

CONGRÈS DE LA



Société Française d'Optique

04 – 07 JUILLET 2016

OPTIQUE



BORDEAUX 2016

COLOQ HORIZONS JNOG JRIOA CLUBS PAMO-JSM (SFP)

15^e COLLOQUE
SUR LES LASERS
ET L'OPTIQUE
QUANTIQUE

20^e CONFÉRENCE
HORIZONS DE
L'OPTIQUE

36^e JOURNÉES
NATIONALES
D'OPTIQUE
GUIDÉE

8^e JOURNÉES
RECHERCHE
INDUSTRIE
DE L'OPTIQUE
ADAPTATIVE

CLUBS THÉMATIQUES
DE LA SFO
3^e journées du club
Nanophotonique et
4^e journées nationales
du Club Photonique Organique

INVITÉ SPÉCIAL
Colloque commun de
la division de Physique
Atomique, Moléculaire
et Optique et les Journées
de Spectroscopie
Moléculaire de la



LA REMISE DES PRIX SFO | LA REMISE DU PRIX AIMÉ COTTON (SFP/PAMO)
L'EXPOSITION AU CŒUR DU CONGRÈS | LES RENCONTRES PÉDAGOGIQUES | LA SESSION
INDUSTRIELLE | LES STUDENT CLUBS ET CHAPTERS | LA VITRINE DE L'INNOVATION 2016

DATE LIMITE DE SOUMISSION : 1^{ER} AVRIL 2016
www.sfoptique.org



TABLE DES MATIERES

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	L'effet Hong Ou et Mandel: au cœur de la seconde révolution quantique	
	<u>A. Aspect</u>	1

Mardi 5 juillet 2016

16:00 - Session plénière 2

Grand Amphi

16:00	Quantum optics in photonic nanostructures using high-energy electrons	
	<u>A. Polman</u>	2
16:40	Confinement moléculaire : une nouvelle voie pour la nanophotonique?	
	<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	Des miroirs hors norme à l'écoute de l'espace-temps	
	<u>J. Degallaix, L. Balzarini, V. Dolique, R. Flamino, D. Forest, M. Granata, B. Lagrange, L. Pinard, C. Michel, N. Straniero, J. Teillon et G. Cagnoli</u>	7
16:30	Étude du trou noir super-massif au centre de la Galaxie avec l'instrument GRAVITY	
	<u>G. Perrin</u>	10
17:00	Arrêter la lumière dans une fibre: la rencontre des atomes froids et de la nanophotonique	
	<u>J. Laurat</u>	13
17:30	Art et astronomie. Impressions célestes	
	<u>Y. Nazé</u>	16

Jeudi 7 juillet 2016

14:00 - Session plénière 4

Grand Amphi

14:00	Générer et manipuler des photons uniques avec des atomes artificiels	
	<u>P. Senellart</u>	18
14:35	Dynamiques ultrarapides paradoxales dans les lasers à fibre optique	
	<u>P. Grellu</u>	19
15:10	Génération d'harmoniques, molécules chirales et dynamiques ultrarapides	
	<u>S. Beaulieu, A. Comby, R. Géneaux, V. Blanchet, D. Descamps, A. Ferré, G. Garcia, Y. Mairesse, E. Mével, L. Nahon, S. Petit, B. Pons, T. Ruchon et B. Fabre</u>	21

15:40	2015, Année de la Lumière en France est un immense succès ! <i>C. Subran</i>	24
16:00	Clôture et remerciements	

Mardi 5 juillet 2016

14:00 - Rencontres pédagogiques

Grand Amphi

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

14:00 - Session industrielle

Amphi D

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

Grand Amphi

18:30 Quiz

Lundi 4 juillet 2016

16:00 - HORIZONS - Optique et Biologie

Amphi E

16:00	Apport de l'optique-hyperfréquence à l'imagerie polarimétrique et à la physique de la polarisation <i>M. Alouini, J. Fade, F. Parnet, S. Panigrahi, N. Ortega-Quijano, H. Ramachadran, L. Pouget, C. Hamel, L. Frein, E. Schaub et A. Carré</i>	35
16:30	Endoscopes multiphotoniques dans marquage <i>H. Rigneault</i>	37
17:00	Imagerie sans lentille et approches inverses : la haute résolution à bas coût <i>N. Verrier, C. Fournier, F. Jolivet et T. Fournel</i>	39
17:30	Les Nanotubes de Carbone comme Nouvelles Sondes de l'Organisation Nanoscopique de Cerveaux Vivants <i>N. Danné, A. Godin, J. Varela, Z. Gao, B. Lounis, L. Groc et L. Cognet</i>	41
17:45	Caractérisation de la dégradation du collagène dans les parchemins par microscopie optique non-linéaire et nanospectroscopie infrarouge <i>G. Latour, L. Robinet, A. Dazzi, F. Portier, A. Deniset-Besseau et M.-C. Schanne-Klein</i>	43
18:00	Wavefront Shaping for Structural Nonlinear Microscopy <i>H. De Aguiar, S. Gigan et S. Brasselet</i>	45
18:15	Microscopie électro-optique <i>C. Lafargue, D.T. Trinh, B. Hajj et J. Zyss</i>	47

Mardi 5 juillet 2016

9:00 - HORIZONS - Optique et Électrons

Amphi E

9:00	Photoémission non linéaire, un outil pour la plasmonique <i>L. Douillard</i>	49
9:30	Quand les électrons chauds pimentent la plasmonique <i>B. Palpant, T. Labouret, X. Wang, J.-F. Audibert, R. Pansu, N. Djellali, R. Moreira et J. Gonzalo</i>	50
10:00	Une nanosource de photons et de plasmons <i>E. Boer-Duchemin</i>	52

Mercredi 6 juillet 2016

9:00 - HORIZONS - Optique et Espace

Amphi E

9:00	Détection d'ondes gravitationnelles par interférométrie optique <i>M. Barsuglia</i>	53
9:30	Les optiques EUV de la mission spatiale Solar Orbiter <i>F. Auchère, F. Delmotte et R. Mercier</i>	55
10:00	Architecture optique du sondeur infrarouge IASI-NG <i>C. Luitot, A. Robert, J. Boyadjian, F. Bernard et E. Baldit</i>	58

11:00 - HORIZONS - Optique et Nanostructures

Amphi E

11:00	Nano-ablation à haut rapport de forme <i>P.-A. Lacourt, C. Xie, R. Giust, L. Froehly, F. Courvoisier et J. Dudley</i>	60
11:30	Nanostructures pour le photovoltaïque solaire <i>S. Collin</i>	62
12:00	Structuration laser femtoseconde avec de la lumière structurée <i>Y. Petit, E. Lee, K. Mishchik, E. Brasselet, S. Danto, I. Manek-Höninger, T. Cardinal et L. Canioni</i>	64
12:15	Nouvelles méthodes de confinement optiques et phononiques, mesures par diffusion raman <i>F.-R. Lamberti, C. Gomez Carbonell, A. Lemaître, O. Krebs, I. Favero, B. Jusserand, P. Senellart, L. Lanco et D. Lanzillotti-Kimura</i>	66

Jeudi 7 juillet 2016

8:45 - HORIZONS - Optique et Plasmons

Amphi E

8:45	Métasurfaces plasmoniques pour le visible et l'infrarouge <i>A. Moreau</i>	68
9:15	Assembler des antennes optiques nanométriques sur des brins d'ADN <i>S. Bidault</i>	70
9:45	Spin-controlled near-field addressing of plasmonic nano-antennas <i>Y. Lefier, M. Suarez, R. Salut, U. Fischer et T. Grosjean</i>	72
10:00	Luminescence à Deux Photons de Nanobâtonnets d'Or Colloïdaux : Influence du Volume pour une Même Résonance Plasmon <i>C. Molinaro, S. Marguet, L. Douillard, F. Charra et C. Fiorini-Debuisschert</i>	74
10:15	Emission d'une antenne plasmonique couplée à un émetteur unique <i>A. Dhawan, C. Belacel, C. Schwob, M. Nasilowski, D. Dubertret, L. Coolen, P. Senellart et A. Maître</i>	76

11:00 - HORIZONS - Optique et Culture

Amphi E

11:00	Une réplique moderne de l'expérience de Fizeau d'entraînement partiel de l'éther par l'eau en mouvement <i>R. Mathevet, P. Labastie et T. Lahaye</i>	78
11:30	Rayonnement synchrotron et matériaux du patrimoine <i>L. Bertrand, P. Gueriau et M. Thoury</i>	80
12:00	La vraie nature de la lumière : un quête jamais terminée <i>M. Leduc</i>	82

Stands pédagogiques

S0	Mallette pédagogique pour l'holographie : comment faire des expériences pour l'enseignement supérieur en s'affranchissant simplement des vibrations parasites <i>A. Escarguel et R. Baude</i>	84
S1	HOBIT : Hybrid optical benches for innovative teaching <i>B. Bousquet, L. Canoni, J.-P. Guillet, M. Hachet, S. Fleck, D. Furio, B. Coulais et J. Bergognat</i>	85
S2	La tomographie par cohérence optique : un projet expérimental <i>G. Latour, M. Godard, V. Guillet et M. Jacquey</i>	86
S3	VP2L : Un Serious Game en réalité virtuelle 3D appliqué à la formation aux technologies optique et laser <i>L. Dutertre, B. Fabre, E. D'Humières, S. Petit, D. Lyoen, J. Dronval, E. Boeri et E. Cormier</i>	87
S4	Un ensemble polyvalent d'expériences optiques de démonstration <i>R. Mathevet</i>	88

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

Alain Aspect¹

¹ *Institut d'Optique Graduate School, 2 avenue augustin fresnel, 91127 Palaiseau, France*

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

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.

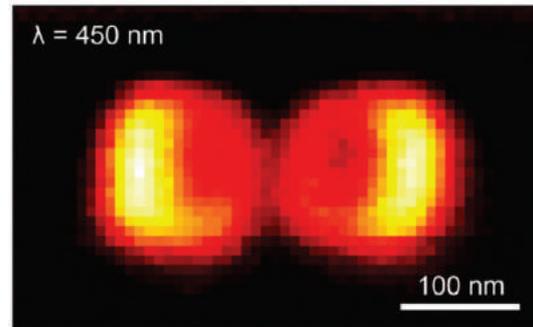


Figure 2. Cathodoluminescence image of p_x - p_x hybridized silicon Mie resonator bonding modal field at $\lambda=450$ nm.

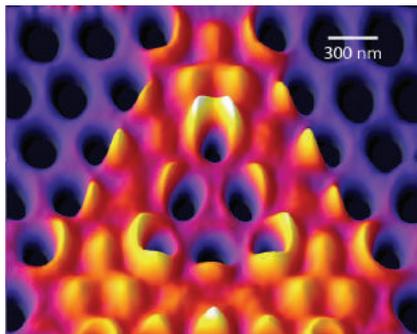


Figure 3. Cathodoluminescence microscopy image of photonic crystal cavity field distribution in SiN membrane, taken at $\lambda=700$ nm.

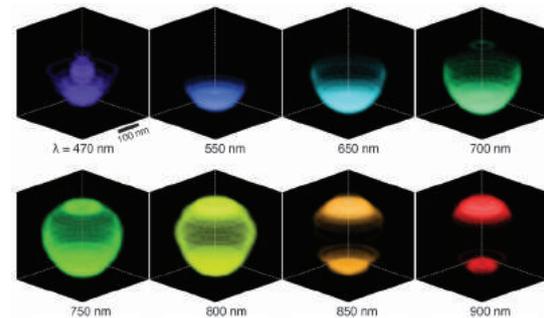


Figure 4. 3D Tomographic reconstruction of localized modes in PMMA/Au core-shell cusp cavity measured with cathodoluminescence.

RÉFÉRENCES

- [1] For details: see: www.erbium.nl/arcis
- [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

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.^[1] 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).^[1] 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).

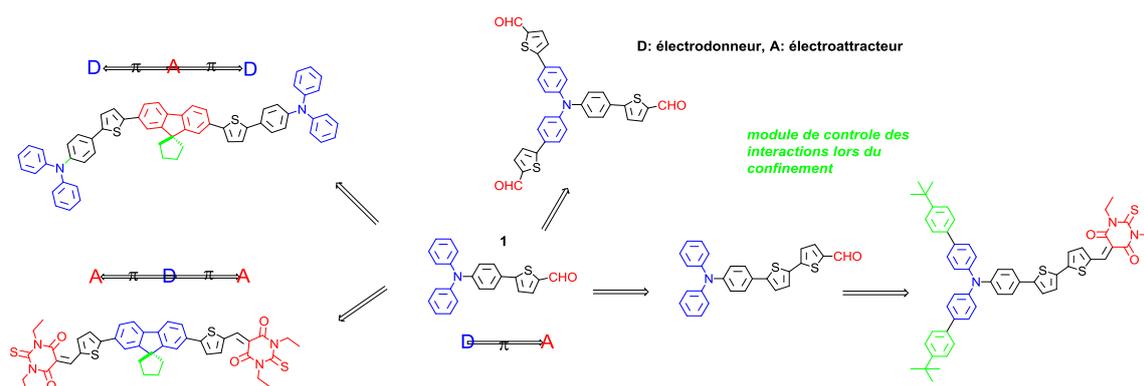


Fig. 1 : Exemples de chromophores multipolaires polarisables dédiés à l'élaboration de nanoparticules organiques ultra-brillantes et accordables.

La structure des chromophores (D, A, connecteur π 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.^[2-6] Il est de plus possible d'exalter les réponses optiques non-linéaires et la luminescence de telles nanoparticules en pilotant en amont les interactions,^[6] 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.^[7]

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^[2] 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).^[4,7]

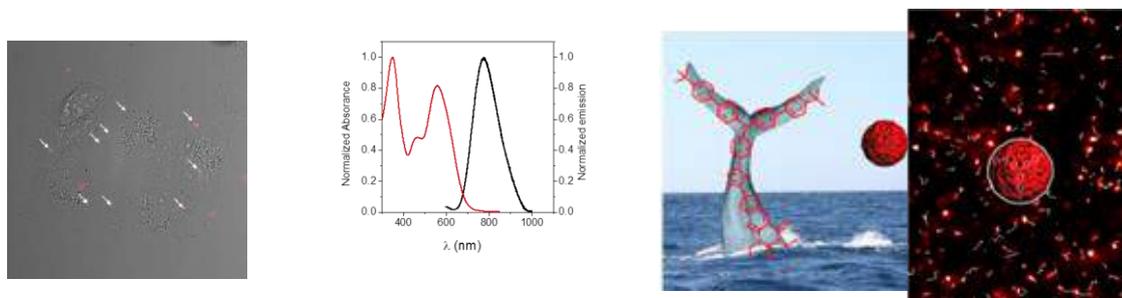


Fig. 2 : Imagerie de nanoparticules hyper-brillantes émettrices dans le proche IR (HIFONs) dans des cellules COS (gauche) et suivi dans l'eau (droit) ^[4]

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 Degallaix¹, Laurent Balzarini¹, Vincent Dolique¹, Raffaele Flaminio², Danièle Forest¹, Massimo Granata¹, Bertrand Lagrange¹, Laurent Pinard¹, Christophe Michel¹, Nicolas Straniero¹, Julien Teillon¹, Gianpetro Cagnoli¹

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

² *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.

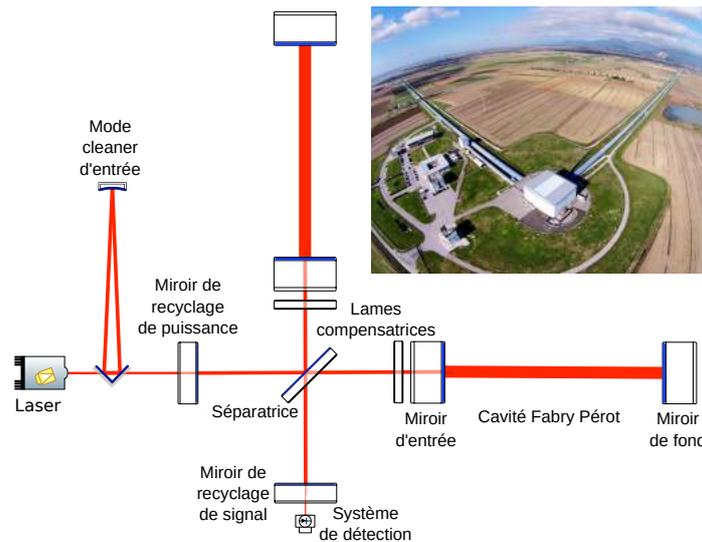


FIGURE 1 : Schéma optique typique d'un détecteur d'ondes gravitationnelles. Dans l'encart, une vue aérienne du détecteur Virgo en Italie avec ses bras perpendiculaires de 3 km de long.

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 (± 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 ± 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 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 nm à 0.4 nm sur la partie centrale de 150 mm de diamètre.

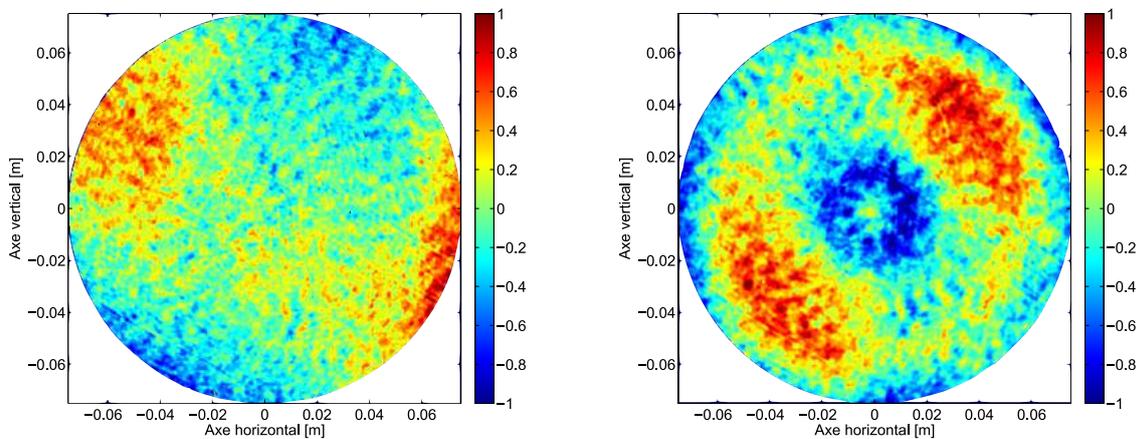


FIGURE 2 : Image de la planéité d'un miroir de fond avant (gauche) et après dépôt (droite). L'échelle de couleur est en nanometre et identique pour les deux images.

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 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 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 Perrin¹

¹ 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].

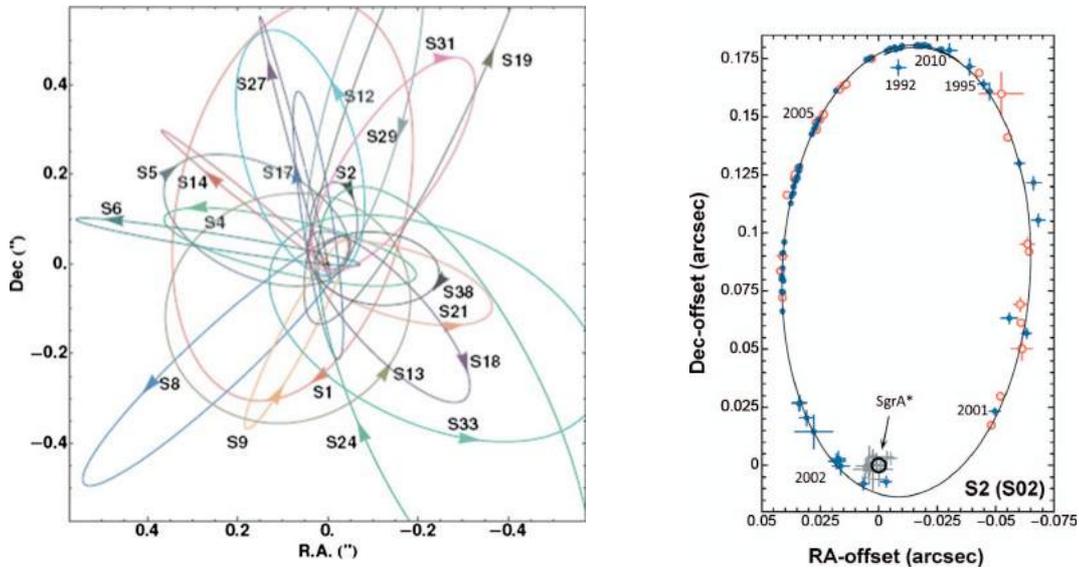


Fig. 1 : Gauche : la trajectoire des étoiles de l'amas S près atour du centre galactique [4]. Droite : les mesures obtenues sur l'étoile S2 et les mesures de position de Sgr A* [2].

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 $53 \mu\text{as}$ (26×10^{-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.

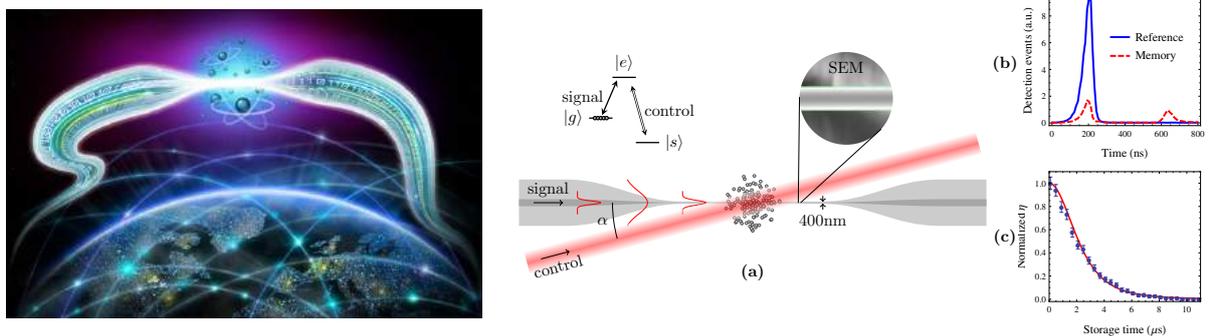


FIGURE 1 : **Arrêter la lumière dans une fibre optique.** Des atomes froids sont piégés au voisinage d'une fibre optique qui a été étirée dans une région de quelques centimètres. En arrivant dans cette zone, la lumière guidée est ralentie et l'information qu'elle porte est transférée aux atomes. Plus 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.

