les couleurs sont proposées au "jeune grand public", tandis que l'utilisation d'un spectromètre USB permet de démontrer aux plus grands les principes physiques des différentes sources lumineuses (incandescence, fluorescentes, LEDs, LASERS) et de les articuler avec les enjeux environnementaux. A destination des scolaires post-bac et des enseignants, cet ensemble est complété par des expériences plus fondamentales permettant d'aborder les principales propriétés de la lumière: interférences, diffraction et polarisation. Nous articulons le tout sous la forme originale d'une "conférence-manips" qui suit un fil historique pour montrer le rôle fondamental des progrès en optique expérimentale dans la construction de la physique moderne (relativité, mécanique quantique).

**MOTS-CLEFS :** *démonstrations optiques ; histoire des sciences ; vulgarisation scientifique*

### 1. COULEURS - SPECTROMÉTRIE

Nous présentons tout d'abord le principe des spectromètres à fente (Fig. 1 a et b) puis on montre que tout cet appareil tient désormais dans une petite boîte, le spectromètre USB. On peut alors aborder de façon relativement quantitative, y compris avec un très jeune public, la synthèse additive et soustractive des couleurs au moyen de projecteurs à LED (Fig. 1 c et d).



FIGURE 1 : de gauche à droite : a) montage d'un spectromètre à fente et prisme à vision directe (PVD), b) spectre obtenu en remplaçant le PVD par un réseau. c) 3 projecteurs à LED dont les ombres font apparaître les couleurs primaires et secondaires d) couleurs par réflexion.

Pour un niveau plus avancé, le spectromètre USB est ensuite utilisé avec une source à incandescence. On montre que l'essentiel de l'énergie est dissipée sous forme d'infrarouges et on sensibilise alors le public aux économies d'énergie. On présente ensuite les lampes à décharge avec la lampe de Balmer. Au niveau post bac, ces deux expériences permettent d'introduire la mécanique quantique. Pour le grand public, elles servent d'introduction aux lampes "modernes" - fluocompactes. On revient alors au projecteur à LED (spectre de bandes) et le blanc obtenu par synthèse R+G+B. On poursuit par les LEDs blanches de dernière génération en expliquant la fluorescence jaune d'un composé de terres rares pompé par une LED bleue. On conclut par la démonstration des singularités de la lumière LASER : diode sous et au dessus du seuil (rétrécissement spectral), laser HeNe à cavité ouverte (directivité, modes spatiaux), *speckle*.

## 2. INTERFÉRENCES - DIFFRACTION

Nous nous appuyons tout d'abord sur des expériences avec des ultrasons pour introduire la notion de longueur d'onde. Ensuite, on présente à la fois les expériences de diffraction en lumière laser pour leur facilité d'obtention (Fig. 2 d : les longueurs d'ondes des deux lasers sont clairement différentes alors que quasiment du même rouge à l'oeil). mais aussi en lumière blanche (lorsque l'on peut faire le noir) pour aborder les aspects historiques et insister sur la difficulté de certaines expériences. Pour un public post-bac nous présentons de plus l'expérience du point de Poisson, capitale dans l'établissement de la théorie ondulatoire à la suite des travaux de Fresnel (1815-1818).

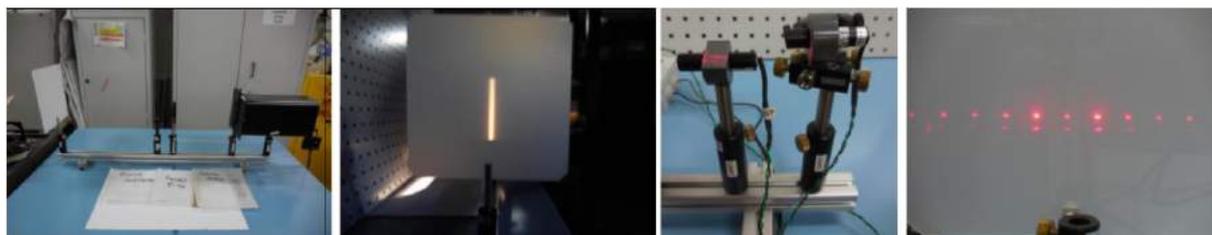


FIGURE 2 : de gauche à droite : a) montage pour diffraction/interférences en lumière blanche b) figure de diffraction d'une fente. c) montage à deux diodes laser 650 et 635nm d) diffraction par un réseau correspondante.

## 3. POLARISATION

C'est une propriété difficile à conceptualiser, à enseigner et, *a fortiori* à vulgariser. On utilise tout d'abord la corde de Melde pour visualiser une onde transverse (Fig. 3 a). Ensuite, on montre la polarisation par réflexion et les polariseurs dichroïques type polaroid. Un interféromètre de polarisation est ensuite présenté avec selon le niveau, une interprétation quantitative du spectre cannelé avec le spectromètre USB (Fig. 3 b-d).



FIGURE 3 : de gauche à droite : a) corde de Melde b) interféromètre de polarisation avec lames de scotch "en croix". c) lames de scotch d'épaisseur croissante entre polariseur et analyseur croisé pour analyse quantitative et spectre cannelé d) idem entre polariseur et analyseur parallèles : complémentarité.

## CONCLUSION

Cet ensemble d'expériences d'optique tient dans 4 ou 5 caisses et peut être facilement transporté dans des événements grand public (fête de la science, nuit des chercheurs...) ou dans des classes. Il permet d'aborder l'optique à différents niveaux, du plus élémentaire jusqu'à la licence de physique. Il rencontre un large succès à chaque présentation.