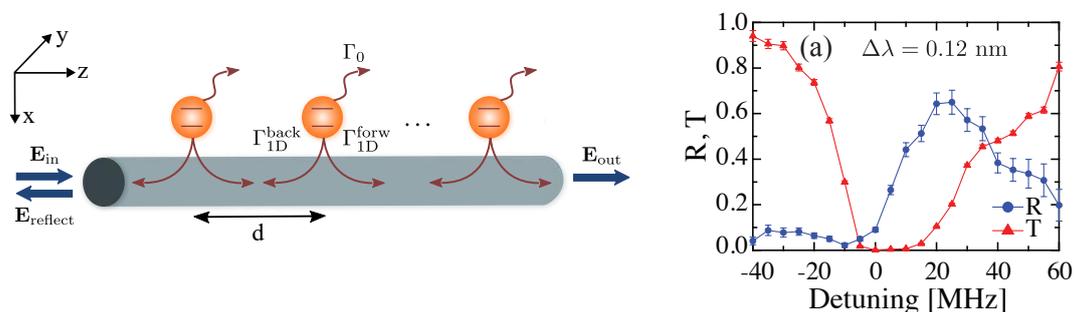


FIGURE 2 : **Miroir de Bragg atomique.** Les atomes piégés à proximité de la nanofibre peuvent émettre en espace libre ou dans le mode guidé. Chaque atome se comporte alors comme un miroir avec une faible réflectivité pour la lumière se propageant dans la nanofibre. Lorsque la distance entre les atomes 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 Nazé¹

¹ *Groupe d'Astrophysique des Hautes Energies, Dept A.G.O. Université de Liège, B4000 Liège, Belgique*

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^e 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^e 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^e 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 Galilée¹). 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^e 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^e 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

¹ 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. Grelu¹

¹ *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^{1,4}, Antoine Comby¹, Romain Géneaux³, Valérie Blanchet¹, Dominique Descamps¹, Amélie Ferré¹, Gustavo A. Garcia², Yann Mairesse¹, Éric Mével¹, Laurent Nahon², Stéphane Petit¹, Bernard Pons¹, Thierry Ruchon³, Baptiste Fabre¹,

¹ Université de Bordeaux - CNRS - CEA, CELIA, UMR5107, F33405 Talence Cedex, France

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

³ CEA, IRAMIS, LIDyL, CEA-Saclay, F91191, Gif-sur-Yvette, France

⁴ 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 SF₆ 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 SF₆, 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.

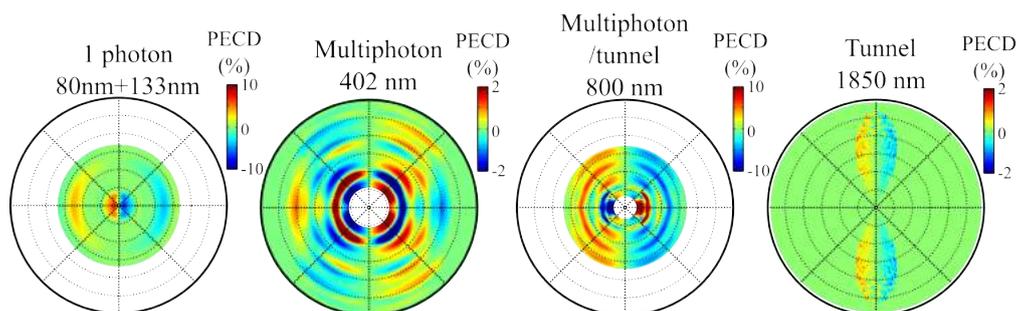


FIGURE 1 : PECD obtenus lors de l'ionisation de la fenchone par des impulsions femtosecondes dans différents régimes d'ionisation : ionisation à 1 photon VUV obtenu par la technique de génération d'harmoniques résonnantes dans SF₆ par des impulsions à 400 nm, ionisation multiphotonique à 400 nm, ionisation 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 Subran¹

¹ « 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 Champenois¹

¹ 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 études¹. 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 Delabre¹

¹ Univ. Bordeaux, LOMA, UMR 5798, F-33400 Talence, France.

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

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 Latour¹, Marie Godard², Vincent Guillet³

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

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

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

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-Hönninger

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

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 500m² 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.

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

A. Escarguel¹, R. Baude¹

¹ 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 Subran¹***¹ 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 BREGI¹

¹*CNOP, 13 rue Moreau, 75012 Paris*

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-Collin¹

¹ *Alphanov, Institut d'Optique d'Aquitaine, Rie François Mitterand , 33400 Talence, France*

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 VIELLEROBE¹

¹ *Biparc Bordeaux Métropole, 27 allée Charles Darwin, 33600 Pessac, France*

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 Sylla¹¹SourceLAB SAS, 86 rue de Paris, 91400 Orsaysylla@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.

**APPORT DE L'OPTIQUE-HYPERFREQUENCE A L'IMAGERIE POLARIMETRIQUE
ET A LA PHYSIQUE DE LA POLARISATION**

**M. Alouini¹, J. fade¹, F. Parnet¹, S. Panigrahi¹, N. Ortega-Quijano¹, H. Ramachandran²,
L. Pouget¹, C. Hamel¹, L. Frein¹, E. Schaub¹, A. Carré¹**

¹ Institut de Physique de Rennes UMR CNRS6251, Université de Rennes I, 35042 Rennes, France

² Raman Research Institute, Sadashiv Nagar, Bangalore, India 560080

Mehdi.alouini@univ-rennes1.fr

RÉSUMÉ

L'imagerie polarimétrique a connu un regain d'intérêt ces dernières années. Les champs d'application se trouvent notamment en biologie, dans le médical, la défense et le contrôle de surface dans l'industrie. Ce type d'imagerie n'a pas pour vocation de remplacer les techniques d'imagerie existantes mais d'apporter des contrastes supplémentaires du milieu ou dans la scène étudiée. L'engouement qu'on connaît aujourd'hui pour cette modalité d'imagerie a été porté par des avancées technologiques importantes au niveau des sources d'illumination, des caméras, du traitement du signal associé et des composants de contrôle et d'analyse de la polarisation. Dans la santé par exemple, certaines pathologies comme le cancer du col de l'utérus ou la cirrhose du foie peuvent être identifiées précocement par un changement du pouvoir dépolarisant de la lésion. La compréhension et la description même de la dépolarisation, bien qu'étant un sujet centenaire, reste d'actualité car les avancées technologiques permettent d'apporter des réponses de plus en plus précises. Le formalisme de Mueller qui est considéré comme le plus complet pour décrire la dépolarisation reste un formalisme phénoménologique basé sur des mesures d'intensité. Il masque donc, par construction, la physique de l'interaction du champ électromagnétique avec le matériau.

Les développements que nous menons font intervenir des technologies optique-hyperfréquences pour l'imagerie de manière générale et polarimétrique en particulier [1]. Cela offre par là même accès à une détection du champ électromagnétique plutôt que de son intensité. Ces développements qui étaient initialement voués à des besoins applicatifs bien spécifiques comme l'endoscopie polarimétrique et l'aide à la navigation par temps de brouillard ont mené à de nouveaux concepts.

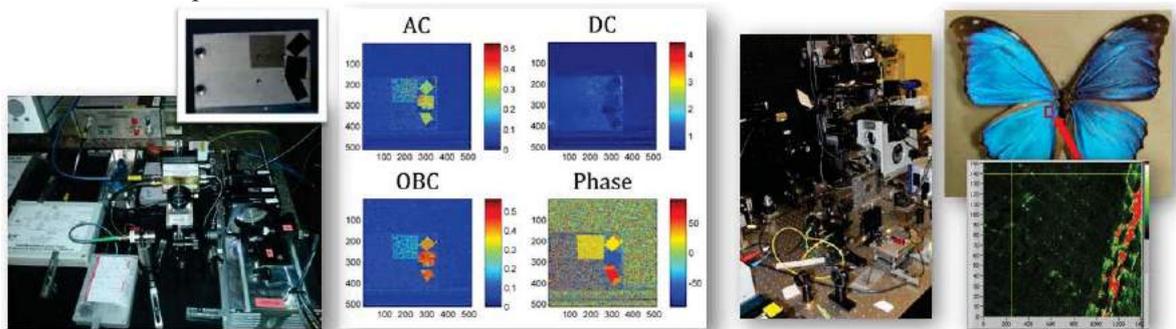


Fig. 1 : Imagerie DSOB. A gauche, imagerie DSOB en espace libre à 1,5 μm . L'amplitude du signal démodulé (OBC) donne accès à l'amplitude d'un dichroïsme alors que sa phase donne accès à l'orientation de ce dichroïsme. Adaptation de l'imagerie DSOB pour l'endoscopie polarimétrique temps réel.

Le premier est l'imagerie par brisure d'orthogonalité dans laquelle la source d'éclairage est une superposition de deux états de polarisation décalés en fréquence et orthogonaux au sens mathématique. Après interaction cette orthogonalité peut être brisée selon le "caractère

dépolarisant" de l'échantillon (Fig. 1). De plus le signal de brisure d'orthogonalité n'étant pas sensible à la propagation dans une fibre, il existe des retombées directes en endoscopie [2]. En outre, les expériences que nous menons aussi bien aux échelles microscopiques que macroscopiques ont mis en évidence la nécessité de considérer les effets de dépolarisation sous un autre angle [3]. On sait aujourd'hui que la dépolarisation n'est pas une propriété intrinsèque du matériau mais plutôt une propriété d'ensemble liée au désordre du matériau et surtout aux conditions expérimentales et par voie de conséquent à l'instrument de mesure lui-même. A l'échelle du grain de speckle l'état de polarisation est parfaitement défini y compris pour un matériau considéré comme complètement dépolarisant (Fig. 2).

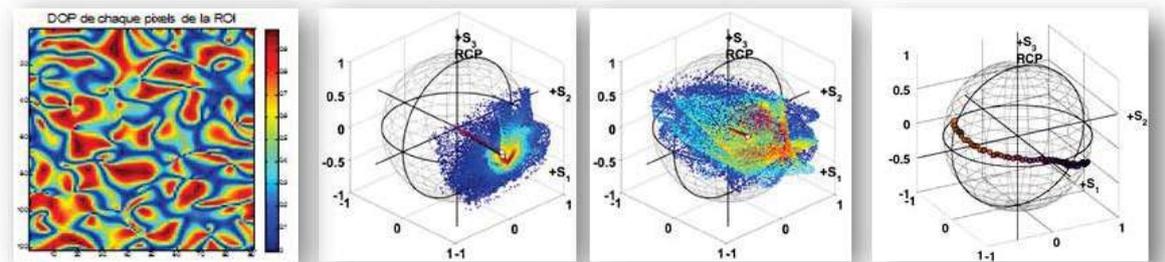


Fig. 2 : De gauche à droite : (1) contraste polarimétrique dans le champ de speckle, (2) répartition des états de polarisation sur la sphère de Poincaré pour un objet faiblement dépolarisant et (3) pour un objet dit "dépolarisant", (4) évolution de l'état de polarisation lors du passage d'un grain de speckle à un grain adjacent. La propriété de dépolarisation est un effet de moyennage d'états de polarisation parfaitement définis.

Le deuxième besoin, qui a trait à l'assistance à la navigation par temps de brouillard, nous a amené à explorer la question de l'imagerie temps réel de photons balistiques dans des conditions réelles (i.e., vrai brouillard et distance de propagation kilométrique) puis de proposer des solutions adaptées aux observations faites (Fig. 3). On montre que sur de telles distances la chute de visibilité de la source lumineuse l'emporte sur sa dépolarisation par le brouillard de telle sorte que cette dernière n'est pas à prendre en compte. L'imagerie polarimétrique instantanée plein champ sur un capteur unique est alors une approche efficace pourvu que le traitement de l'image et sa restitution intègre le caractère corrélé des fluctuations d'intensité dans les deux images initiales [4]. Ces avancées nous ont amenés à adjoindre au filtrage polarimétrique un filtrage par modulation haute fréquence de l'amplitude. Nous développons actuellement un nouveau concept d'imageur intégrant des techniques d'optique hyperfréquence pour réaliser la démodulation temps réel en plein champ.

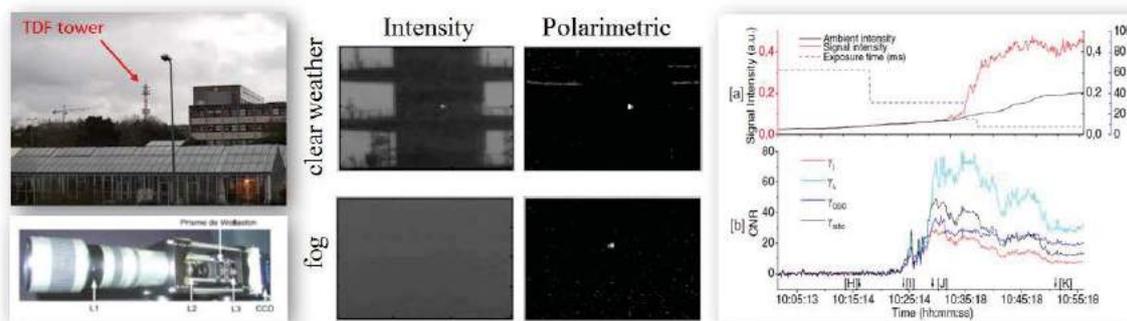


Fig. 3 : Imagerie de photons balistiques pour l'aide à la navigation par temps de brouillard. Le filtrage polarimétrique couplé à une représentation optimisée permet d'augmenter notablement le contraste.

RÉFÉRENCES

- [1] <https://ipr.univ-rennes1.fr/d4/them/imageries-avancees?mtop=dpt4>
- [2] F. Parnet et al., *Appl. Opt.* **55**, 2508-2520 (2016)
- [3] N. Ortega-Quijano et al., *J. Opt. Soc. Am. A* **33**, 434-446 (2016).
- [4] S. Panigrahi et al. *J. Opt.* **17**, 065703 (2015).

ENDOSCOPES MULTIPHOTONIQUES SANS MARQUAGE

Hervé Rigneault¹

¹ Institut Fresnel, Domaine Universitaire de St Jérôme, 13397 Marseille Cedex 20, France

herve.rigneault@fresnel.fr

RÉSUMÉ

Nous développons des systèmes endoscopiques permettant de réaliser des images de tissus biologiques en activant des contrastes relevant de l'optique non linéaire (2Photon, SHG, Raman cohérent) et n'utilisant aucun marquage. En utilisant des fibres creuses ou des bundles de fibres optiques tout spécialement développés, nous sommes capables (1) de délivrer des impulsions courtes (qq 100 fs) en bout de fibres et (2) de collecter les signaux non linéaires générés dans l'échantillon par la même fibre.

MOTS-CLEFS : *endoscope, fibres microstructurées, optique non linéaire*

1. INTRODUCTION

La microscopie multiphotonique [1] permet d'imager les tissus en profondeur en se basant sur des contrastes endogènes ne nécessitant aucuns marqueurs. Ainsi en scannant un faisceau laser impulsionnel focalisé dans un tissu, il est possible d'avoir accès à des signaux complémentaires rapportant sur la localisation des protéines (par auto-fluorescence à 2photon), du collagène (par émission de SHG¹). En utilisant les contrastes Raman cohérents (CARS/SRS²) [2], il est également possible d'avoir accès à la localisation des lipides ou de substances pharmacologiques ou cosmétiques actives [3]. Tous ces contrastes dits 'sans marquage' utilisent l'interaction non linéaire entre des impulsions courtes et la matière biologique. Un défi actuel consiste à étendre ces contrastes non linéaires et les images associées au domaine de l'endoscopie ou les contraintes de dimensionnalités sont plus sévères. Cependant, il est difficile de propager des impulsions courtes dans des fibres sans distorsions temporelle et spectrale, et de collecter les faibles signaux non linéaires générés (2photons, SHG, CARS/SRS).

Nous présenterons deux technologies qui permettent de résoudre ces problèmes (<http://www.fresnel.fr/spip/spip.php?article829>).

2. ENDOSCOPE PAR BALAYAGE DE FIBRE

La première approche utilise une méthode qui consiste à faire vibrer une fibre optique à l'aide d'actuateurs piézoélectriques (PZT). Excités à résonance, les actuateurs suivant x et y permettent de faire vibrer l'extrémité de la fibre qui est ensuite imagée dans l'échantillon à l'aide d'une micro-optique [4]. Une originalité de notre approche consiste à utiliser une fibre creuse comportant une double gaine [5]. Le cœur creux permet de quasiment annuler tous les effets de distorsion des impulsions liés aux effets non linéaires dans la fibre [6]. Ainsi une impulsion injectée des 100 fs sort d'une fibre de 1m quasiment inchangée. La double gaine présente une ouverture numérique de 0.6 et permet de collecter efficacement les signaux non linéaires générés. Nous présenterons des images de tissus cancéreux explorés à l'aide de cette technologie.

3. ENDOSCOPES SANS LENTILLE UTILISANT LE CONTROLE COHERENT DE FRONT D'ONDE

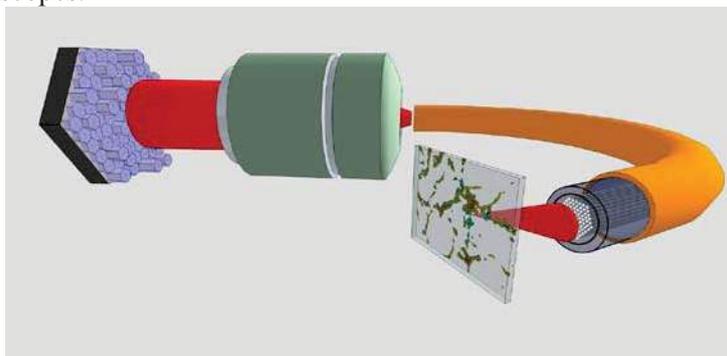
La deuxième approche utilise un bundle de fibres optiques et s'affranchie de toute optique distale. Dans cette modalité nous injectons les différentes fibres du bundle en maintenant une relation

¹ SHG: generation du second harmonique

² CARS : coherent anti-Stokes Raman scattering – SRS : stimulated Raman scattering

de phase entre les fibres de telle sorte, qu'en sortie de fibre, le front d'onde émerge avec une phase spatiale quadratique et se focalise en un point [7]. L'effet de ce contrôle cohérent est ainsi identique à celui qu'aurait une lentille et focalise le faisceau en un point dans l'échantillon pour y activer les contrastes non linéaires [8]. En imposant un gradient de phase contrôlé (tilt) il est alors possible de scanner le faisceau dans l'échantillon et de réaliser une image comme le ferait un microscope à balayage laser. La figure 1 présente un schéma du montage dans lequel nous utilisons un miroir segmenté pour ajuster la relation de phase entre les différentes fibres. Nous présenterons les premières images de fluorescence à 2photons utilisant cette approche.

De façon similaire nous explorons la possibilité, de réaliser ce contrôle de front d'onde dans une simple fibre multimode [9]. Dans ce cas le diamètre de la fibre n'est que de 125 μm et réalise le plus petit des endoscopes.



Figuer 1 : Schéma de l'endoscope sans lentille

Nous discuterons l'intérêt de ces approches endoscopiques dans le contexte de la détection de tissus cancéreux in vivo.

RÉFÉRENCES

1. W. R. Zipfel, R. M. Williams, and W. W. Webb, "Nonlinear magic: multiphoton microscopy in the biosciences," *Nat Biotechnol* **21**, 1369-1377 (2003).
2. J.-X. Cheng, and X. S. Xie, "Vibrational spectroscopic imaging of living systems: An emerging platform for biology and medicine," *Science* **350** (2015).
3. X. Chen, S. Grégoire, F. Formanek, J.-B. Galey, and H. Rigneault, "Quantitative 3D molecular cutaneous absorption in human skin using label free nonlinear microscopy," *Journal of Controlled Release* **200**, 78-86 (2015).
4. G. Ducourthial, P. Leclerc, T. Mansuryan, M. Fabert, J. Brevier, R. Habert, F. Braud, R. Batrin, C. Vever-Bizet, G. Bourg-Heckly, L. Thiberville, A. Druilhe, A. Kudlinski, and F. Louradour, "Development of a real-time flexible multiphoton microendoscope for label-free imaging in a live animal," *Scientific Reports* **5**, 18303 (2015).
5. S. Brustlein, P. Berto, R. Hostein, P. Ferrand, C. Billaudeau, D. Marguet, A. Muir, J. Knight, and H. Rigneault, "Double-clad hollow core photonic crystal fiber for coherent Raman endoscope," *Opt Express* **19**, 12562-12568 (2011).
6. A. Lombardini, X. Chen, S. Sivankutty, J. Wenger, R. Habert, C. Fourcade-Dutin, E. R. Andresen, A. Kudlinski, and H. Rigneault, "Développement d'un endoscope non linéaire utilisant une fibre creuse Kagomé à double gaine," presented at the Journées Nationale d'Optique Guidées 2015.
7. E. R. Andresen, G. Bouwmans, S. Monneret, and H. Rigneault, "Toward endoscopes with no distal optics: video-rate scanning microscopy through a fiber bundle," *Opt Lett* **38**, 609-611 (2013).
8. E. R. Andresen, G. Bouwmans, S. Monneret, and H. Rigneault, "Two-photon lensless endoscope," *Opt Express* **21**, 20713-20721 (2013).
9. S. Sivankutty, E. R. Andresen, R. Cossart, G. Bouwmans, S. Monneret, and H. Rigneault, "Ultra-thin rigid endoscope: two-photon imaging through a graded-index multi-mode fiber," *Opt. Express* **24**, 825-841 (2016).

IMAGERIE SANS LENTILLE ET APPROCHES INVERSES : LA HAUTE RÉSOLUTION À BAS COÛT

Nicolas Verrier^{1,2}, Corinne Fournier², Frédéric Jolivet², Thierry Fournel²

¹ Laboratoire Hubert Curien - UMR 5516-CNRS-Université Jean Monnet- 18 Rue du Professeur Benoît Lauras 42000 Saint-Etienne, France

² Univ Lyon, Univ Lyon1, Ens de Lyon, CNRS, Centre de Recherche Astrophysique de Lyon UMR5574, F-69230, Saint-Genis-Laval, France

nicolas.verrier@univ-lyon1.fr

RÉSUMÉ

Les techniques de microscopie conventionnelles permettent d'obtenir des images à très haute résolution et ont ainsi permis de nombreuses avancées dans les domaines de l'imagerie biomédicale. Néanmoins, le gain en résolution se fait au pris de la perte de champ de vue. Nous proposons une méthode d'imagerie sans lentille qui permet, à moindre coût, d'obtenir une information quantitative sur un grand champ.

MOTS-CLEFS : *Microscopie ; Holographie ; Approches inverses ; Tracking*

1. INTRODUCTION

L'imagerie puis la reconstruction tridimensionnelle d'échantillons volumiques présente un grand intérêt dans de nombreuses applications en physique expérimentale et en imagerie biomédicale. Parmi les techniques existantes, la microscopie sans lentille, plus communément connue sous le nom d'holographie numérique, est une méthode de choix qui permet d'obtenir des informations quantitative dans les trois dimensions de l'espace et au cours du temps. Les principes de la méthode ainsi que quelques résultats marquants sont présentés par la suite.

2. PRINCIPES DE LA MICROSCOPIE SANS LENTILLE

La microscopie sans lentille est dérivée des premières expériences d'holographie menées par Dennis Gabor [1]. Un exemple de dispositif est proposé Fig. 1. La lumière issue d'une source laser est filtrée

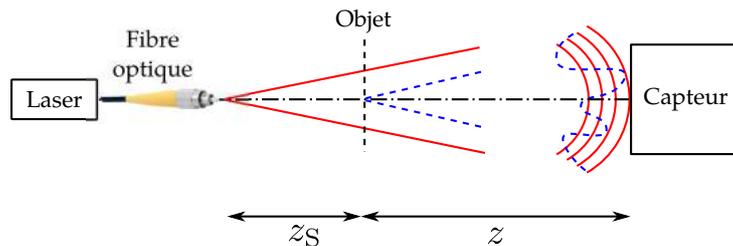


FIGURE 1 : Dispositif expérimental d'imagerie sans lentille.

au moyen d'une fibre optique mono-mode et trans-illumine l'objet à analyser. Les interférences entre la lumière diffractée par l'objet et la lumière directe sont formées sur un capteur d'imagerie dépourvu d'optique de collection. Le grandissement est intrinsèquement apporté par la divergence de l'onde d'illumination et vaut $G = (z_S + z)/z_S$. La mise au point sur l'objet est réalisée en simulant la rétro-propagation de la lumière du plan du capteur jusqu'à l'objet [2]. Ces méthodes sont sujettes à des artefacts de reconstruction tels que l'image jumelle. Aussi nous avons développé des méthodes de reconstruction alternatives [3].

Au lieu de transformer les données par le calcul numérique de la rétro-propagation, le problème de reconstruction est traité comme un problème inverse (PI). Cette méthode a prouvé son efficacité pour la reconstruction d'hologrammes [3] et est optimale dans certaines configurations expérimentales [4, 5].

Nous avons de plus démontré qu'il était possible d'améliorer encore la précision de ces approches en exploitant la redondance d'information d'une séquence temporelle d'hologrammes [6]. Il est ainsi possible d'atteindre une très bonne estimation des paramètres des objets analysés en gardant une configuration bas-coût.

3. APPLICATION AU TRACKING DE MICRO-OBJETS

Les bénéfices de notre approche ont été démontrés pour le tracking de macro et de micro-objet sphériques (gouttelettes ou colloïdes de latex) [7, 8]. Comme illustré Fig. 2 il est possible à partir

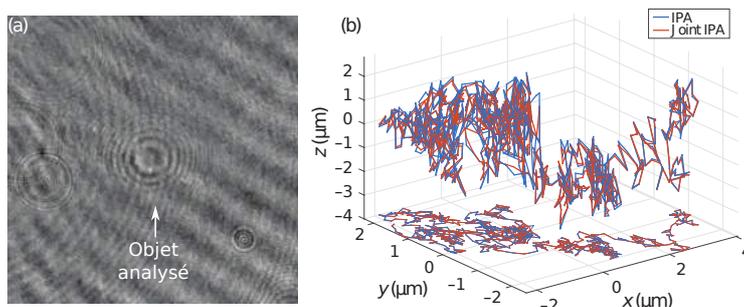


FIGURE 2 : Tracking de colloïdes de latex en mouvement brownien. (a) Hologramme de l'objet suivi. (b) Trajectoire extraite.

d'une séquence d'hologrammes (a) d'extraire la trajectoire (b) d'objets avec une précision de l'ordre de $17 \times 17 \times 60 \text{ nm}^3$ et une erreur standard de 0,2 % sur l'estimation du rayon, ouvrant ainsi la voie au développement de microscopes haute résolution dont la performance dépend essentiellement des méthodes de traitement du signal utilisées et sur la modélisation optique de la formation de l'image qu'elles considèrent.

CONCLUSION

Nous avons démontré les capacités de la microscopie sans lentille associée à une reconstruction par approche problèmes inverses pour la caractérisation et le tracking de micro-objets. Ces résultats encourageants ouvrent la voie au développement de dispositif où les optiques de haute qualité sont remplacées par des approches traitement du signal.

RÉFÉRENCES

- [1] D. Gabor, "A new microscopic principle," *Nature*, vol. 161, no. 4098, pp. 777–778, 1948.
- [2] U. Schnars and W. P. O. Jüptner, "Digital recording and numerical reconstruction of holograms," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 13, no. 9, p. R85, 2002.
- [3] F. Soulez, L. Denis, C. Fournier, E. Thiébaud, and C. Goepfert, "Inverse-problem approach for particle digital holography : accurate location based on local optimization," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 24, no. 4, pp. 1164–1171, Apr 2007.
- [4] K. I. Mortensen, L. S. Churchman, J. A. Spudich, and H. Flyvbjerg, "Optimized localization analysis for single-molecule tracking and super-resolution microscopy," *Nat. Methods*, vol. 7, no. 5, pp. 377–381, 2010.
- [5] C. Fournier, L. Denis, and T. Fournel, "On the single point resolution of on-axis digital holography," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 27, no. 8, pp. 1856–1862, Aug 2010.
- [6] N. Verrier and C. Fournier, "Digital holography super-resolution for accurate three-dimensional reconstruction of particle holograms," *Opt. Lett.*, vol. 40, no. 2, pp. 217–220, Jan 2015.
- [7] N. Verrier, C. Fournier, and T. Fournel, "3D tracking the brownian motion of colloidal particles using digital holographic microscopy and joint reconstruction," *Appl. Opt.*, vol. 54, no. 16, pp. 4996–5002, Jun 2015.
- [8] N. Verrier, N. Grosjean, E. Dib, L. Méès, C. Fournier, and J.-L. Marié, "Improvement of the size estimation of 3d tracked droplets using digital in-line holography with joint estimation reconstruction," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 27, no. 4, p. 045001, 2016.

LES NANOTUBES DE CARBONE COMME NOUVELLES SONDES DE L'ORGANISATION NANOSCOPIQUE DE CERVEAUX VIVANTS

Noémie Danné^{1,2}, Antoine G. Godin^{1,2}, Juan A. Varela^{3,4}, Zhenghong Gao^{1,2}, , Brahim Lounis^{1,2}, Laurent Groc^{3,4,*} and Laurent Cognet^{1,2,*}

¹Univ. Bordeaux, Laboratoire Photonique Numérique et Nanosciences, F-33400 Talence, France

²Institut d'Optique & CNRS, LP2N UMR 5298, F-33400 Talence, France

³Univ. Bordeaux, Interdisciplinary Institute for Neuroscience, F-33000 Bordeaux, France

⁴CNRS, IINS UMR 5297, F-33000 Bordeaux, France

laurent.cognet@u-bordeaux.fr & laurent.groc@u-bordeaux.fr

RÉSUMÉ

Le cerveau est un réseau biologique complexe en perpétuel réorganisation. L'espace existant entre les cellules (ExtraCellular Space - ECS) est une région clé du cerveau, où la circulation des neurotransmetteurs et molécules assurent une communication cellulaire optimale. Cependant la connaissance de sa structuration dans un cerveau vivant est très réduite par manque de moyens d'exploration. Nous montrons ici que le suivi de nanotubes de carbone individuels excités dans le proche infra-rouge permet de révéler les détails de l'ECS dans des tissus vivants. Cela est dû à leur propriétés photophysiques hors du commun et leur géométrie unidimensionnelle qui impose leur propriétés de diffusion ce qui en fait des sondes locales hors du commun. **MOTS-CLEFS :** *Nanotubes de carbone, microscopie de molécules uniques, super-résolution, imagerie du cerveau*

1. INTRODUCTION

Dans le cerveau, diverses molécules, neurotransmetteurs et nutriments circulent *via* l'espace extra-cellulaire (ECS), constituant clé de la communication cellulaire. L'ECS occupe ~20% [1] du volume total du cerveau, et varie en fonction du sommeil [2], du développement [3], de l'âge [4] et peut être altéré dans les maladies neuropsychiatriques et dégénératives [5]. Il n'existe pas à l'heure actuelle de méthode permettant de sonder l'ECS de tissus vivants à l'échelle sub-micronique. Nous démontrons ici que la microscopie et le suivi de nanotubes de carbone luminescents constitue une approche novatrice dans ce contexte.

2. EXPLORATION DES DIMENSIONS NANOMETRIQUES DE GELS BIOCOMPATIBLES MODELES PAR SUIVI DE NANOTUBES DE CARBONE LUMINESCENTS

Les nanotubes de carbone mono-feuillet semi-conducteurs présentent une fluorescence dans le proche infrarouge qui est stable et de forte intensité, supérieure à la majorité des autres nano-sondes fluorescentes utilisées en biologie. Ils sont ainsi des nano-objets prometteurs pour l'imagerie biologique. De plus, grâce à leur géométrie – diamètre ~1nm et longueur ~500 nm, les nanotubes de carbone peuvent se mouvoir efficacement dans les interstices de réseaux complexes [6]. Afin de démontrer leur potentiel pour sonder et extraire la structuration d'espaces confinés nanométriques, nous avons utilisé des gels d'agarose comme échantillon modèles de l'ECS. Les propriétés photophysiques des nanotubes permettent de les suivre pendant plusieurs dizaines de minutes à cadence vidéo et de reconstruire une image super-résolue de la structure nanoscopique du gel en super-localisant (i.e. avec des précisions sub-longueur d'onde) la position du nanotube en fonction du temps.

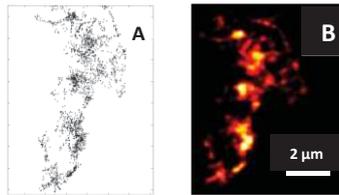


Fig. 1 : A) Trajectoire d'un nanotube dans un gel d'agarose, B) Image Super-résolue des pores du gel

3. MISE EN EVIDENCE DES DIMENSIONS NANOMETRIQUES DE L'ECS DE CERVEAUX VIVANTS

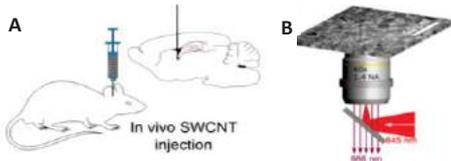


Fig. 2 : A) Injection des nanotubes dans le cerveau B) Observation des tranches aigües au microscope.

Nous avons ensuite injecté des nanotubes de carbone biocompatibles (enrobés avec du PL-PEG, phospholipid-polyéthylenglycol) dans des cerveaux de jeunes rats et analysé leur diffusion sur des tranches aigües. L'excitation des nanotubes se fait en champ large (845 nm) et l'émission de fluorescence se situe dans le proche infra-rouge (986 nm), domaine de faible absorbance des tissus biologiques.

Comme dans gels d'agarose, la détection sub-longueur d'onde des nanotubes pendant des dizaines de minutes dans l'ECS de cerveaux vivant permet de visualiser la tortuosité de l'ECS et de déterminer ses dimensions (Fig.3B) avec une résolution de 40nm, (Fig.3C). Les dimensions des domaines formant l'ECS varient de 50 nm à 500 nm.

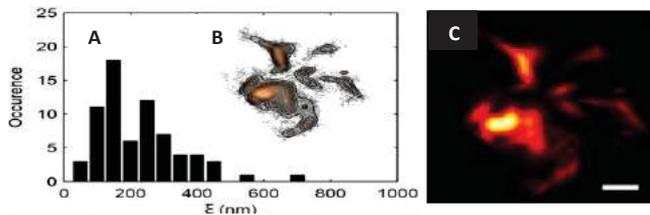


Fig. 3 : A) Dimensions de l'ECS, B) quantification de domaines dans l'ECS C) Image super-résolue de l'ECS.

CONCLUSION

Nous avons développé un outil innovant permettant de visualiser et quantifier pour la première fois la tortuosité de l'espace extra-cellulaire à l'échelle nanométrique dans des cerveaux vivants. Le caractère unidimensionnel des nanotubes en fait des sondes nanoscopiques idéales pour l'exploration de l'ECS de cerveau qui se remodèle en permanence durant le développement, les processus d'apprentissage ou lors de maladies neurodégénératives. Les perspectives de ce travail concernent l'étude de ces conditions physiologiques et pathologiques [7].

REFERENCES

- [1] H. F. Cserr *et al.* *J. Physiol.-London* **442**, 277-295 (1991) ; E. Sykova, C. Nicholson. *Physiol. Rev.* **88**, 1277-1340 (2008).
- [2] L. Xie *et al.* *Science* **342**, 373-377 (2013).
- [3] A. Lehmenkuhler *et al.* *Neuroscience* **55**, 339-351 (1993).
- [4] C. Metzler-Baddeley *et al.* *J. Neurosci.* **31**, 13236-13245 (2011).
- [5] V. Berezin *et al.* *Prog. Brain Res.* **214**, 353-388 (2014).
- [6] Fakhri *et al.* *Science* 2010, 330, 1804
- [7] Godin *et al.* soumis

CARACTERISATION DE LA DEGRADATION DU COLLAGENE DANS LES PARCHEMINS PAR MICROSCOPIE OPTIQUE NON-LINEAIRE ET NANOSPECTROSCOPIE INFRAROUGE

Gaël Latour¹, Laurianne Robinet², Alexandre Dazzi³, François Portier⁴,
Ariane Deniset-Besseau³, Marie-Claire Schanne-Klein⁵

¹ *Laboratoire Imagerie et Modélisation en Neurobiologie et Cancérologie, Univ. Paris-Sud, CNRS, Université Paris-Saclay, Orsay, France*

² *Centre de Recherche sur la Conservation, Sorbonne Universités, Museum Nation d'Histoire Naturelle, Ministère de la Culture et de la Communication, CNRS, Paris, France*

³ *Laboratoire de Chimie Physique, Univ. Paris-Sud, CNRS, Université Paris-Saclay, Orsay, France*

⁴ *Laboratoire de Chimie de la Matière Condensée de Paris, Sorbonne Universités, UPMS Univ. Paris 06, CNRS, Collège de France, Paris, France*

⁵ *Laboratoire d'Optique et Biosciences, Ecole Polytechnique, CNRS, INSERM, Université Paris-Saclay, Palaiseau, France*

gael.latour@u-psud.fr

RÉSUMÉ

La dégradation du collagène, principal constituant de la peau, est caractérisée par imagerie corrélative multi-échelle. Cette méthodologie est appliquée aux parchemins préservés et altérés.

MOTS-CLEFS : *microscopie optique non-linéaire, spectroscopie infrarouge, AFM, collagène*

1. INTRODUCTION

Le collagène est un élément majeur de l'architecture des organes chez les mammifères et est présent notamment dans la peau (au niveau du derme), la cornée, les tendons et ligaments, les os et les artères. Cette protéine se caractérise par de longs domaines en triple hélice, qui s'alignent spontanément pour former des fibrilles. Or, le parchemin est obtenu à partir d'une peau animale traitée puis séchée sous tension, et est ainsi constitué essentiellement de collagène fibrillaire. Ce matériau est sensible à l'eau et à la chaleur qui peuvent causer la dénaturation du collagène (ou gélatinisation : perte de la structure en triple hélice), le parchemin devenant alors translucide et cassant. L'objectif de ce travail est d'associer des techniques complémentaires, microscopie optique non-linéaire (NLO) et spectroscopie infrarouge à l'échelle nanométrique (nanoIR), permettant une caractérisation physico-chimique multi-échelle. L'étude est tout d'abord effectuée sur des échantillons de référence constitués de collagène purifié, fibrillé puis dénaturé, puis sur des parchemins anciens préservés, dégradés artificiellement ou naturellement. L'enjeu est ici d'identifier les différentes étapes de la dégradation du collagène dans les parchemins, en vue de généraliser ces résultats à d'autres matériaux ou tissus biologiques ou biomimétiques.

2. CORRELATION DES INFORMATIONS MORPHOLOGIQUE ET CHIMIQUE

La microscopie optique non-linéaire permet de réaliser une imagerie tri-dimensionnelle (3D) et non invasive des tissus biologiques. Ces avantages sont également précieux dans le cadre de l'étude d'objets anciens [1]. Cette technique présente l'avantage de pouvoir combiner plusieurs modes de contraste, dont la fluorescence excitée à deux photons (2PEF) et la génération de second harmonique (SHG). Ce dernier signal provient des structures non-centrosymétriques telles que le

collagène fibrillaire. Ainsi, de forts signaux de SHG sont détectés lors de l'imagerie d'un parchemin préservé. L'objectif est ici de mieux comprendre l'évolution des signaux en fonction de l'état de dégradation du collagène, notamment du passage de la structure fibrillaire à l'étape ultime de dénaturation de la triple hélice. Au niveau optique, nous avons montré que cette dénaturation correspond à une disparition des signaux SHG et à l'apparition de signaux de fluorescence. Mais, il est nécessaire d'obtenir une information plus fine d'un point de vue chimique sur le collagène afin de caractériser les différentes étapes de dégradation.

En complément de cette signature spécifique de l'organisation macro-moléculaire du collagène, nous utilisons une technique de spectroscopie infrarouge à l'échelle nanométrique (nanoIR) parfaitement adaptée à la taille caractéristique des fibrilles de collagène (quelques dizaines à quelques centaines de nanomètre) [2]. Cette technique couple une imagerie topographique AFM (à l'échelle nanométrique) avec une information chimique liée à l'absorption infrarouge du matériau sous la pointe AFM. Il est ainsi possible d'acquérir des spectres infrarouges localement avec une résolution de quelques dizaines de nanomètres ou bien de réaliser des cartographies d'absorption à une longueur d'onde fixée.

Grace à cette technique, nous avons pu montrer que la dégradation du collagène est corrélée à l'apparition d'une bande d'absorption autour de 1730 cm^{-1} [3].

La corrélation de l'information morphologique obtenue par microscopie optique non-linéaire à l'information chimique issue des spectres infrarouges permet ainsi de suivre la dégradation du collagène [3]. L'objectif étant à terme de relier cette information aux différentes étapes d'altération des parchemins.

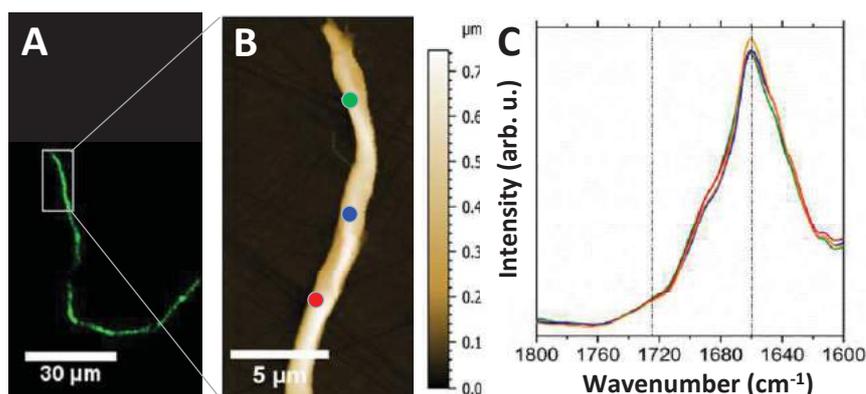


Fig. 1 : Imagerie corrélative SHG / nanoIR d'une fibrille de collagène. A : image SHG. B : cartographie AFM. C : spectres infra-rouge acquis aux points de couleur en B [3].

RÉFÉRENCES

- [1] G. Latour, J.P. Echard, M. Didier, M.C. Schanne-Klein, "In situ 3D characterization of historical coatings and wood using multimodal nonlinear optical microscopy", *Opt. Express*, vol. 20, pp. 24623-24635, 2012
- [2] A. Dazzi, C.B. Prater, Q. Hu, D.B. Chase, J.F. Rabolt, C. Marott, "AFM-IR: Combining AFM microscopy and infrared spectroscopy for nanoscale chemical characterization", *Appl. Spectrosc.*, vol. 66, pp. 1365-1384, 2012
- [3] G. Latour, L. Robinet, A. Dazzi, F. Portier, A. Deniset-Besseau, M.C. Schanne-Klein, "Correlative nonlinear optical microscopy and infrared spectroscopy reveals collagen degradation in altered parchments", *Sci. Reports* (in revision)

WAVEFRONT SHAPING FOR STRUCTURAL NONLINEAR MICROSCOPY

Hilton B. de Aguiar¹, Sylvain Gigan², Sophie Brasselet¹

¹ Aix-Marseille Université, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel UMR 7249, 13013 Marseille, France

² Laboratoire Kastler Brossel, UMR 8552 of CNRS and Université Pierre et Marie Curie, 24 rue Lhomond, 75005 Paris, France

h.aguiar@fresnel.fr

RÉSUMÉ

Molecular structural imaging lacks penetration depth in biological tissues. We will present our latest results on extending the wavefront shaping of scattered light for enabling it.

MOTS-CLEFS : *speckle; nonlinear microscopy; wavefront shaping.*

1. INTRODUCTION

Nonlinear microscopy (NLM) is a powerful approach for molecular structural imaging of biological tissues [1], most notably in label-free methods such as Second- and Third Harmonic Generation, and Coherent Raman Scattering microscopies. Despite widespread applications in many fields, nonlinear imaging modalities can only image at shallow depths in scattering media (a few hundreds of micrometers for biological specimens). This small penetration depth is hampered by optical aberrations and scattering phenomena, which degrade the spatial quality of focusing and decrease the spatiotemporal coherence of excitation fields. In order to enhance the penetration depth, adaptive optics techniques have been translated to NLM, mostly focused on pre-compensation from intrinsic aberrations. Because of only mild enhancements of nonlinear signal, adaptive optics is still limited to depths of a few scattering mean free path, since it addresses ballistic photons. It is also based on optimization of a nonlinear signal, which prevents applications in deep regions due to the strong nonlinear dependence on the feedback signal.

Wavefront shaping can overcome penetration depths limits in highly scattering media, by addressing scattered photons [2,3]. Despite the random appearance of the outgoing speckle pattern arising from multiple scattering events, it has nevertheless a deterministic relation with the original incoming wavefront, revealed in the Transmission Matrix (TM) of the scattering medium that connects incoming to outgoing fields [3]. Once the TM has been characterized, it can be used to increase the energy density at targeted positions, resembling a focus, thus inducing a nonlinear process locally.

2. RESULTS

Here we present our latest results on extending the wavefront shaping technique for enabling polarization-resolved nonlinear microscopy.

We will first show how wavefront shaping can enhance the SHG signal of nanoscopic sources by orders of magnitude (Figure 1.a) [4]. Furthermore, we will discuss feedback mechanisms (linear vs. nonlinear) for achieving strong nonlinear enhancement of four orders of magnitude. We will discuss in which experimental situations wavefront shaping can be used and where it may fail.

In a second part of our contribution, we will focus on the evolution of the polarization states in multiply scattering media. Currently, the methods developed for molecular structural microscopy use a polarization-resolved approach [1], which is not applicable in strongly scattering environments because of depolarization effects [5]. We will show how a wavefront shaping

approach is able to obtain a highly pure polarization state [6], even though an unshaped wavefront generates a depolarized state (Figure 1.b).

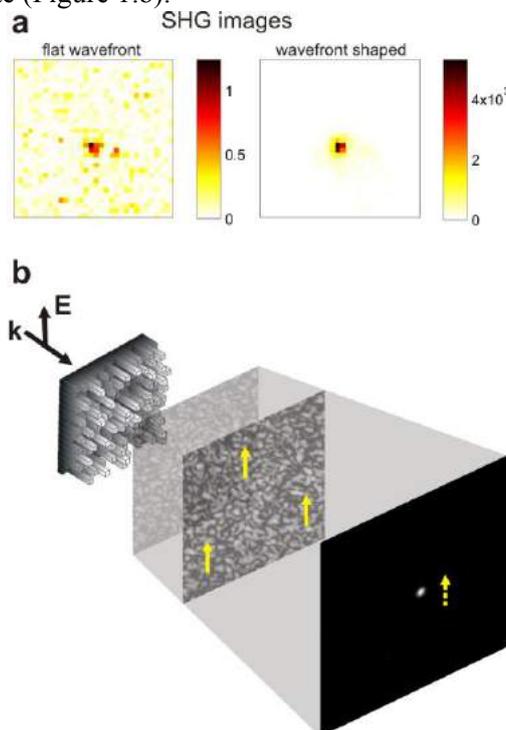


Fig. 1 : Wavefront shaping for nonlinear and structural microscopy. (a) A single nanoparticle is located in the center of the field of view (left panel). After wavefront shaping, the SHG intensity is considerably enhanced by orders of magnitude (right panel). (b) A shaped wavefront is not only able to refocus scattered light, but also to retrieve a pure polarization state that can be used for structural microscopy. Without wavefront shaping, the speckle has a random elliptical polarization that cannot be used for microscopy (not shown).

CONCLUSION

Our results demonstrate that wavefront shaping may enable structural microscopy in deep regions of biological specimens. Currently, this approach is able to perform *imaging* experiments through 1mm thick samples. Although we focused on transmission-geometry experiments, the challenging epi-imaging modality is still to be tackled, and we are exploiting new methods towards this direction.

RÉFÉRENCES

- [1] Brasselet, S., “Polarization-resolved nonlinear microscopy: application to structural molecular and biological imaging,” *Adv. Opt. Photon.*, Vol. 3, pp. 205–271, 2011.
- [2] Vellekoop, I. M. and A. P. Mosk, “Focusing coherent light through opaque strongly scattering media,” *Opt. Lett.*, Vol. 32, 2309–2311, 2007.
- [3] Popoff, S. M., G. Lerosey, R. Carminati, M. Fink, A. C. Boccara and S. Gigan, “Measuring the Transmission Matrix in Optics: An Approach to the Study and Control of Light Propagation in Disordered Media,” *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 104, 100601, 2010.
- [4] de Aguiar, H. B., S. Gigan and S. Brasselet. “Enhanced nonlinear imaging through scattering media using transmission matrix based wavefront shaping.” arXiv:1603.07092, 2016.
- [5] de Aguiar, H. B., P. Gasecka and S. Brasselet. “Quantitative analysis of light scattering in polarization-resolved nonlinear microscopy,” *Opt. Express.*, Vol. 23, 8960–8973, 2015.
- [6] de Aguiar, H. B., S. Gigan and S. Brasselet. “Polarization-resolved microscopy through scattering media via wavefront shaping.” arXiv:1511.02347, 2015.

MICROSCOPIE ELECTRO-OPTIQUE

Clément Lafargue, Bassam Hajj, Duc Thien Trinh and Joseph Zyss

Laboratoire de Photonique Quantique et Moléculaire, ENS de Cachan, Université Paris-Saclay, Cachan, France.

clement.lafargue@ens-cachan.fr

RÉSUMÉ

Le prototype de microscopie électro-optique (EO) est un dispositif optique permettant de scanner et d'imager les propriétés électro-optiques d'échantillons sous microscope. Point par point, la variation de l'indice de réfraction du matériau sous l'action d'un champ électrique est mesurée localement par interférométrie.

Cette propriété est fondamentalement liée à la structure électronique du matériau à l'échelle nanométrique et complémentaire de la susceptibilité optique d'ordre deux, mesurable par génération de seconde harmonique (cf plateforme microscopie multiphotonique). La technique a l'avantage de ne nécessiter qu'une simple source laser continue à faible coût.

MOTS-CLEFS : *Microscopie non-linéaire, effet Pockels, membrane cellulaire*

1. INTRODUCTION

La microscopie EO est une nouvelle méthode d'imagerie basée sur l'effet Pockels qui est une variante d'effet non-linéaire quadratique classiquement utilisée en modulation électrooptique. En appliquant un champ électrique connu, on mesure les propriétés non-linéaires du milieu pour un couple de fréquences laser-champ appliqué. L'approche inverse consiste à utiliser un matériau électrooptique caractérisé par ailleurs pour mesurer le champ électrique. Il s'agit d'une mesure tout-optique sans contact, donc moins invasive que la méthode patch clamp usuelle, ce qui pourrait trouver une application importante dans la mesure de potentiel membranaire ou neuronal.

Comme en SHG, les propriétés EO s'expriment par un tenseur, dont les composantes peuvent être individualisées par une étude résolue en polarisations. Ces propriétés résultent en général de l'organisation collective de molécules dont la structure et le mode d'organisation sont anisotropes. En biologie, cette détermination tensorielle est particulièrement intéressante compte tenu du lien entre organisation moléculaire et fonctionnalités biologiques, comme par exemple dans les membranes cellulaires. Le but de ce poster est de faire une revue des avancées réalisées sur le sujet dans le cadre de collaborations variées.

2. RESULTATS SCIENTIFIQUES

Un prototype de recherche de PLEOM de première génération a été développé au LPQM [1,2] et appliqué avec succès à l'étude de certains matériaux artificiels, tels des couches minces de polymères non-linéaires [3,6], des nano- ou des micro-structures à base de cristaux ferroélectriques (KTP et Niobate de Lithium) [5,7,8] (cf. figure 1) ainsi que des membranes biomimétiques dopées en molécules non-linéaires [4].

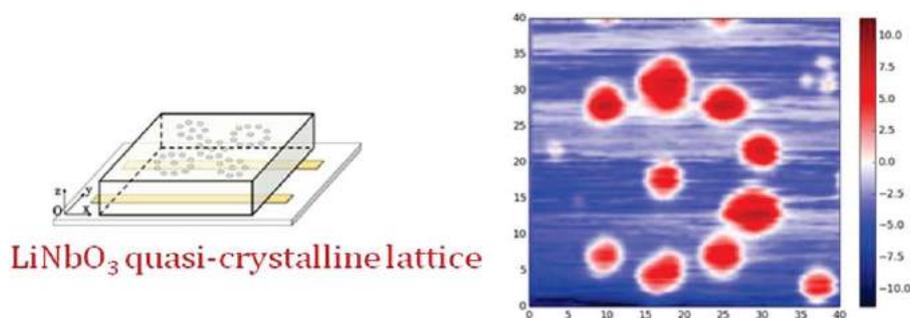


Fig. 1 : Gauche, cristal ferroélectrique artificiellement retourné suivant un motif quasi-périodique [7]. Droite, image EO du cristal soumis à un champ électrique quasi-statique. On distingue les domaines imparfaitement créés. Le niveau de couleur est l'image du déphasage Pockels subi par le laser dans le cristal.

3. PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

L'emphase est mise actuellement sur l'étude de cellules et de membranes biologiques [9], ainsi que sur les nanostructures à base de protéines, dans le cadre de collaborations avec des oncologues de l'Institut Gustave Roussy d'une part et des physico-chimistes de l'université de tel-Aviv d'autre part. Pour l'imagerie cellulaire, il a été montré que la membrane cellulaire possède une réponse électro-optique dont l'origine physique reste à établir, vu la composition chimique a priori symétrique (et donc a priori non sensible à l'effet EO) de la membrane.

RÉFÉRENCES

- [1] J. Zyss and T. Toury, 'Non-invasive electric-filed-detection device and method', patent US20080007248 A1, 10-Jan-2008.
- [2] T. Toury and J. Zyss, 'Device and method for the non-invasive detection and measurement of the properties of a medium', patent US7710573 B2, 04-May-2010.
- [3] T. Toury, et al. *Opt. Lett.* 31 (10), 1468–1470 (2006)
- [4] B. Hajj, et al. *Biophysical Journal* 97 (11) 2913–2921 (2009).
- [5] B. Hajj, et al. *Opt. Express* 19 (10) 9000–9007 (2011).
- [6] B. Hajj, et al. 'Performance and Quality Characterization of the Reference MNA Nonlinear Optical Molecular Crystal by Pockels Electrooptic Confocal Microscopy', *Advanced Optical Materials*, p 1088–1095, Apr. 2015.
- [7] D. T. Trinh, et al. *Laser & Photonics Reviews*, 1–10 (2015).
- [8] D. T. Trinh, et al. *Applied Optics* 54 (11) 3412–3421 (2015).
- [9] B. Hajj, "Imagerie électro-optique Pockels aux échelles micro et nanométriques en physique et biophysique," PhD thesis, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2010.

PHOTOEMISSION NON LINEAIRE, UN OUTIL POUR LA PLASMONIQUE

L. Douillard

SPEC CEA CNRS Université Paris-Saclay CEA Saclay Bât. 466 F-91191 Gif sur Yvette

ludovic.douillard@cea.fr

RÉSUMÉ

Un défi majeur au progrès de la plasmonique est le développement de techniques de cartographie du champ proche optique aux échelles nanométriques. La méthode de cartographie usuellement mise en jeu est la microscopie optique en champ proche à balayage de sonde (*scanning near field optical microscopy* SNOM / NSOM). Celle-ci autorise des résolutions spatiales de l'ordre de 30 - 100 nm, toutefois la mesure procède par insertion d'une pointe sonde dans l'espace de mesure avec pour conséquence de potentielles perturbations liées au couplage pointe sonde / objet d'étude.

Une approche alternative consiste en la mise en œuvre de la microscopie de photoémission d'électrons (*photoemission electron microscopy* PEEM). En effet, la présence de plasmons de surface exacerbe les processus photoélectriques non linéaires. La collection des électrons photoémis donne accès à la distribution bidimensionnelle du champ électromagnétique au voisinage immédiat d'objets métalliques (réservoirs d'électrons). Cette microscopie fournit des images plein champ, d'une résolution spatiale de l'ordre de 20 nm, voire 3 nm sur les instruments bénéficiant d'une correction des aberrations des optiques électroniques.

La microscopie PEEM offre une combinaison de résolutions spatiale et spectrale unique pour l'étude quantitative de questions clés de la plasmonique : nanoparticules métalliques, assemblages de nanoparticules métalliques, nanoantennes, films métalliques rugueux...

Ce séminaire donnera un aperçu des possibilités de la photoémission d'électrons comme outil pour la plasmonique. L'accent sera mis sur quelques résultats relatifs à la cartographie haute résolution du champ proche optique d'objets nanométriques [1], la dynamique spatio-temporelle de plasmons-polaritons [2], et la manipulation du champ proche optique par le biais du contrôle de la polarisation de la source d'excitation [3].

MOTS-CLEFS : *photoémission, PEEM, plasmon*

RÉFÉRENCES

- [1] C. Hrelescu *et al.*, "Selective excitation of individual plasmonic hotspots at the tips of single gold nanostars," *Nano Lett.*, vol. 11 pp. 402, 2011; C. Awada *et al.*, "Selective Excitation of Plasmon Resonances of Single Au Triangles by Polarization Dependent Light Excitation," *J. of Phys. Chem. C* vol. 16, pp. 14591 2012
- [2] A. Kubo *et al.*, "Femtosecond microscopy of surface plasmon polariton wave packet evolution at the silver/vacuum interface," *Nano Lett.* vol. 7, pp. 470, 2007; L. Douillard *et al.*, "Short range plasmon resonators probed by photoemission electron microscopy," *Nano Lett.* vol. 8, pp. 935, 2008; Lee *et al.*, "Loss mechanisms of surface plasmon polaritons propagating on a smooth polycrystalline Cu surface," *Optics Express* vol. 20, pp. 8974, 2012
- [3] M. Aeschlimann *et al.*, "Adaptive subwavelength control of nano-optical fields," *Nature* vol. 446, pp. 301, 2007 et références associées.

QUAND LES ÉLECTRONS CHAUDS PIMENTENT LA PLASMONIQUE

**Bruno Palpant¹, Timothée Labouret¹, Xiaoli Wang², Jean-Frédéric Audibert³, Robert Pansu³,
Nadia Djellali¹, Roberta Moreira⁴, Jose Gonzalo⁴**

¹ Laboratoire de Photonique Quantique et Moléculaire, CentraleSupélec, ENS Cachan, CNRS, Université Paris-Saclay, Grande Voie des Vignes, 92290 Châtenay-Malabry, France

² Laboratory of Nanomaterials, National Center for Nanoscience and Technology, Beiyitia No. 11, Zhongguancun, Beijing, 100190, P. R. China

³ Laboratoire de Photophysique et Photochimie Supramoléculaires et Macromoléculaires, ENS Cachan, CNRS, Université Paris-Saclay, 61, avenue du Président Wilson, 94230 Cachan, France

⁴ Laser Processing Group, Instituto de Óptica, CSIC, Serrano 121, 28006 Madrid, Spain.

bruno.palpant@centralesupelec.fr

RÉSUMÉ

Le confinement des électrons dans des objets métalliques de dimensions très petites devant la longueur d'onde de la lumière induit de nouvelles propriétés optiques dominées par le phénomène de *résonance plasmon localisé*. Éclairer des nanostructures plasmoniques à la résonance conduit à la fois à l'exaltation du champ électromagnétique local et à une conversion photothermique efficace. Les nanostructures se comportent alors comme des nanosources de chaleur. Elles font l'objet de nombreux développements actuels, en particulier dans le domaine biomédical. Si l'on réalise l'éclairage par des impulsions ultrabrèves, on peut non seulement modifier le rayon d'action thermique de ces nanosources, mais également générer de nouveaux phénomènes. En effet, l'injection ultracourte d'énergie dans le gaz d'électrons de conduction induit une modulation transitoire notable de la réponse optique des nano-objets, voire même la production locale d'un plasma. Ce dernier, sous l'effet du champ exalté par la résonance, peut être exploité à des fins thérapeutiques.

MOTS-CLEFS : *plasmon ; impulsion ; ultrarapide ; électrons*

1. INTRODUCTION

Les nanostructures présentant une résonance plasmon localisé sous excitation lumineuse sont largement exploitées pour leur capacité à exalter fortement le champ électromagnétique local et à convertir efficacement la lumière en chaleur à l'échelle nanométrique. Au-delà, de nouvelles propriétés peuvent émerger lorsque de telles nanostructures absorbent des impulsions lumineuses ultrabrèves. En effet, la distribution électronique est modifiée par cet apport d'énergie, conduisant à un gaz d'électrons chauds qui relaxe vers l'équilibre par radiation, émission d'électrons et diffusion électron-phonon. Les propriétés électromagnétiques des nanostructures évoluent au cours de ces processus, résultant en la modification de leur réponse optique et de l'exaltation du champ local [1]. Au-delà, leur environnement proche peut aussi être affecté par éjection d'électrons et échauffement. Dans cette communication, ces principes seront illustrés à travers deux développements.

2. MODULATION ULTRARAPIDE DES PROPRIÉTÉS OPTIQUES DE NANOPARTICULES

Après avoir présenté le phénomène de plasmon localisé et les propriétés de base liées à la conversion de lumière en chaleur via la résonance plasmonique, nous montrerons comment la modulation ultrarapide des propriétés optiques de nanoparticules d'or sous irradiation laser impulsionnelle, induite par la perturbation de la distribution électronique par injection ultrabrève d'énergie [2], peut être notablement amplifiée par couplage du mode plasmon localisé avec des modes photoniques localisés. Pour cela, une microcavité hybride contenant des nanosphères d'or a été conçue. Sa réponse optique transitoire a été mesurée par spectroscopie pompe-sonde large bande [3].

3. PHOTOGENERATION D'UN NANO-PLASMA

Après avoir présenté le phénomène de plasmon localisé et les propriétés de base liées à la conversion de lumière en chaleur via la résonance plasmonique, nous démontrerons la production d'un plasma nanométrique par un nanobâtonnet d'or unique dans l'eau, irradié par des impulsions laser sub-picoseconde accordées à la résonance plasmon longitudinale. Les électrons éjectés du métal lorsque leur énergie excède la fonction de travail accroissent encore leur énergie sous l'effet du fort champ local régnant autour des nanobâtonnets [4]. Ils peuvent alors ioniser l'oxygène et les molécules d'eau sur un domaine de plusieurs microns d'envergure, résultant en la production efficace d'espèces réactives de l'oxygène (ROS) qui sont connues pour induire la mort cellulaire en milieu vivant. Si la forme des nanobâtonnets est choisie de manière à ce que leur résonance plasmon longitudinale corresponde à la fenêtre de transparence des tissus biologiques, l'irradiation laser pulsée de tels nano-objets peut constituer un outil pertinent pour la photothérapie dynamique. En utilisant une sonde fluorescente sensible à la présence de $\bullet\text{OH}$ et $^1\text{O}_2$, nous montrons par imagerie de fluorescence que la production de ROS par un nanobâtonnet d'or unique varie avec l'orientation de celui-ci par rapport à la polarisation de la lumière (Fig. 1) [5]. Le phénomène est interprété grâce à un modèle permettant de décrire la photo-génération du plasma, l'influence du champ local et l'ionisation des molécules.

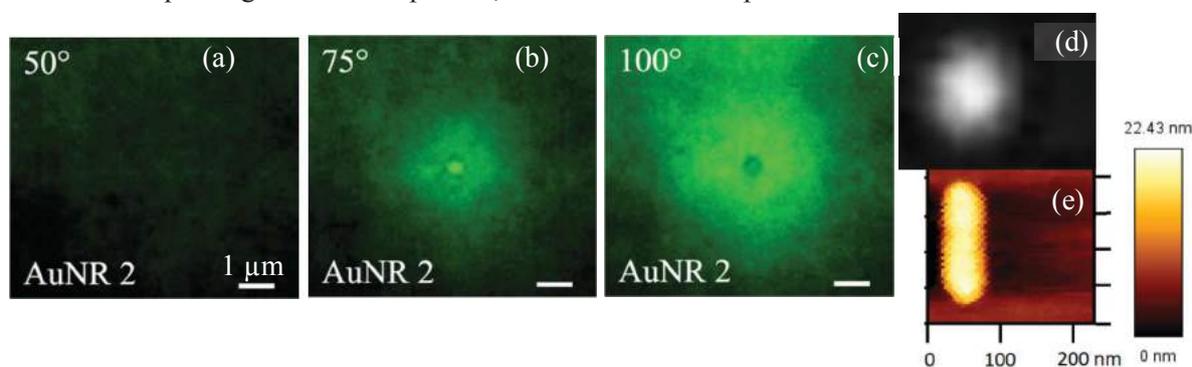


Fig 1: (a)-(c) Images de microscopie de fluorescence démontrant la production d'espèces réactives de l'oxygène par un nanobâtonnet d'or unique dans l'eau irradié par une impulsion de 400 fs à 3 angles de polarisation. Le spot central brillant en (b) correspond à la photoluminescence de la nanoparticule. Le spot central sombre en (c) correspond à l'extinction de fluorescence due à l'excès de ROS. (d) Image de diffusion en champ sombre d'un nanobâtonnet irradié, en l'absence de fluorophore, montrant une émission lumineuse dans la limite de diffraction. (e) Image AFM du même nanobâtonnet qu'en (d).

CONCLUSION

Ces deux exemples très différents illustrent le potentiel des électrons chauds photo-générés dans des nanostructures métalliques pour élargir le champ d'application du plasmon localisé.

RÉFÉRENCES

- [1] Y. Guillet, M. Rashidi-Huyeh and B. Palpant, "Influence of laser pulse characteristics on the hot electron contribution to the third-order nonlinear optical response of gold nanoparticles", *Phys. Rev. B*, Vol. 79, p. 045410, 2009.
- [2] X. Wang, Y. Guillet, P. R. Selvakannan, H. Remita and B. Palpant. "Spectral signature of the ultrafast optical response of gold nanorods". *J. Phys. Chem. C*, Vol. 119, p. 7416, 2015.
- [3] X. Wang, R. Moreira, J. Gonzalez and B. Palpant. "Coupling localised plasmonic and photonic modes tailors and boosts ultrafast light modulation by gold nanoparticles". *Nano Lett.*, Vol. 15, p. 2633, 2015.
- [4] E. Boulais, R. Lachaine and M. Meunier, "Plasma-mediated nanocavitation and photothermal effects in ultrafast laser irradiation of gold nanorods in water", *J. Phys. Chem. C*, Vol. 117, pp. 9386-9396, 2013.
- [5] T. Labouret, J.-F. Audibert, R. Pansu and B. Palpant. "Plasmon-assisted production of reactive oxygen species by single gold nanorods", *Small*, Vol. 11, p. 4475, 2015.

UNE NANOSOURCE DE PHOTONS ET DE PLASMONS

Elizabeth Boer-Duchemin

Institut des Sciences Moléculaires d'Orsay (ISMO), Université Paris-Sud, Orsay, France

Elizabeth.Boer-Duchemin@u-psud.fr

Les nanostructures plasmoniques sont des objets métalliques caractérisés en ce qu'au moins une de leurs dimensions est à l'échelle nanométrique (par ex., des nanoparticules, des nanofils, des couches minces, etc.) De telles structures peuvent être le siège de *plasmons de surface polaritons (SPP)*, c'est-à-dire des oscillations collectives des électrons à la surface d'un métal, couplées à une onde électromagnétique. Ces plasmons de surface font actuellement l'objet de très nombreuses études, car ils pourraient être amenés un jour à remplacer les électrons dans l'électronique et les photons dans la photonique, menant ainsi à des dispositifs *plasmoniques* qui seraient à la fois très rapide mais toujours de petite taille ($<$ longueur d'onde).

Si les circuits plasmoniques doivent un jour devenir une réalité, il faudra disposer de « nanosources » électriques pour ces plasmons de surface. Une piste pour cela est d'utiliser une jonction tunnel de taille nanométrique. Comme prototype, nous pouvons utiliser la jonction tunnel formée entre la pointe d'un microscope à effet tunnel (STM) et un échantillon métallique. Les plasmons de surface excités sont ensuite transformés en lumière, et ce sont ces photons qui sont détectés.

Dans cet exposé nous considérerons donc l'excitation de plasmons de surface au moyen d'un STM : nous nous intéresserons brièvement aux avantages d'une excitation locale par STM puis nous examinerons ensuite quelques exemples d'excitation de plasmons de surface avec la pointe d'un microscope à effet tunnel. Ces résultats sont issus des expériences plutôt fondamentales[1,2], ainsi que des expériences davantage tournées vers les applications[3].

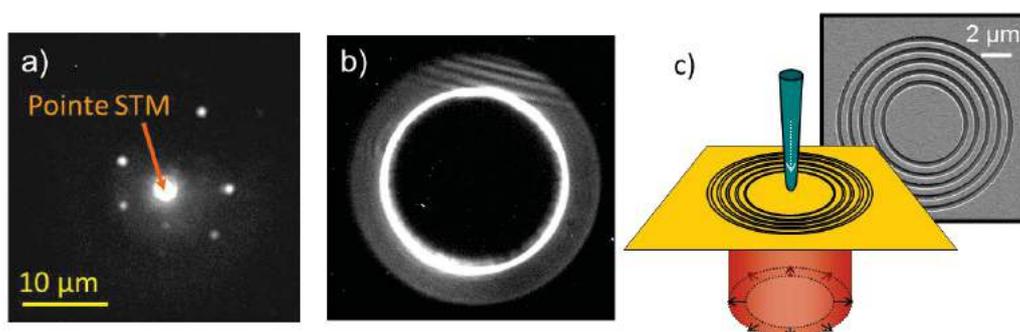


Fig. 1 : Exemples d'expériences d'excitation locale de plasmons de surface avec la pointe d'un microscope à effet tunnel: a) diffusion des plasmons de surface en lumière par des particules d'or ; b) franges d'interférence observées lorsque les SPPs sont excités sur un film d'or où se trouve une fibre organique semiconductrice ; et c) excitation locale d'une « lentille plasmonique » (série de sillons concentriques dans un film d'or) menant à un faisceau de lumière possédant des caractéristiques de polarisation particulières.

RÉFÉRENCES

- [1] Wang, T. et al. Phys. Rev. B 92, 045438 (2015).
- [2] Rogez, B. et al. J. Phys. Chem. C 119, 22217–22224 (2015).
- [3] Cao, S. et al. Appl. Phys. Lett. 105, 111103 (2014).

Détection d'ondes gravitationnelles par interférométrie optique

Matteo Barsuglia

Laboratoire Astroparticule et Cosmologie, France

barsuglia@apc.univ-paris7.fr

RÉSUMÉ

En septembre 2015 les deux interféromètres du projet LIGO ont détecté les ondes gravitationnelles émises par la coalescence d'un système binaire de trous noirs, à une distance d'environ un milliard d'années lumière. Le signal mesuré a une amplitude maximale de $\sim 10^{-18}$ m et une durée d'une fraction de seconde. Après 100 ans de la prédiction de Einstein, cela représente la première détection directe des ondes gravitationnelles et aussi la première observation d'une coalescence d'un système binaire de trous noirs. Après une brève introduction sur la théorie des ondes gravitationnelle et sur leur importance comme nouveaux messagers cosmiques, nous décrirons les principes de détection interférométrique et les techniques utilisées par les interféromètres comme LIGO et Virgo pour atteindre une sensibilité suffisantes pour la détection de ces événements astrophysiques.

MOTS-CLEFS : *ondes gravitationnelles, interférométrie optique, LIGO, Virgo, trous noirs*

1. GW150914, LA PREMIÈRE ONDE GRAVITATIONNELLE OBSERVÉE

Les ondes gravitationnelles sont des vibrations de l'espace temps, produites par l'accélération de distributions de masses, qui se propagent dans l'espace à la vitesse de la lumière. Ces ondes, n'existant pas dans la théorie de la gravitation classique de Newton (qui est une théorie de l'action à distance), ont été prédites par Einstein en 1916 dans le cadre de la théorie de la relativité générale [1,2]. Le 14 septembre 2015 à 9h50 heure de Paris, pour la première fois un signal produit par une onde gravitationnelle a été détecté par les deux interféromètres LIGO Livingston (dans l'état de Louisiane) et LIGO Hanford (à une distance de 3000 km de Livingston, dans l'état de Washington), aux Etats-Unis. Le signal, appelé GW150914, a été détecté en premier à Livingston et après 7 ms (temps compatible avec 10 ms, le temps de vol de la lumière entre les deux sites) à Hanford. Après cinq mois d'analyses de ce signal et de vérifications pour exclure la présence d'un artefact expérimental, les deux Collaborations LIGO et Virgo, travaillant en consortium depuis 2007 sur cette recherche, ont signé un article dans Physical Review Letters [3], qui présente les observations et les analyses effectuées. Plusieurs articles d'accompagnement [4], avec les détails de la découverte ont été aussi écrits. Il s'agit de la première détection directe des ondes gravitationnelles et de la première observation de la phase finale de la vie d'un couple de trous noirs. Il s'agit aussi du premier test de la relativité générale dans un domaine complètement nouveau, où les champs gravitationnels sont très intenses et les vitesses des astres sont proches de la vitesse de la lumière ($\sim 0.5 c$ pour l'évènement détecté). Du point de vue astrophysique, il s'agit de la première détection de trous noirs stellaires avec une masse de l'ordre de 30 masses solaires. Comme le démontre GW150914, la première détection des ondes gravitationnelles représente l'ouverture d'une nouvelle fenêtre observationnelle pour l'astrophysique, en permettant la détection d'évènements et de corps célestes jamais observés avant.

2. LES DÉTECTEURS INTERFÉROMÉTRIQUES D'ONDES GRAVITATIONNELLES

L'effort expérimental pour la détection des ondes gravitationnelles débute dans les années 60, avec les travaux de J.Weber sur les détecteurs à barre résonante. C'est dans les années 1970 que commencent les premiers travaux sur les détecteurs interférométriques et au début des années 2000 un réseau d'interféromètres kilométriques entre en fonction (LIGO, Virgo, GEO). Entre 2002 et 2011 ces détecteurs effectuent plusieurs prises de données (sans aucune détection) et ensuite des améliorations majeures pour augmenter leur sensibilité sont entreprises. La version améliorée de LIGO (Advanced LIGO) commence la prise de donnée en septembre 2015. Le détecteur Européen Advanced Virgo est en phase de fin d'intégration et devra rentrer en fonction à la fin de 2016.

Le principe de la détection interférométrique se base sur le fait que le passage d'une onde gravitationnelle déforme l'espace-temps de façon asymétrique: dans une direction l'espace il est étiré et dans la direction orthogonale il est contracté. Un interféromètre de Michelson est donc un instrument idéal pour cette mesure: le passage de l'onde change la longueur relative entre deux bras orthogonaux et induit ainsi un décalage de l'interférence entre les deux faisceaux. Malgré la simplicité de ce concept, la difficulté de la détection des ondes gravitationnelles (qui a demandé environ 40 ans depuis les premiers efforts expérimentaux) est due à l'extrême faiblesse de l'amplitude des ondes. Le signal détecté par LIGO en septembre 2014 a provoqué un étirement de l'espace de 10^{-21} pendant une fraction de seconde, qui correspond à un changement relatif de la longueur des bras de l'ordre de 10^{-18} m. Pour le détecteur il faut donc réduire de plusieurs ordres de grandeur tous les bruits intrinsèques à la mesure et les bruits dus à l'environnement.

Premièrement, les miroirs de l'interféromètre (les *masses tests*) doivent être des *masses libres*, donc assujetties seulement à la gravité et pas à d'autres forces. Cette condition peut être réalisée en suspendant les masses à des pendules. Les pendules sont utilisées aussi pour éliminer le bruit sismique (géologique ou anthropologique) qui limite la sensibilité de plusieurs ordres de grandeur. Des chaînes de suspensions, combinant des systèmes actifs (asservissements utilisant des sismomètres et accéléromètres) et passifs (pendules, ressorts) sont utilisés par LIGO et par Virgo.

Le bruit lié à la mesure même (*le bruit quantique*) doit être aussi réduit: dans LIGO et Virgo le signal d'onde gravitationnelle est amplifié en modifiant le schéma optique de l'instrument (avec des cavités Fabry Pérot dans le bras, et en utilisant les techniques du *recyclage de la puissance* et du *recyclage du signal*). Des lasers puissants sont aussi utilisés pour diminuer l'influence du bruit de photons. Dans les versions initiales des détecteurs, seul ce dernier avait une importance, mais dans les détecteurs avancés, le bruit de *pression de radiation* commence aussi à limiter la sensibilité.

D'autres bruits, à la fois *techniques* et *fondamentaux* doivent être étudiés et réduits pour arriver la sensibilité nécessaire pour détecter des événements comme GW150914. Nous décrirons en détail les différentes techniques utilisées par LIGO et Virgo ainsi que l'effort international pour améliorer ultérieurement la sensibilité de ces détecteurs interférométriques.

RÉFÉRENCES

- [1] A. Einstein, Sitzungsber. K. Preuss. Akad. Wiss. 1, 688 (1916).
- [2] A. Einstein, Sitzungsber. K. Preuss. Akad. Wiss. 1, 154 (1918).
- [3] B.P.Abbot et al. (LIGO and Virgo Collaborations) *Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger*, PRL 116, 061102 (2016) and references therein
- [4] <https://papers.ligo.org/>

Les optiques EUV de la mission spatiale Solar Orbiter

Auchère, F., Delmotte, F., Mercier R.

¹Institut d'Astrophysique Spatiale, Bâtiment 121, CNRS, Univ Paris Sud 11, 91405 Orsay, France

²Laboratoire Charles Fabry, Institut d'Optique, CNRS, Univ Paris Sud 11, 2 Avenue Augustin Fresnel, 91127 Palaiseau cedex

frederic.auchere@ias.u-psud.fr

RÉSUMÉ

Depuis les premières expériences embarquées à bord de fusées sondes jusqu'aux satellites modernes d'aujourd'hui, la compréhension de la physique de notre étoile a beaucoup bénéficié des progrès de l'optique X/UV. En effet ce domaine permet de sonder les couches de l'atmosphère solaire où les processus de transfert d'énergie responsables des diverses formes d'activité ont lieu. Nous effectuons une brève revue de cet héritage, en nous concentrant sur l'apparition des optiques multicouches. Nous présentons ensuite les développements technologiques effectués actuellement pour les futurs instruments spatiaux d'observation du Soleil, et en particulier les optiques EUV développées pour la mission Solar Orbiter de l'Agence Spatiale Européenne qui sera lancée en 2018.

MOTS-CLEFS : *Soleil, Optique UV, Multicouches*

1. INTRODUCTION

La couronne du Soleil est le siège de mécanismes toujours mal compris qui accélèrent le plasma pour former le vent solaire qui se propage dans l'héliosphère à vitesse supersonique. A l'intérieur de l'étoile, le champ magnétique créé par des effets dynamo est transporté vers la surface où il forme de larges boucles qui sont ensuite étirées et cisailées par la rotation différentielle de l'étoile, accumulant ainsi de grandes quantités d'énergie. Il peut alors se produire des éruptions qui éjectent ces structures magnétiques et le plasma associé à travers le système solaire, provoquant éventuellement des collisions avec le bouclier magnétique de la Terre. Comprendre les processus physiques à l'œuvre dans ce système complexe est le but de ce que l'on appelle maintenant l'héliophysique. Le Soleil étant typique d'étoiles peu massives, ce domaine de recherche concerne l'astrophysique en général, mais est unique car le Soleil est la seule étoile suffisamment proche pour être étudiée avec tout le détail nécessaire.

Il n'existe pas un domaine de longueur d'onde ni une technique d'observation privilégié pour l'étude du Soleil. Les domaines spectraux étudiés vont des gammas aux ondes radio, le choix de telle ou telle gamme de longueur d'onde dépend des phénomènes physiques et/ou des couches de l'étoile que l'on désire sonder. Le domaine X/UV est particulièrement adapté à l'étude aux couronnes du Soleil et des étoiles, c'est-à-dire leurs enveloppes les plus externes. En effet, si la couronne est bien visible en lumière blanche (c'est elle qui est révélée durant les éclipses totales), du fait des températures de plusieurs million de degrés atteintes par les plasmas coronaux, la plupart des raies spectrales sont émises à plus courtes longueurs d'onde.

2. LA MISSION SOLAR ORBITER

Le 4 octobre 2011, le Comité des Programmes Scientifiques (SPC) de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) approuvé la mission Solar Orbiter. Prevue pour être lancée e, octobre 2018, elle emportera une charge utile de dix instruments dédiés à l'étude du Soleil et de l'héliosphère, la bulle creusée par la pression du vent

solaire dans le milieu interstellaire local. L'orbite de la sonde a été spécialement conçue pour permettre pour la première fois d'amener une batterie complète d'instruments *in situ* et de télédétection proche du Soleil (0.28 Unité Astronomique) et hors du plan de l'écliptique. En plus de vues à haute résolution (environ 100 km sur le Soleil) et la possibilité d'observer les pôles (jusqu'à 30° d'inclinaison par rapport à l'équateur solaire), cette orbite réduit la rotation apparente du Soleil durant les passages au périhélie, permettant ainsi des observations prolongées des régions sources qui produisent les perturbations mesurées *in situ* dans le vent solaire. Solar Orbiter est une mission très ambitieuse non seulement scientifiquement, mais aussi techniquement. Car la sonde et son instrumentation seront soumises à un environnement très rude nécessitant des solutions spécifiques.

Quatre des cinq instruments de télédétection fonctionnent dans le domaine X/UV (EUI, SPICE, STIX et METIS). Nous nous concentrerons sur EUI (Extrême Ultraviolet Imager, Figure 1, [1]) pour lequel l'IO et l'IAS développent les optiques. EUI se compose de deux imageurs à haute résolution HRI (High Resolution Imager) observant à 174 Å (Fe X) et 1216 Å (H I Lyman α) et d'un imageur à grand champ FSI (Full Sun Imager) qui fonctionne à 174 Å et 304 Å (He II). Le champ d'observation de HRI est de 16.6 minutes d'arc et la résolution spatiale de 0.5 seconde d'arc. Le champ d'observation de FSI est de 5 degrés avec une résolution spatiale de 4.5 secondes d'arc.

Pour HRI et FSI, nous avons développé des multicouches Al/Mo/B4C et Al/Mo/SiC qui permettent des gains de réflectivité importants par rapport à la combinaison Mo/Si, environ un facteur 2 sur un système à deux miroirs (Figure 2, [2, 3]). FSI utilise un concept novateur : celui des multicouches double-bande [4]. Ces dépôts sont constitués d'un empilement de deux multicouches séparées par une couche d'espacement. La multicouche de base est une structure classique dont on utilise les premier et deuxième ordres. La multicouche supérieure est constituée de quelques périodes et permet de moduler la réflectivité de la multicouche inférieure. En jouant sur les paramètres de la multicouche supérieure et l'épaisseur de la couche d'espacement, on peut modifier la position des pics ainsi que le nombre et la position des extinctions créés par les interférences entre les deux structures [5, 6]. La Figure 3 montre la réflectivité d'un dépôt 171/304 Å développé pour FSI. Le filtre Aluminium situé à l'entrée de l'instrument laisse passer les deux longueurs d'onde. Au plan focal, une roue porte des filtres Al/Mg et Al/Zr permettant d'isoler l'une ou l'autre des deux bandes. Ce design particulier permet un télescope à deux canaux mais n'utilisant qu'une seule pupille, ce qui permet de minimiser à la fois le volume, la masse et la température de l'instrument.

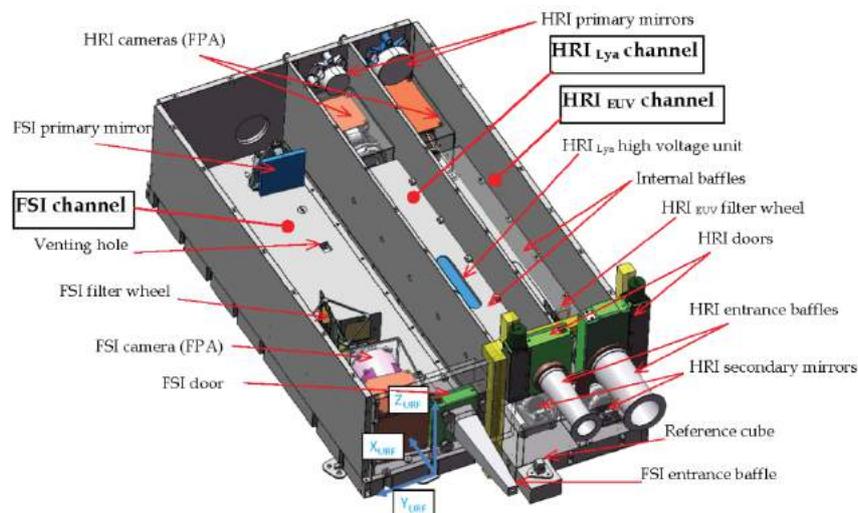


Fig. 1 : CAO de l'instrument EUI de la mission Solar Orbiter.

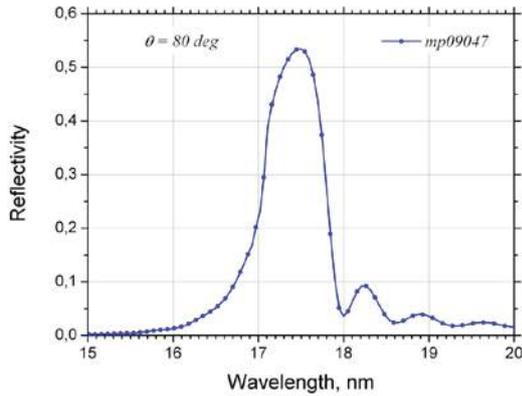


Fig. 2. Réflectivité d'une multicouche Al/Mo/SiC optimisée pour 174 Å.

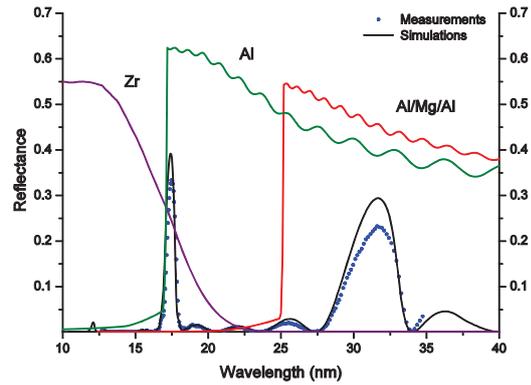


Fig. 3. Réflectivité d'une multicouche double bande 174/304 Å, et transmission des filtres utilisés pour isoler les bandes.

3. PERSPECTIVES

Les travaux récents, par exemple ceux effectués pour Solar Orbiter, montrent que des progrès significatifs peuvent encore être attendus des optiques multicouches développées pour l'astrophysique, que ce soit par l'utilisation de nouveaux matériaux ou de structures complexes. En plus de gains de réflectivité et d'une plus grande flexibilité dans la forme des bandes passantes obtenues, il existe un besoin net d'étendre la gamme de longueurs d'onde utilisables, en particulier entre 40 Å à 1000 Å où les efficacités des optiques est pour l'instant faible. Mais les développements nécessaires ne se limitent pas aux quelques thématiques évoquées ici. Par exemple, des polariseurs efficaces en UV/EUV permettraient d'avoir accès au champ magnétique dans la couronne du Soleil. Or bien que cette quantité soit particulièrement importante pour la compréhension de la physique de l'étoile, elle est aujourd'hui très difficile à mesurer. Ainsi, tout comme les développements des optiques et des détecteurs X/UV ont nourri la recherche en astrophysique, les développements technologiques à venir seront eux aussi porteurs de nouvelles découvertes.

RÉFÉRENCES

1. J.-P. Halain et al., Proc. SPIE, 7732, 20 (2010)
2. E. Meltchakov et al., Appl. Phys. A, **98**, 111 (2010)
3. E. Meltchakov et al., Proc. SPIE, **8168**, 59 (2011)
4. F. Auchère et al., Proc. SPIE, **5901**, 298 (2005)
5. J. Gautier et al., Opt. Comm. **281**(11), 3032 (2008)
6. C. Hecquet et al., Appl. Phys. A, **95**, 401 (2009)

ARCHITECTURE OPTIQUE DU SONDEUR INFRAROUGE IASI-NG

Clément LUITOT¹, Alice ROBERT², Joël BOYADJIAN², Frédéric BERNARD¹, Elisa BALDIT¹

¹ Centre National d'Etudes Spatiales, 18 avenue Edouard BELIN, 31401 Toulouse, France

² Airbus Defence & Space, 31 rue des Cosmonautes, 31402 Toulouse, France

clement.luitot@cnes.fr alice.robert@airbus.com

RÉSUMÉ

IASI-NG (Interféromètre Atmosphérique pour le Sondage Infrarouge – Nouvelle Génération) sera un instrument clé du futur satellite METOP-SG. Il s'agit d'un interféromètre à Transformée de Fourier travaillant dans la bande [3,6 μ m - 15,5 μ m] et dédié à la prévision météorologique opérationnelle, à la chimie atmosphérique et à la surveillance du climat. Les performances de cette nouvelle génération en termes de bruit radiométrique et de résolution spectrale sont accrues d'un facteur 2 par rapport à celle de la première génération d'instrument IASI. Pour ce faire, l'architecture optique de l'instrument proposée par Airbus Defense and Space (ADS) est bâtie autour d'un interféromètre dit de Mertz qui permet une réduction significative du phénomène d'autoapodisation. Cet article se propose de revenir plus en détail sur cette architecture particulière.

MOTS-CLEFS : *interféromètre, Mertz, autoapodisation, IASI-NG*

1. DE IASI A IASI-NG

L'instrument IASI (Interféromètre Atmosphérique pour le Sondage Infrarouge) est un interféromètre à Transformée de Fourier actuellement embarqué sur le satellite météorologique européen METOP. Les deux premiers modèles de vol ont été lancés respectivement en 2006 et 2012.

Cet instrument a été conçu pour réaliser des sondages atmosphériques, c'est-à-dire remonter, à partir de spectres mesurés par l'instrument, à des profils de variables physiques décrivant l'état de l'atmosphère, comme la température ou l'humidité. La technique de mesure est basée sur l'utilisation d'un Spectromètre à Transformée de Fourier Infrarouge, calibré précisément radiométriquement et spectralement, opérant dans la bande [3,6 μ m – 15,5 μ m] [1][2].

Depuis 2009, le CNES, en coopération EUMETSAT, travaille à la définition et à la réalisation de la prochaine génération de sondeur pour remplacer IASI à l'horizon 2020. Les principales spécifications structurant l'architecture de cet instrument sont respectivement un bruit radiométrique et une résolution spectrale divisés par deux par rapport à celles de son prédécesseur.

2. INTERFEROMETRE DE MERTZ

Combinées, ces deux spécifications conduisent à augmenter à la fois les incidences dans l'interféromètre et sa différence de marche maximale. L'effet résultant est une augmentation inacceptable du phénomène d'autoapodisation. Cet effet, bien connu dans les interféromètres de Michelson, découle de la variation de la différence de marche avec l'incidence sur l'étendue angulaire de la zone de mesure. Elle conduit à une dégradation de la résolution spectrale qui était acceptable sur IASI mais ne l'est plus sur IASI-NG.

Afin de pouvoir concilier grandes incidences et résolution spectrale, Airbus Defense and Space (ADS), maître d'œuvre industriel de IASI-NG, a fait le choix de développer le cœur interférométrique non plus autour d'un Michelson mais utilise un concept d'interféromètre « à champ compensé ». Développé par Mertz et Connes dans les années 60 [3], cette architecture vise

non seulement à introduire une différence de marche entre les deux bras mais également à réduire significativement la variation de différence de marche avec l'incidence.

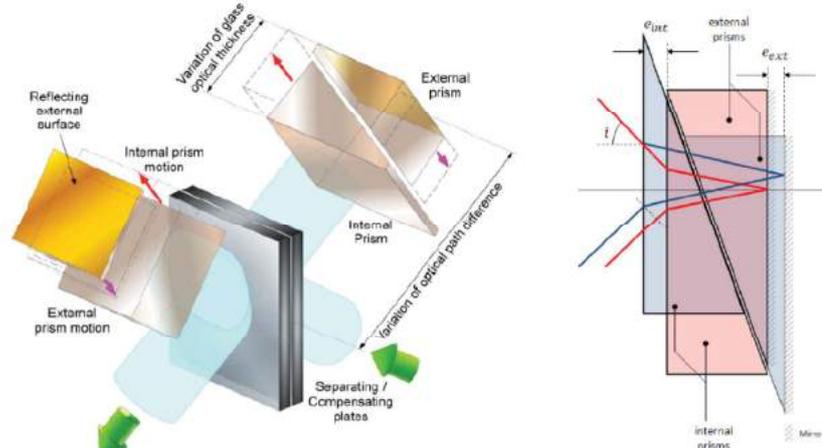


Fig. 1 : (gauche) schéma de principe du cœur interférométrique IASI-NG / (droite) paramètre du calcul de la différence de marche.

La variation de chemin optique est créée par le mouvement simultané de quatre prismes formant deux lames d'épaisseur variable, une dans chacun des bras de l'interféromètre. Un miroir est déposé sur la face arrière de chacune des lames. Le mouvement des prismes dans chacun des bras est opposé afin de réduire la course mécanique des éléments optique. Dans cette configuration, la différence de marche Δ s'écrit à l'ordre 2 en fonction de l'angle d'incidence i , de l'indice de réfraction n , ainsi que des épaisseurs e_{int} et e_{ext} :

$$\Delta = 4n(e_{int} + e_{ext}) - 4 \cdot e_{int} + 2 \cdot i^2 \left(e_{int} - \frac{e_{int} + e_{ext}}{n} \right) + o(i^2) \quad (1)$$

Le mouvement de chacun des prismes interne et externe est synchronisé par un unique mécanisme, qui permet de garantir à chaque instant que :

$$e_{int} - \frac{e_{int} + e_{ext}}{n} = 0 \Leftrightarrow e_{ext} = (n - 1) \cdot e_{int} \quad (2)$$

Ce faisant, la différence de marche ne dépend plus de l'angle d'incidence (à l'ordre 2) et la différence de marche est la même pour toutes les incidences. Elle s'écrit simplement :

$$\Delta = 4 \cdot (n^2 - 1) \cdot e_{int} \quad (3)$$

Dans la pratique, le terme d'ordre 4 s'identifiant à de l'aberration sphérique introduite par les lames, viendra limiter ces incidences dans l'interféromètre.

CONCLUSION

Les performances visées par la nouvelle génération de Spectromètre à Transformée de Fourier IASI-NG imposent une maîtrise de l'autoapodisation. Pour ce faire l'architecture choisie met en œuvre un interféromètre « à champ compensé » qui permet de réduire la variation de différence de marche dans l'interféromètre. Le principe de l'instrument a été validé très tôt dans le développement par une maquette mise en œuvre par ADS. La réalisation d'un modèle d'ingénierie est en cours.

RÉFÉRENCES

[1] G. Chalon, F. Cayla, D. Diabel, "IASI : An Advanced Sounder for Operational Meteorology" , Proc. Congress of IAF 52, 1-5 Oct. 2001. <http://smc.cnes.fr/IASI/Fr/A doc scientifique.htm>.
 [2] L. Buffet, E. Pequignot, D. Blumstein and al., "IASI instrument onboard Metop-A : Lessons learned after almost two years in orbit", Proc. ICSSO Conference, Oct. 2008. <http://smc.cnes.fr/IASI/Fr/A doc scientifique.htm>
 [3] P. Bouchareine, P. Connes, "Interféromètre à champ compensé pour la spectroscopie par transformation de Fourier", Communications à la société française de physique, Vol. 24, pp. 134 - 138, Feb. 1963.

NANO-ABLATION A HAUT RAPPORT DE FORME

**Pierre-Ambroise Lacourt, Chen Xie, Remo Giust, Luc Froehly,
François Courvoisier, John M. Dudley**

*Institut FEMTO-ST - UMR CNRS 6174, Université de Bourgogne Franche-Comté,
15B avenue des Montboucons, 25030 Besançon, France*

pierre-ambroise.lacourt@univ-fcomte.fr

RÉSUMÉ

Malgré les récents progrès des techniques d'ablation laser femtoseconde, la maîtrise de la structuration des diélectriques dans la masse reste délicate, particulièrement à forte intensité ($>10^{13}\text{W/cm}^2$) où les distorsions spatio-temporelles se manifestent. Dernièrement, les faisceaux dits "non-diffractants", comme les faisceaux de Bessel, ont démontré leur efficacité pour contrer ces phénomènes. Dans cette communication, nous décrivons comment les faisceaux de Bessel annulaires, portant une charge topologique, peuvent produire un faisceau tubulaire stable en régime de propagation non-linéaire dans les diélectriques. L'analyse numérique, puis expérimentale, ont confirmé l'apparition de trois régimes (stationnaire, rotatif, quasi-speckle) qui sont étudiés en champ proche et lointain. L'approche expérimentale sera décrite en détail, et permet l'analyse tridimensionnelle de la distribution d'intensité à l'intérieur du matériau. Ces résultats ouvrent de riches perspectives dans les domaines de l'usinage laser (ablation, modification d'indice) ou du guidage par filamentation.

MOTS-CLEFS : *Ablation laser, filamentation, faisceaux de Bessel, micro/nano-usinage*

1. INTRODUCTION

Il a déjà été démontré que les faisceaux de Bessel d'ordre $m = 0$ ont la propriété de se propager de façon stationnaire en régime non-linéaire, même en présence d'absorption non-linéaire [1]. Ceci s'explique par le flux d'énergie optique de l'extérieur vers l'intérieur du faisceau, qui découle du profil conique du faisceau de Bessel [2]. Cette propriété a permis de réaliser des usinages monocoup avec des facteurs de forme de l'ordre de 100:1 voire 1000:1 [3]. Ici, nous étudions la propagation non-linéaire de faisceaux de Bessel d'ordre supérieur, de charge topologique $m > 0$. L'analyse numérique, basée sur l'équation de propagation d'enveloppe unidirectionnelle (UPPE), nous a permis de mettre en évidence l'existence de trois régimes distincts. Ces résultats ont été confrontés à une mesure tridimensionnelle de l'intensité à l'intérieur d'un échantillon. Les perspectives et possibilités de ces faisceaux de Bessel sont évoquées dans le contexte du micro/nano-usinage femtoseconde.

2. METHODES

L'analyse numérique a consisté à propager un faisceau de Bessel généré à l'aide d'un masque de phase de la forme $\Phi(r, \theta) = k \sin(\gamma).r + m\theta$, ce qui correspond à un faisceau de Bessel d'angle conique γ et de charge m , en modélisant la propagation du champ optique à l'aide de l'UPPE dans le domaine spectral [4]. Ce modèle optique est complété par une équation de population pour le plasma, incorporant la photoionisation, l'effet d'avalanche et les recombinaisons. Le profil d'intensité a ainsi été calculé pour des impulsions de 120fs de durée, pour deux angles coniques ($\gamma = 2,8^\circ$ et $6,8^\circ$) et des énergies croissantes (jusqu'à 20 μJ par impulsion), avec une charge topologique $m = 3$. Une série de résultats est représentée sur la Fig.1, comparés aux résultats expérimentaux obtenus par la méthode décrite plus loin (voir Fig.2), ainsi qu'avec le régime linéaire. Ces profils permettent d'identifier trois régimes de propagation caractéristiques, par ordre

d'énergie croissante : un régime stationnaire, où le faisceau maintient un profil stable selon l'axe z ; un régime rotatoire, où le faisceau se sépare en trois filaments qui subissent un mouvement tournant autour de l'axe z ; puis un régime de quasi-speckle, où le profil éclate en filaments multiples.

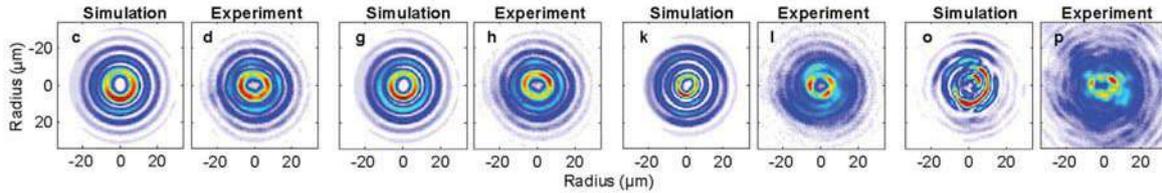


Fig. 1 : Régimes linéaires, stationnaires, rotatoire et quasi-speckle. Angle conique $\gamma = 2,8^\circ$, charge $m = 3$. Résultats numériques et expérimentaux. Energies par impulsions (de gauche à droite) : linéaire, 1 μJ , 5 μJ , 20 μJ .

Les distributions d'intensité expérimentales représentées plus haut ont été obtenues à l'aide du système représenté sur la Fig.2. Le faisceau de Bessel incident est obtenu à l'aide d'un modulateur de phase spatiale (SLM), puis filtré et réduit par un système afocal (f_1 , MO_1). Le champ obtenu se propage ensuite à l'intérieur de l'échantillon, puis le plan souhaité est imagé sur une caméra CCD à l'aide d'un objectif de microscope MO_2 couplé à une lentille relais f_3 . Le cas échéant, une lentille de Bertrand f_2 permet d'observer le spectre spatial. En déplaçant longitudinalement l'ensemble échantillon-objectif, il est ainsi possible de visualiser un plan z quelconque. Comme l'illustre la Fig.1 l'accord entre simulation et expériences est excellent.

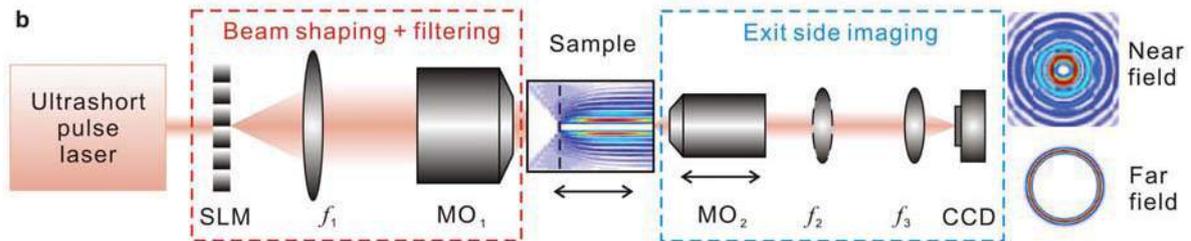


Fig. 2 : Système expérimental pour l'observation des profils d'intensité à l'intérieur d'échantillons diélectriques.

CONCLUSION

L'observation de régimes de propagation non-linéaire stationnaire pour les faisceaux de Bessel couvrant une large plage de paramètres ouvre d'importantes perspectives dans le domaine de l'usinage par laser ultrabref, puisqu'il est alors possible de produire des densités de plasma importantes sur des profils tubulaires de grande profondeur. Nous avons pu ainsi créer des modifications d'indice dans le verre (Corning 0211) capables de guider un faisceau laser à 633 nm, à l'aide de faisceaux d'ordre $m = 3$. La flexibilité offerte par les multiples degrés de liberté propres aux faisceaux de Bessel tubulaires ouvre la voie à de nombreuses applications en usinage, filamentation dans les gaz, guidage par plasma.

RÉFÉRENCES

- [1] Porras, M.A., Parola, A., Faccio, D., Dubietis, A. & Di Trapani, P. Nonlinear unbalanced Bessel beams: stationary conical waves supported by nonlinear losses. *Phys. Rev. Lett.* **93**, 153902 (2004).
- [2] Polesana, P., Francon, M., Couairon, A., Faccio, D. & Di Trapani, P. Filamentation in Kerr media from pulsed Bessel Beams. *Phys. Rev. A* **77**, 043814 (2008).
- [3] Bhuyan, M.K. *et al.* Single shot high aspect ratio bulk nanostructuring of fused silica using chirped controlled ultrafast laser Bessel beams. *Appl. Phys. Lett.* **104**, 021107 (2014).
- [4] Couairon, A. *et al* Practitioner's guide to laser pulse propagation models and simulation. *Eur. Phys. J. Spec. Top.* **199**, 5-76 (2011).

NANOSTRUCTURES POUR LE PHOTOVOLTAÏQUE SOLAIRE

Stéphane Collin^{1,2}

¹ *Laboratoire de Photonique et de Nanostructures (LPN-CNRS), 91460 Marcoussis, France*

² *Institut Photovoltaïque d'Ile-de-France (IPVF), Antony, France*

stephane.collin@lpn.cnrs.fr

RÉSUMÉ

En mariant nanophotonique et photovoltaïque, le confinement de l'absorption de la lumière solaire dans des couches semiconductrices de très faible épaisseur ouvre la voie aux cellules solaires ultrafines. Dans cette contribution, nous présentons les techniques pour piéger la lumière dans les cellules solaires, et nos résultats récents obtenus avec des dispositifs photovoltaïques en c-Si et GaAs. Nous dresserons également un panorama de l'état de l'art, et discuterons les défis technologiques à relever pour combler le fossé qui subsiste entre les meilleures performances et les limites théoriques.

MOTS-CLEFS : *nanophotonique, photovoltaïque, c-Si, GaAs*

1. INTRODUCTION

Les cellules solaires conventionnelles sont constituées de 100-200 μm de silicium, ou de semiconducteurs à bande interdite directe de quelques microns d'épaisseur (GaAs, CIGS, CdTe). Dans les deux cas, un piégeage optique efficace doit permettre de réduire ces épaisseurs d'au moins un ordre de grandeur. Cette perspective ouvre la voie à une réduction des coûts de fabrication des cellules solaires à simple jonction. Elle lève également un verrou pour l'exploration de nouveaux concepts photovoltaïques basés sur de fortes concentrations de porteurs (cellules à porteurs chauds, par exemple).

2. PIEGEAGE OPTIQUE DANS LES CELLULES SOLAIRES. ABSORPTION MULTI-RESONANTE.

L'approche conventionnelle pour piéger la lumière dans les cellules solaires repose sur la diffusion lambertienne de la lumière dans l'absorbeur. Les trois ingrédients principaux sont une couche anti-reflet en face avant, un miroir en face arrière, et une surface rugueuse (face avant ou arrière) pour diffuser la lumière dans toutes les directions. L'augmentation du chemin optique peut théoriquement atteindre $4n^2 \simeq 50$ (limite lambertienne).

Nous proposons une nouvelle approche de piégeage optique basée sur un mécanisme multi-résonant en couplage critique. Nous présenterons ses principes. Le modèle théorique que nous avons développé démontre un dépassement systématique de la limite lambertienne de $4n^2$ quelque soit l'épaisseur de l'absorbeur. Cette approche a guidé nos travaux numériques et expérimentaux pour la réalisation de cellules solaires ultrafines.

3. CELLULES SOLAIRES ULTRAFINES EN GAAS

Le record de rendement des cellules solaires à simple jonction a été obtenu avec un absorbeur en GaAs de plus d'un micron d'épaisseur. Nous montrons que cette épaisseur peut être réduite d'un facteur 5 à 10 en utilisant un miroir nanostructuré en face arrière [1,2]. Nos résultats numériques démontrent qu'une densité de courant de 26 mA/cm^2 peut être obtenue avec une structure réaliste composée de 200 nm de GaAs (à comparer au record de 29.6 mA/cm^2). Notre procédé de

fabrication est basé sur une lithographie douce par nano-impression, et un transfert des couches actives sur verre. Les densités de courant que nous mesurons s'élèvent à 22 mA/cm².

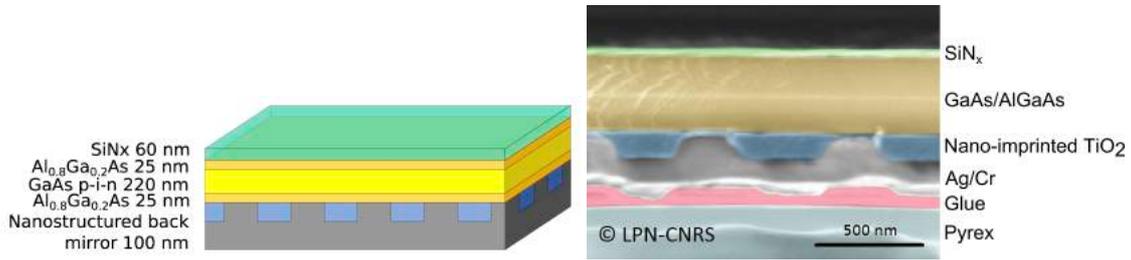


Fig. 1 : A droite : Schéma d'une cellule solaire ultrafine en GaAs avec un miroir nanostructuré en face arrière. A gauche : Photo MEB (coupe) d'une cellule solaire ultrafine en GaAs.

4. CELLULES SOLAIRES ULTRAFINES EN C-SI

Nous avons également mis en œuvre des stratégies de piégeage optique sur des cellules ultrafines en c-Si en utilisant des techniques potentiellement bas coût (croissance épitaxiale par PECVD basse température, nano-impression, transfert des couches pour la réutilisation du substrat), en collaboration avec le LPICM et l'INL [3]. Des densités de courant records ont été obtenues avec des absorbeurs de seulement 3 microns d'épaisseur de silicium cristallin (25.3mA/cm²).

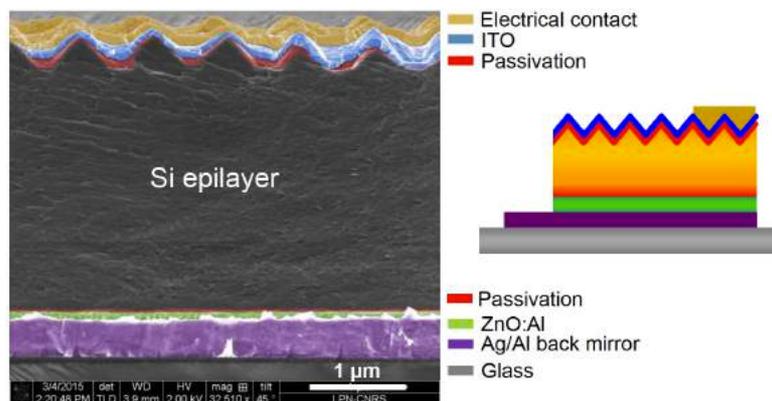


Fig. 1 : Photo MEB et schéma (coupe) d'une cellule solaire ultrafine en c-Si formée un réseau de nanopyramides en face avant, d'un miroir en Ag en face arrière, et transférée sur un substrat de verre.

CONCLUSION

En conclusion, nous présenterons une revue de l'état de l'art des cellules solaires ultrafines en c-Si et GaAs, et nous discuterons des principaux défis qui restent à relever pour combler le fossé qui subsiste entre les meilleures performances mondiales et les limites théoriques.

RÉFÉRENCES

[1] N. Vandamme et al., "Ultrathin GaAs Solar Cells With a Silver Back Mirror", IEEE Journal of Photovoltaics, 5, pp. 565–570, 2015.
 [2] N. Vandamme et al., "Ultrathin GaAs Solar Cells With a Nanostructured Silver Back Mirror", in preparation, 2016.
 [3] A. Gaucher et al., "Ultrathin epitaxial silicon solar cells with inverted nanopyramid arrays for efficient light trapping", submitted, 2016.

STRUCTURATION LASER FEMTOSECONDE AVEC DE LA LUMIERE STRUCTUREE

Y. Petit,^{1,2} E. Lee,¹ K. Mishick,¹ E. Brasselet,³ S. Danto,² I. Manek-Hönninger,¹
T. Cardinal,² L. Canioni¹

¹ CELIA UMR 5107, Université de Bordeaux, 351 Cours de la Libération, 33405 Talence France.

² ICMCB UPR 9048, Université de Bordeaux, 87 Av. du Dr Schweitzer F – 33608 Pessac, France.

³ LOMA UMR 5798, Université de Bordeaux, 351 Cours de la Libération, 33405 Talence France.

yannick.petit@u-bordeaux.fr

RÉSUMÉ

La structuration laser femtoseconde induite par faisceaux laser structurés permet la création de motifs originaux ne pouvant être obtenus avec des faisceaux gaussiens usuels. De tels nouveaux degrés de liberté expérimentaux ouvrent de nouveaux d'investigation en irradiation laser, notamment en vue de développer des techniques de lithographie 3D multi-échelles de super résolution.

MOTS-CLEFS : *structuration laser femtoseconde ; optique singulière ; verres oxydes à l'argent ; agrégats d'argent fluorescents ; super-résolution.*

1. INTRODUCTION

La structuration laser par irradiation laser femtoseconde est une thématique en très fort développement cette dernière décennie depuis l'avènement de sources lasers commerciales compactes, robustes et stables. La structuration laser femtoseconde a ainsi démontré son caractère très versatile et performant, tant dans l'amélioration de la connaissance fondamentale de l'interaction laser/matière que dans l'obtention de propriétés optiques/mécaniques/physico-chimiques multi-échelles allant de l'échelle nanométrique à macroscopique. Ceci permet dès à présent la fabrication tout-optique de composants avancés avec fonctionnalités optiques intégrées. Par ailleurs, le champ de recherche portant sur l'optique singulière est également très actif, avec la manipulation de faisceaux optiques structurés spatialement incluant des singularités de phase et/ou de polarisation. Ainsi, la combinaison de la structuration laser et de l'optique singulière ouvre des perspectives riches en termes de préparation de matériaux, permettant d'une part l'obtention de motifs originaux qui ne peuvent pas être obtenus directement à partir d'une irradiation avec un faisceau gaussien standard, et ouvrant d'autre part de nouveaux degrés de liberté expérimentaux pour la structuration laser avancée de matériaux pour applications photoniques.

Dans ce contexte, nous développons des procédés de structuration laser femtoseconde induits par lumière complexe associée à des singularités optiques de phase ou de polarisation, au sein de verres spécialement préparés contenant de l'argent [1]. Ceci nous permet de développer localement en 3D des propriétés optiques linéaires de fluorescence et non-linéaires de génération de second et de tierce harmonique [2], avec des distributions spatiales non triviales, mais aussi la précipitation de nanoparticules métalliques d'argent conduisant à un milieu effectif à propriétés plasmoniques [3]. Enfin, la réalisation d'irradiations laser à 2 couleurs permet la modulation de l'efficacité d'écriture laser, voire son inhibition totale. Ainsi, l'ensemble de ces développements vise à la mise en place technique de lithographie optique de super-résolution, en vue de la synthèse par voie optique de matériaux artificiels à propriétés optiques préparées par irradiation laser.

2. RESULTATS

Nous avons réalisé la mise en forme spatiale d'un faisceau laser (Coherent, amplificateur RegA à 800nm, 1W, 250 kHz, 90 fs) à partir de lames de phase et de polariseurs, pour obtenir des faisceaux préparés soit portant une charge topologique 2, soit avec une distribution de phase de type « quadripôle » pour réaliser la structuration de verres photosensibles de type phosphate de zinc à

l'argent, spécialement développés pour applications de stockage optique pérenne 3D de données [4]. Un faisceau gaussien produit une structure fluorescente correspondant à la création d'agrégats d'argent distribués sur la paroi du cylindre correspondant au voxel d'interaction multi-photons. Au contraire, les faisceaux de lumière structurée induisent des motifs présentant de nouvelles topologies associées aux nouvelles distributions d'intensité dans le voxel d'interaction laser/verre (Figure [gauche]). Une co-illumination UV (Diode laser Toptica, 394 nm, 100 mW, cw) permet de réduire voire d'inhiber l'efficacité de fluorescence associée (Figure [droite]) [5]. Enfin, le développement récent d'un dispositif versatile de mise en forme de faisceaux structurés, intégrant un modulateur optique de phase (SLM Hamamatsu L-COS), a permis l'obtention de nouveaux résultats qui seront également présentés.

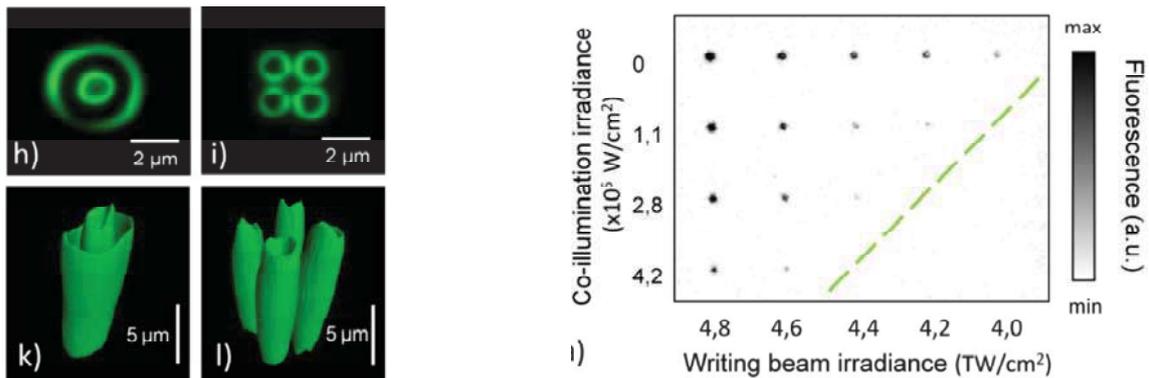


Fig. 1 : [gauche] Imagerie confocale de fluorescence ($\lambda_{\text{excitation}} = 405 \text{ nm}$) de structures originales produites par irradiation laser femtoseconde à partir d'un faisceau préparé soit portant une charge topologique 2 (vues de dessus et en 3D en (h) et (k), respectivement), soit avec une distribution de phase de type « quadrupôle » (vues de dessus et en 3D en (i) et (l), respectivement) ; [droite] Intensité de fluorescence de motifs produits à partir d'un faisceau de profil gaussien standard, et co-illuminés simultanément par un laser UV continu ($\lambda_{\text{UV}} = 394 \text{ nm}$), conduisant à une inhibition jusqu'à totale du processus d'écriture (en deçà de la ligne verte en pointillé).

CONCLUSION

Nous avons démontré le fort potentiel de la structuration laser femtoseconde à partir de faisceaux eux-mêmes structurés, incluant des singularités de phase ou de polarisation, permettant l'accès à des topologies originales de motifs fluorescents et à propriétés optiques non linéaires de SHG/THG. Par ailleurs, nous avons démontré la capacité de contrôler et d'inhiber totalement la capacité d'écriture de motifs fluorescents par co-illumination UV. La combinaison de ces deux résultats permet d'envisager à l'avenir la réalisation d'une structuration laser de super-résolution, basée sur une approche de lithographie optique dérivant de la technique d'imagerie STED de super-résolution.

REFERENCES

- [1] A. Royon, Y. Petit, G. Papon, M. Richardson, and L. Canioni, "Femtosecond Laser Induced Photochemistry in Tailored Materials," *Optical Material Express* **1**(5), 866-882 (2011). [invited]
- [2] G. Papon, Y. Petit, N. Marquestaut, A. Royon, M. Dussauze, V. Rodriguez, T. Cardinal, L. Canioni, "Fluorescence and second-harmonic generation correlative microscopy to probe space charge separation and silver cluster stabilization during direct laser writing in a tailored silver-containing glass," *Optical Material Express* **3**(11), 1855-1861 (2013).
- [3] N. Marquestaut, Y. Petit, A. Royon, P. Mounaix, T. Cardinal, and L. Canioni, "3D silver nanoparticles formation using femtosecond laser irradiation in phosphate glasses: analogy with photography," *Adv. Funct. Mat.* **24**(37), 5824-5832 (2014).
- [4] K. Mishchik, Y. Petit, E. Brasselet, A. Royon, T. Cardinal, and L. Canioni, "Patterning linear and nonlinear optical properties of photosensitive glasses by structured light," *Opt. Lett.*, **40**(2), 201-204 (2015).
- [5] Y. Petit, K. Mishchik, N. Varkentina, N. Marquestaut, A. Royon, I. Manek-Hönninger, T. Cardinal, and L. Canioni, "Dual-color control of direct laser writing in silver-containing phosphate glasses," *Optics Letters* **40**(17), 4134-4137 (2015).

NOUVELLES METHODES DE CONFINEMENT OPTIQUES ET PHONONIQUES, MESUREES PAR DIFFUSION RAMAN

**Fabrice-Roland Lamberti^{1,2}, Carmen Gomez Carbonell¹, Aristide Lemaître¹, Olivier Krebs¹,
Ivan Favero², Bernard Jusserand³, Pascale Senellart^{1,4}, Loïc Lanco¹, Daniel Lanzillotti-
Kimura¹**

¹ *Laboratoire de Photonique et de Nanostructures UPR CNRS 20, Université Paris-Sud, 91460
Marcoussis, France*

² *Laboratoire Matériaux et Phénomènes Quantiques UMR CNRS 7162, Université Paris Diderot,
75205 Paris, France*

³ *Institut des Nanosciences de Paris UMR CNRS 7588, 75252 Paris, France*

⁴ *Département de Physique, Ecole Polytechnique, Université Paris Saclay*

fabrice.lamberti@lpn.cnrs.com

RÉSUMÉ

Nous démontrons le confinement de phonons acoustiques dans des nanocavités semiconductrices innovantes par diffusion Raman résonnante. Ces résultats expérimentaux sont confirmés par un modèle photoélastique.

MOTS-CLEFS : *Spectroscopie Raman ; microcavités optiques; phonons acoustiques; cavités acoustiques.*

1. INTRODUCTION

La nanophononique désigne un domaine de recherche offrant la possibilité de maîtriser l'environnement acoustique de nanostructures, ce qui constituerait une avancée majeure dans le développement de nouvelles technologies en optique et en optoélectronique. En particulier, il est possible de réaliser des systèmes qui confinent des phonons acoustiques de très haute fréquence (GHz-THz) : les nanocavités acoustiques.^[1]

L'une des méthodes permettant d'obtenir ces structures consiste à placer deux miroirs de Bragg phononiques GaAs/AlAs autour d'une couche de GaAs (spacer). Les miroirs de Bragg (DBRs) sont fabriqués en empilant des couches de matériaux présentant un contraste d'impédances acoustiques.^[2] Les interférences entre les différentes réflexions qui se produisent à chaque interface permettent d'obtenir des structures très réfléchissantes sur une plage de fréquences donnée (stop band). En ajustant les épaisseurs des couches constituant les DBRs et le spacer, on optimise le confinement du mode fondamental mécanique au sein de la cavité.^{[1][2]}

Ce principe de fonctionnement est analogue à celui des cavités optiques à miroirs de Bragg, aujourd'hui utilisés dans des expériences d'optique et d'information quantique.^[3] Néanmoins, dans le cas des nanocavités acoustiques, les épaisseurs des couches utilisées sont beaucoup plus fines.^{[1][4]} Les techniques de fabrication par épitaxie par jets moléculaires sont donc idéales pour la réalisation de ces échantillons, car elles permettent un contrôle parfait des épaisseurs des couches et assurent une grande qualité des interfaces entre les différents matériaux.^[4] Dans ce projet nous concevons et caractérisons le confinement acoustique de nanocavités innovantes possédant des fréquences de résonance de l'ordre de 200 GHz, et ce grâce à des mesures de type diffusion Raman.

2. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Notre étude porte sur de nouvelles structures confinant des modes mécaniques. La première présente une structure standard constituée d'un spacer et de deux DBRs. Nous étudions également deux cavités qui confinent des phonons *en l'absence de spacer*. La première consiste à confiner des phonons en variant de façon adiabatique les épaisseurs des couches dans les DBRs. Ces structures

sont notamment connues en optique pour la robustesse de leur facteur de qualité en présence d'un fort confinement latéral. La deuxième structure se base sur la juxtaposition de deux miroirs de Bragg, et en adaptant le déphasage entre ces deux systèmes, il est possible de confiner un mode de phonons à leur *interface*.^[5] Ces cavités sont innovantes pourraient posséder des propriétés de confinement supérieures par rapport aux configurations standards. Elles constituent des nouvelles plateformes permettant le contrôle de l'environnement phononique dans des nanostructures.

Nous effectuons des mesures de diffusion Raman à température ambiante avec un laser continu infrarouge accordable. Les énergies d'excitation sont inférieures aux résonances électroniques des systèmes utilisés. Les spectres Raman sont mesurés grâce à un double spectromètre et à une caméra CCD (Charge Coupled Device).

Les structures étudiées présentent une configuration « Matriochka » : on place la cavité acoustique au sein d'une cavité optique (Figure 1a)).^[2] Ceci a pour effet concentrer le champ électromagnétique incident dans la cavité acoustique, et permet d'augmenter le recouvrement spatial du champ incident avec le mode mécanique confiné et le mode optique auquel les photons diffusés sont couplés.^{[1][2]} Ainsi, il est possible d'amplifier d'un facteur 10^6 les signaux étudiés. (Figure 1b).^{[1][2]}

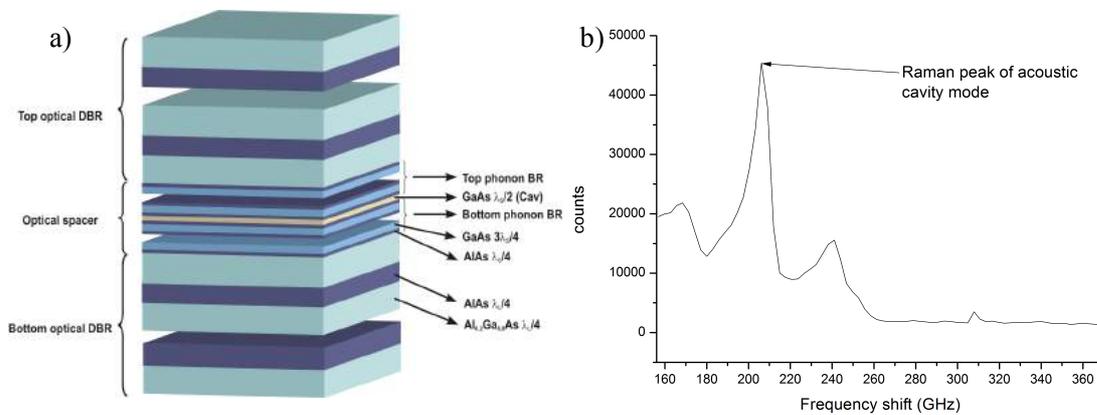


Fig. 1 : a) Schéma d'une structure Matriochka. b) Spectre Raman mesuré sur une structure Matriochka standard. Les pics situés autour du signal associé au mode de cavité correspondent à des modes de phonons des DBRs acoustiques, qui participent au processus de diffusion inélastique.

CONCLUSION

Nous avons conçu des microcavités permettant de confiner des phonons à des fréquences autour de 200 GHz, une fréquence pertinente pour des applications dans le domaine de l'optique quantique. Nous avons réalisé et caractérisé des structures innovantes, l'une confinant un mode mécanique grâce à une variation adiabatique des propriétés acoustiques de la structure, et l'autre en exploitant le contraste de phase entre deux miroirs de Bragg acoustiques. Nous avons mesuré le confinement de modes de phonons grâce à des mesures de diffusion Raman. Ces structures étendent le panel de nanosystèmes capables de contrôler la dynamique des phonons acoustiques.

RÉFÉRENCES

[1] M. Trigo, A. Bruchhausen, A. Fainstein et al, Confinement of acoustical vibrations in a semiconductor planar phonon cavity, Physical review letters Volume 89, Number 22, 2002.
 [2] N.D. Lanzillotti-Kimura, A. Fainstein, B. Jusserand et al., Resonant Raman scattering of nanocavity-confined acoustic phonons, Physical review B 79, 035404, 2009
 [3] N. Somaschi et al., Near optimal single-photon sources in the solid statem Nature Photonics, 2016
 [4] G. Rozas et al., Lifetime of THz Acoustic Nanocavity Modes, Phys. Rev. Lett. 102, 015502, 2009
 [5] M. Xiao, G. Ma, Z. Yang et al., Geometric phase and band inversion in periodic acoustic systems, Nature Physics 11, 240-244, 2015

MÉTASURFACES PLASMONIQUES POUR LE VISIBLE ET L'INFRAROUGE

Antoine Moreau^{1,2}

¹ Université Clermont Auvergne, Université Blaise Pascal, Institut Pascal, BP 10448, F-63000 CLERMONT-FERRAND, FRANCE

² CNRS, UMR 6602, IP, F-63178 Aubière, FRANCE

antoine.moreau@univ-bpclermont.fr

RÉSUMÉ

En utilisant des résonateurs métalliques disposés plus ou moins régulièrement dans un plan, on obtient des méta-surfaces, et tout indique qu'elles permettent un contrôle des ondes électro-magnétiques sans précédent. Quand on veut pousser les résonances vers le visible, les propriétés plasmoniques des métaux entrent en jeu et, de façon inattendue, permettent effectivement la minaturisation des résonateurs – par exemple grâce aux résonateurs à gap-plasmon. On peut même utiliser ces résonateurs pour diminuer le temps de vie de fluorophores par des facteurs 100 à 1000, grâce à un très fort effet Purcell.

MOTS-CLEFS : *plasmonique, nanoparticules, antennes optiques, effet Purcell.*

Si les méta-matériaux ont changé notre vision de la réfraction, et notamment des lois de Descartes en montrant que la réfraction négative était possible, en tous les cas la révolution qu'on pouvait en attendre ne s'est pas concrétisée. De plus en plus de start-ups estampillées « Métamatériaux » voient le jour aux Etats-Unis, mais quand on y regarde de plus près, les dispositifs qu'elle sont sur le point de commercialiser (dans le domaine des micro-ondes) ne sont pas des assemblées 3D de résonateurs, mais plutôt une répartition bidimensionnelle. Une telle disposition limite en définitive les pertes associées aux résonateurs, et facilite grandement la fabrication du dispositif. Et contrairement à ce qu'on aurait pu penser, elle peut avoir tout autant d'influence sur une onde électromagnétique, et permettre un contrôle quasi-total. C'est ainsi qu'a pu reprendre plus facilement la marche vers le visible des méta-matériaux.

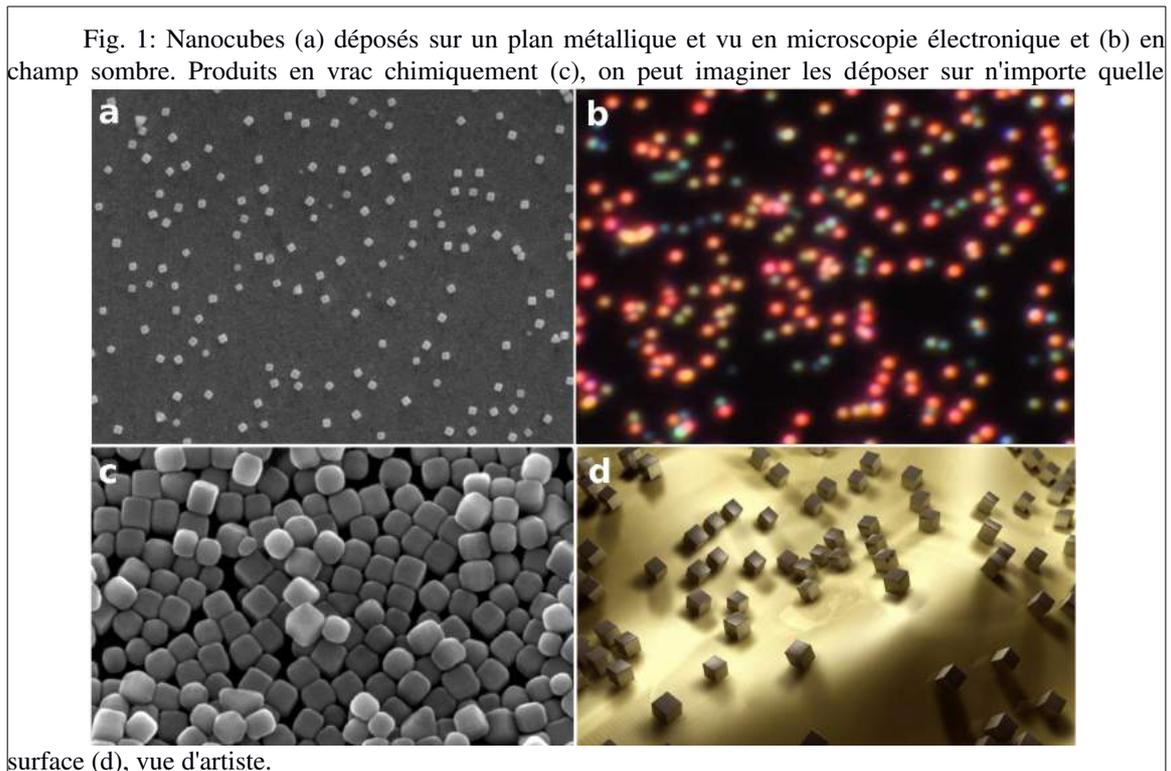
Quelques exemples spectaculaires[1] de cette stratégie ont ces dernières années permis de démontrer à quel point on pouvait contrôler la lumière grâce à ces méta-surfaces – au point d'en arriver à des hologrammes fonctionnant différemment pour deux polarisations rectilignes différentes.

Quand on s'approche du visible, cependant, les métaux apparaissent comme de moins en moins parfaits et le ratio entre la taille des résonateurs et la longueur d'onde n'est plus si réduit qu'il peut l'être pour les micro-ondes. C'est alors la plasmonique qui a fourni une solution : les résonateurs à gap-plasmons.

Un gap-plasmon[2] est le seul mode guidé capable de se propager dans des interstices nanométriques entre deux métaux. Parce que ces interstices sont bien plus petits que l'épaisseur de peau, ces modes sont fortement localisés dans le métal et bénéficient alors d'une trainée plasmonique : le vecteur de Poynting étant opposé à la direction de propagation dans le métal, le mode est comme freiné et sa longueur d'onde effective devient de plus en plus petite. Elle tend même vers 0 théoriquement quand la largeur de l'interstice décroît. Une cavité, pour un tel mode, doit posséder une taille minimum d'une demi longueur d'onde effective. Puisque cette longueur d'onde tend vers zéro, la taille de la cavité tend elle aussi vers zéro. On peut donc concevoir des résonateurs de taille extrêmement réduite : des fentes très peu large et très peu profondes gravées

dans un plan métalliques, ou des antennes patch optiques. Fabriquer ces structures représente cependant un véritable défi pour les techniques usuelles de lithographie.

Une solution est alors d'utiliser des nanocubes métalliques et de les disposer sur un plan métallique préalablement recouvert de diélectrique[3]. Cette technique, très peu onéreuse, ne permet pas de contrôler la disposition des résonateurs que constituent les nanocubes, mais cela peut suffire pour obtenir des absorptions importantes étant donné la surprenante efficacité de ces résonateurs à concentrer et à absorber la lumière.



Plus récemment, il a été montré que des fluorophores placés sous un de ces nanocubes pouvaient diviser par un très grand facteur le temps de vie de l'état excité de ces molécules. Si d'aventure il devenait possible d'exciter électriquement ces émetteurs, alors la conception de dispositifs électro-optiques extrêmement rapides pourrait être envisageable[4]. On commence seulement à percevoir l'intérêt immense de ce type de résonateur.

RÉFÉRENCES

- [1] Yu, Nanfang, et al. "Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction." *Science* 334.6054 (2011): 333-337.
- [2] Bozhevolnyi, Sergey I. "General properties of slow-plasmon resonant nanostructures: nano-antennas and resonators." *Optics express* 15.17 (2007): 10869-10877.
- [3] Moreau, Antoine, et al. "Controlled-reflectance surfaces with film-coupled colloidal nanoantennas." *Nature* 492.7427 (2012): 86-89.
- [4] Akselrod, Gleb M., et al. "Probing the mechanisms of large Purcell enhancement in plasmonic nanoantennas." *Nature Photonics* 8.11 (2014): 835-840.

ASSEMBLER DES ANTENNES OPTIQUES NANOMETRIQUES SUR DES BRINS D'ADN

Sébastien Bidault

ESPCI Paris, PSL Research University, CNRS, INSERM, Institut Langevin, 75005 Paris, France

sebastien.bidault@espci.fr

RÉSUMÉ

Les antennes optiques, présentant des résonances plasmon aux fréquences visibles, ont des applications multiples en spectroscopie, dans la détection de biomolécules ou pour l'optimisation d'émetteurs de photons uniques. Leur taille bien inférieure à la longueur d'onde nécessite toutefois un contrôle de leur géométrie à l'échelle du nanomètre. C'est pourquoi l'assemblage de particules d'or sur de courts brins d'ADN est une approche prometteuse pour concevoir, à grande échelle, des antennes optiques couplées de manière contrôlée à des émetteurs quantiques uniques ou dont les propriétés optiques deviennent sensibles à l'environnement chimique.

MOTS-CLEFS : *particules d'or ; nanotechnologies ADN ; fluorescence exaltée ; capteurs*

1. OPTIMISATION DE L'ÉMISSION SPONTANÉE

La présence de champs électromagnétiques exaltés et confinés, associée à des sections efficaces de diffusion élevées, font des antennes optiques d'excellents résonateurs pour se coupler en champ proche à des sources fluorescentes et amplifier leur émission en champ lointain. Afin d'optimiser l'interaction entre des molécules organiques et des dimères de nanoparticules d'or, nous assemblons ces derniers autour d'un double brin d'ADN, d'une dizaine de nanomètre de long (figure 1-a), qui présente un colorant fluorescent en son centre [1-4]. Des mesures de luminescence résolues en temps montrent que ces nanostructures colloïdales sont des émetteurs de photons uniques présentant des temps de vie de quelques picosecondes (figure 1-b) [1-2]. L'interaction entre le dipôle de transition de l'émetteur et l'antenne dépend en particulier de leur orientation relative qui n'est pas contrôlée sur le brin d'ADN [3]. De plus, des mesures de spectroscopie de corrélation de fluorescence ont permis de caractériser l'exaltation de fluorescence moyenne dans ces antennes [4] et d'estimer le rendement quantique du système couplé qui peut atteindre 70 % avec des particules d'or de 80 nm de diamètre [2]. Ces émetteurs quantiques, présentant des temps de vie radiatifs picosecondes, sont produits par centaines de millions de copie en suspension dans l'eau. La flexibilité et la programmabilité chimiques de l'ADN ouvrent également des perspectives nouvelles pour étudier l'influence d'un résonateur large-bande sur le couplage entre un nombre donné d'émetteurs dont la position relative est contrôlée à l'échelle nanométrique.

2. SUIVI COLORIMÉTRIQUE DE DISTANCES NANOMETRIQUES

Les couplages de champ proche entre nanoparticules d'or dans les antennes optiques permettent également de remonter à une information morphologie par des mesures spectroscopiques. Il est ainsi possible d'estimer la distance séparant deux particules d'or, à l'échelle nanométrique, en regardant simplement la couleur de la lumière qu'elles diffusent sur une caméra couleur (figure 1-c) [6]. Ceci nous permet d'analyser les interactions électrostatiques et stériques entre nanoparticules et d'optimiser la stabilité morphologique de ces assemblages en modifiant leur chimie de surface [7]. Surtout, ces mesures colorimétriques différencient des dimères de particules d'or présentant des

conformations différentes de leur échafaudage d'ADN [6]. L'introduction d'une boucle d'ADN en épingle à cheveux permet, en particulier, de concevoir des nanostructures dont la morphologie varie sensiblement en présence d'une unique biomolécule spécifique [8]. Il est donc possible d'imaginer de nouvelles plateformes de capteurs optiques dont la couleur change en présence d'une information chimique spécifique avec une sensibilité pouvant descendre à la molécule individuelle.

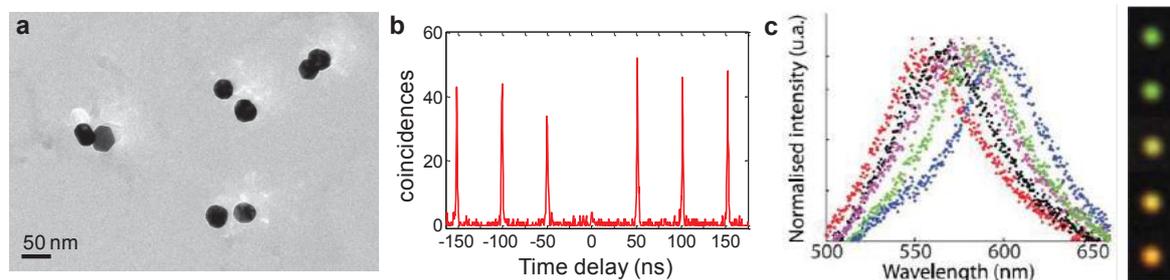


Fig. 1 : (a) Image de microscopie électronique cryogénique de dimères de nanoparticules d'or de 40 nm de diamètre, liés par un brin d'ADN de 30 paires de bases. (b) Mesure d'anti-coïncidence dans la statistique d'émission de photons d'une molécule fluorescente unique couplée à un dimère de particules d'or de 40 nm, et présentant un temps de vie de quelques dizaines de picosecondes. (c) Evolution du signal de diffusion produit par un dimère de particules d'or de 40 nm de diamètre (illuminé par une lampe blanche) quand la distance interparticule varie de 20 nm à 3 nm, et mesurée par spectroscopie confocale (à gauche) ou sur une caméra CCD couleur (à droite).

RÉFÉRENCES

- [1] M. P. Busson, B. Rolly, B. Stout, N. Bonod, and S. Bidault, *Nat. Commun.* 3, 962, 2012.
- [2] S. Bidault, A. Devilez, V. Maillard, L. Lermusiaux, J.-M. Guigner, N. Bonod, and J. Wenger, *ACS Nano* DOI: 10.1021/acsnano.6b01729, 2016.
- [3] M. P. Busson and S. Bidault, *Nano Lett.* 14, 284, 2014.
- [4] M. P. Busson, B. Rolly, B. Stout, N. Bonod, J. Wenger, and S. Bidault, *Angew. Chem. Int. Ed.* 51, 11083, 2012.
- [5] M. P. Busson, B. Rolly, B. Stout, N. Bonod, E. Larquet, A. Polman, and S. Bidault, *Nano Lett.* 11, 5060, 2011.
- [6] L. Lermusiaux, V. Maillard, and S. Bidault, *ACS Nano* 9, 978, 2015.
- [7] L. Lermusiaux and S. Bidault, *Small* 11, 5696, 2015.
- [8] L. Lermusiaux, A. Sereda, B. Portier, E. Larquet, and S. Bidault, *ACS Nano* 6, 10992, 2012.

SPIN-CONTROLLED NEAR-FIELD ADDRESSING OF PLASMONIC NANO-ANTENNAS

Y. Lefier^{1*}, M. Suarez¹, R. Salut¹, U. Fischer² and T. Grosjean¹¹*Femto-ST Institute, Besançon, France*²*Interface physics group, WWU, Muenster, Germany*yannick.lefier@femto-st.fr

RÉSUMÉ

We demonstrate the selective and switchable near-field addressing, with a single subwavelength focal spot, of two nano-antennas connected at the two ends of a single bent plasmonic waveguide, and a few wavelengths apart from each other. The addressing process, based on a spin-orbit coupling within the bent of a plasmonic waveguide under illumination, is simply controlled in the far-field by the polarization of the incident waves. Such a concept opens new perspectives in nano-optical circuitry, routing and sorting, optical nano-sensing, and nano-optical trapping and manipulation.

MOTS-CLEFS : *Spin-orbit coupling, Nano-antenna, Plasmonic waveguiding, Unidirectionality*

Directional light propagation at subwavelength scale is nowadays a prime objective of photonics and starts to be well-controlled [1]. We demonstrate here unidirectional plasmon waveguiding, far beyond the diffraction limit, with no need of nanoantennas/scatterers as light directors.

Subwavelength plasmonic waveguides are intrinsically two-way optical communication channels, and when light is coupled to these planar integrated devices directly from the top (or bottom) surface using strongly focused beams, it is equally shared into the two opposite propagation directions. Here, we show that symmetry can be broken by using incident circularly polarized light, on the basis of a spin-orbit coupling directly within waveguide bends [2]. We predict theoretically that up to 94% of the incoupled light is directed into a single propagation channel of a gap-plasmon waveguide. This is a nanoscale manifestation of a geometric phase [3] induced in the bend.

Two resonant optical nano-antennas, connected at the two ends of a single bent plasmonic waveguide, can thus be remotely excited independently of each other with a single focused beam. We demonstrate experimentally this new concept with two coaxial nano-antennas connected to a single gap-plasmon waveguide (see **Fig. 1**). Light propagation in deeply subwavelength waveguides as well as nano-antenna near-field addressing [4] thus become switchable/controllable in far-field with the polarization of the impinging optical waves. This study may open new perspectives in a large panel of scientific domains, such as nanophotonic circuitry, routing and sorting, optical nanosensing, and nano-optical trapping and manipulation. More complex spin-controlled plasmonic nano-antenna networks can then be imagined.

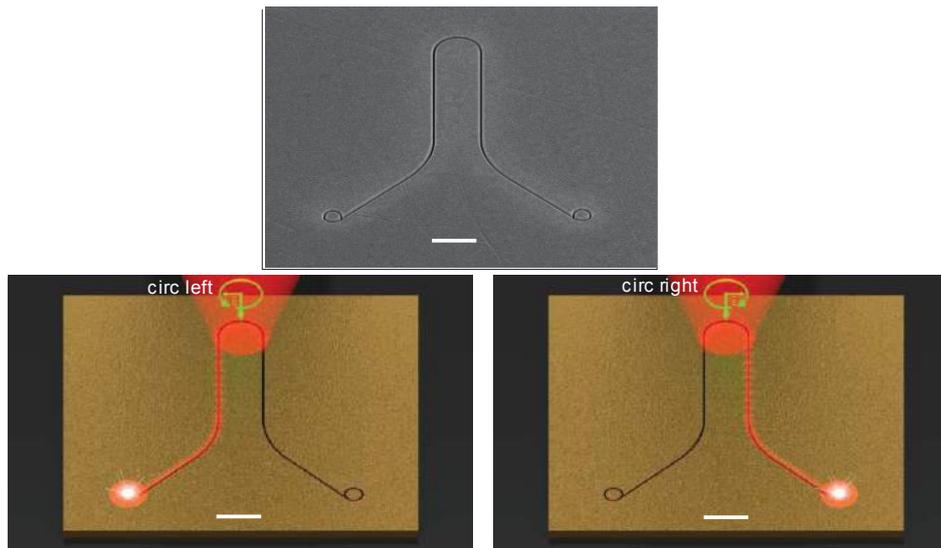


Figure 1 : MEB image (a) and illustrations (b) and (c) of the elaborated structure to show the concept of spin-controlled switching of remotely excitation of optical nanoantennas. (scale bar : 1 micron)

This work is supported by the LABEX Action program (contract ANR-11-LABX-01-01)

Références :

- [1] L. Marrucci, *Nature Physics* **11**, 1 (2015).
- [2] Y. Lefier and T. Grosjean, *Optics Letter* **40**, 12 (2015).
- [3] K.Y. Bliokh, Y. Gorodetski, V. Kleiner & E. Hasman, *Physical review letters* **101**,3 (2008)
- [4] J.-S. Huang, T. Feichtner, P. Biagioni & B. Hecht, *Nano letters* **9** (2009).

LUMINESCENCE A DEUX PHOTONS DE NANOBÂTONNETS D'OR COLLOÏDAUX : INFLUENCE DU VOLUME POUR UNE MEME RESONANCE PLASMON

Céline Molinaro¹, Sylvie Marguet², Ludovic Douillard¹, Fabrice Charra¹, Céline Fiorini-Debuisschert¹

¹ SPEC, CEA, CNRS, Université Paris-Saclay, CEA Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette cedex, France

² NIMBE, CEA, CNRS, Université Paris-Saclay, CEA Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette cedex, France

celine.molinaro@cea.fr

RÉSUMÉ

L'étude corrélée de la topographie et de la luminescence à deux photons de nanobâtonnets d'or uniques a permis d'établir l'origine de leur forte luminescence. L'influence du volume de nanobâtonnets colloïdaux, présentant des résonances plasmons identiques, est discutée.

MOTS-CLEFS : *nanobâtonnets d'or, luminescence à deux photons, plasmonique*

1. INTRODUCTION

Les nanoparticules d'or sont connues pour permettre le confinement efficace d'une excitation optique et pour donner lieu à une forte exaltation locale de champ. Ces nano-antennes trouvent ainsi des applications dans divers domaines tels que la biologie, le photovoltaïque ou la création de nanolasers [1]. Bien que le rendement quantique de l'or soit faible, une très forte luminescence résulte de l'excitation à résonance plasmon de nanobâtonnets d'or, l'origine de ces effets étant controversée. Nous avons mené des études résolues en polarisation de la luminescence à deux photons (TPL) de nanobâtonnets colloïdaux uniques dont la topographie a pu être simultanément cartographiée : dans cette présentation, nous discutons plus spécialement de l'effet du volume des objets considérés.

2. ORIGINE DE LA LUMINESCENCE A DEUX PHOTONS

Afin de pouvoir mener des caractérisations approfondies à l'échelle de nanobâtonnets d'or uniques ($10 \times 10 \times 40 \text{ nm}^3$), nous avons mis en œuvre un banc expérimental associant un AFM (JPK NanoWizard III) à un microscope optique inversé, couplé à une excitation laser Ti-Saphir (Tsunami, Spectra Physics, $760 \text{ nm} < \lambda < 920 \text{ nm}$) de façon à pouvoir faire des études simultanées permettant de corréler topographie et TPL d'objets individuels. Au-delà de la mesure de l'intensité globale de luminescence, l'émission de chaque objet est également analysée spectralement et en polarisation.

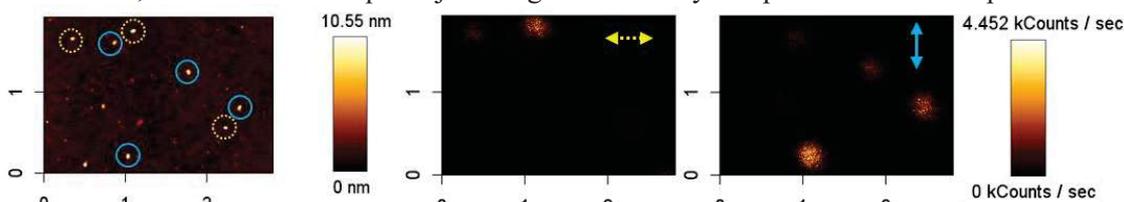


Fig. 1 : Images ($2 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$) de nanobâtonnets d'or de dimension $10 \times 40 \text{ nm}$ immobilisés sur des substrats de verre-ITO (a) topographie AFM (mode contact intermittent) et (b) images simultanées de luminescence à deux photons (mode comptage de photons) en polarisation horizontale et verticale.

Les nanobâtonnets présentent deux résonances plasmons : une associée à leur largeur $\lambda_{\text{LSP}}^{\text{T}}$ autour de $520/540 \text{ nm}$ et une seconde associée à leur longueur $\lambda_{\text{LSP}}^{\text{L}}$ et pouvant être ajustée de 750 à 850 nm selon le rapport d'aspect [2]. Une forte dépendance de la luminescence à deux photons avec la longueur d'excitation et l'orientation du nanobâtonnet a été systématiquement observée (figure 1). Une dépendance en $\cos^4(\theta)$, obtenue en variant la polarisation (θ) du faisceau incident, met en

évidence l'origine dipolaire de la résonance plasmon. La corrélation entre les images de topographie et luminescence montre que l'angle correspondant au maximum de luminescence coïncide avec l'excitation du grand axe du nanobâtonnet. Enfin, une analyse spectrale de la TPL a été réalisée. Deux bandes d'émission ont été observées : une première autour de $\lambda=550\text{nm}$, correspondant à la différence d'énergie entre la bande d et le niveau de Fermi de l'or au point de symétrie L de la première zone de Brillouin, et une seconde dans le proche infrarouge. L'étude de la polarisation de ce signal a permis de mettre en évidence que la TPL des nanobâtonnets d'or ne résulte pas d'une relaxation radiative directe du mode de plasmon longitudinal, mais passe d'abord par la création d'une paire électron/trou dont la désexcitation donne ensuite lieu à une excitation des modes de plasmons qui relaxent en émettant des photons. La forte luminescence observée est ainsi la résultante d'un double effet d'antenne des nanobâtonnets : à l'excitation (résonance plasmon longitudinale) et à l'émission (résonance plasmon transverse).

3. INFLUENCE DU VOLUME SUR LA LUMINESCENCE

Quatre types de nanobâtonnets d'or colloïdaux ($6\times 6\times 27\text{nm}^3$, $10\times 10\times 40\text{nm}^3$, $20\times 20\times 80\text{nm}^3$ et $40\times 40\times 145\text{nm}^3$) ayant le même rapport d'aspect (résonances plasmons identiques) mais un volume différent, ont ensuite été étudiés suivant le même principe que précédemment. Quels que soient les bâtonnets considérés les dépendances de leur émission, à la fois avec la longueur d'onde et la polarisation de l'excitation incidente, sont identiques : par contre, on note des intensités de luminescence très variables d'un volume de nanobâtonnet à l'autre. On peut montrer que l'analyse de l'intensité de la TPL de ces objets permet directement de déterminer l'exaltation locale de champ à résonance. Comme représenté sur la figure 2, nous avons confronté les exaltations de champ déterminées expérimentalement à des simulations numériques de type BEM (Boundary Elements Method) réalisées sur des nanobâtonnets présentant les mêmes caractéristiques géométriques.

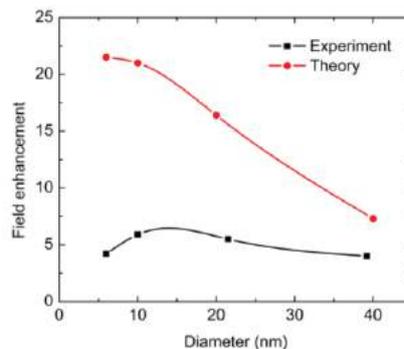


Fig. 2 : Comparaison de l'exaltation locale de champ théorique (valeur maximale) et expérimentale (exaltation globale) en fonction du diamètre du nanobâtonnet.

On observe une diminution de l'exaltation de champ pour les bâtonnets de grand volume, les nanobâtonnets de grandes tailles présentant des pertes par effets retards. La chute du signal expérimentalement enregistrée pour les petits objets n'est par contre pas observée théoriquement.

CONCLUSION

La forte luminescence, mise en évidence sur des nanobâtonnets d'or, est la résultante d'un double effet d'antenne des nanobâtonnets : à l'excitation (résonance plasmon longitudinale) et à l'émission (résonance plasmon transverse). L'étude corrélée de la topographie et de la TPL a été réalisée sur 4 types de nanobâtonnets d'or, présentant des résonances longitudinales proches mais des volumes différents : une analyse plus approfondie des différents processus impliqués dans la luminescence est nécessaire pour expliquer la chute de signal observée pour les petits objets.

REFERENCES

- [1] M.A. Noginov et al, Nature, 460, 7259, 1110-1112, 2009.
- [2] X.Huang et al, Advanced Materials, 21, 4880, 2009.

EMISSION D'UNE ANTENNE PLASMONIQUE COUPLEE A UN EMETTEUR UNIQUE

A. R. Dhawan, C. Belacel^{1,2}, C. Schwob¹, M. Nasilowski³, B. Dubertret³, L. Coolen¹,
P. Senellart², A. Maître¹

¹ Institut des NanoSciences de Paris, Université Pierre et Marie Curie, 4 place Jussieu, 75252 Paris

² Laboratoire de Photonique et de Nanostructures, Route de Nozay, 91460 Marcoussis

⁴ Laboratoire de Physique et d'Étude des Matériaux, ESPCI, 10 rue Vauquelin, F-75231 Paris

agnes.maitre@insp.upmc.fr

RÉSUMÉ

Des antennes plasmoniques de type patchs ont été réalisées en positionnant un émetteur unique de manière déterministe au centre de l'antenne.

MOTS-CLEFS : Antennes, plasmon ; nanocristaux ; lithographie in situ.

1. INTRODUCTION

Les antennes plasmoniques telles que les antennes patch, permettent un fort confinement du champ électromagnétique sur des volumes très petits [1]. Pour un émetteur placé au maximum du champ et bien orienté, l'interaction est alors maximum et une accélération importante de l'émission spontanée peut être obtenue. Une première réalisation de cette antenne a précédemment été rapportée mais avec des agrégats de nanocristaux semi-conducteurs [2]. Nous reportons ici la réalisation d'une antenne patch plasmonique couplée à un émetteur unique, un nanocristal de CdSe/CdS, positionné de manière déterministe au maximum du champ électromagnétique. Nous présentons les propriétés optiques de telles antennes en terme d'émission de photons uniques, d'accélération de l'émission spontanée et de brillance.

2. REALISATION DE L'ANTENNE PLASMONIQUE PATCH

La nanoantenne patch est constituée par une couche mince diélectrique homogène placée entre un plan métallique optiquement épais et un disque métallique optiquement fin et donc partiellement transparent. Un émetteur, ici un nanocristal individuel de CdSe/CdS [3], de diamètre de l'ordre 15-20nm émettant à température ambiante à 630nm avec une largeur spectrale suffisante pour pouvoir se coupler à des nanoantennes plasmoniques, est placé au centre de cette antenne. Le milieu diélectrique a une épaisseur faible devant l'épaisseur de peau du métal, typiquement de quelques dizaines de nm. Dans une telle antenne, les plasmons des deux surfaces peuvent être excités par l'émetteur, et sont couplés l'un à l'autre. Il est ainsi possible d'obtenir ainsi un confinement important du champ dans un volume modal très faible favorable à une exaltation par effet Purcell.

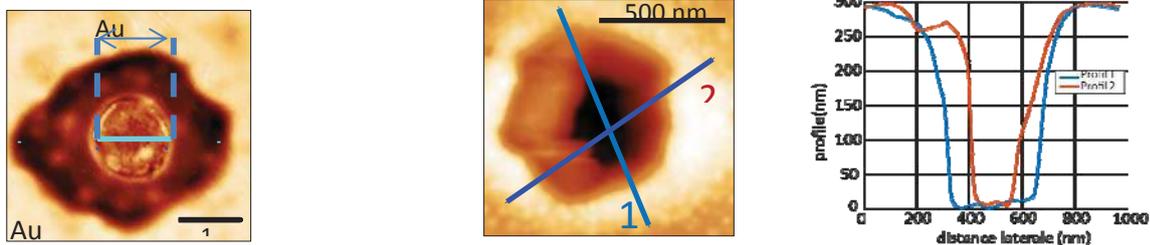


Fig. 1 : Image AFM image de deux antennes patch de différents diamètres. La deuxième a un diamètre de 150nm dans une direction et profil de hauteur par AFM de la deuxième antenne dans les deux directions indiquées

Pour réaliser une antenne efficace, il est nécessaire de contrôler la position de l'émetteur. La technique de lithographie optique in-situ [4] consiste à repérer optiquement un émetteur puis à réaliser les différentes étapes technologiques pour centrer la nanostructure centrée sur l'émetteur.

Nous avons élaboré un nouveau protocole basé sur cette technique et permettant de réaliser des antennes patchs avec un unique nanocrystal positionné de manière déterministe au centre de l'antenne. Nous avons ainsi obtenu par des techniques de lithographie optique des antennes centrées dont le diamètre varie entre 150nm et 2 μm (fig1)

3. EMISSION DE L'ANTENNE

Les antennes sont excitées par un laser impulsif à 405nm et sont observées par microscopie de fluorescence. L'émission est collectée par deux photodiodes à avalanche, permettant de réaliser à la fois une mesure de temps de vie et une mesure de dégroupement de photons.

Suivant leur taille et leur configuration, les antennes obtenues présentent deux types de comportement différents : Certaines antennes sont des sources de photons uniques, dont l'émission est accélérée. Des facteurs de Purcell de l'ordre de quelques unités sont alors obtenus. A l'opposé, pour des antennes de faible taille, comme l'antenne de diamètre 150nm présentée ci-dessus, le facteur de Purcell peut atteindre 23. Ces sources ne sont alors plus des sources de photons uniques et l'émission devient essentiellement multiexcitonique. En effet l'effet Auger qui donne lieu à une désexcitation non radiative de multiexcitons est en compétition avec la désexcitation radiative du multiexciton. Une fois placés dans une antenne, l'émission des nanocristaux est accélérée. Leur désexcitation radiative excitonique et multiexcitonique devient plus rapide que l'effet Auger, si bien que l'antenne permet aux multiexcitons de se désexciter de manière radiative. Par ailleurs l'antenne ainsi obtenue est 10 fois plus brillante que les nanocristaux qui ne sont pas sous l'antenne.

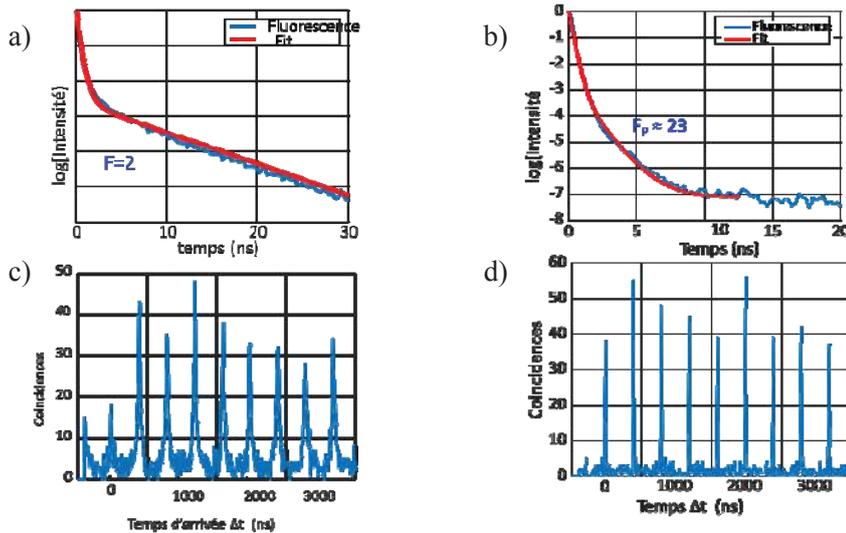


Fig. 2 : a) et c) courbes de déclin et de dégroupement pour l'antenne de diamètre important. b) et d) courbes de déclin et de dégroupement pour l'antenne de diamètre 150nm.

CONCLUSION

Nous avons fabriqué des antennes patch comportant un unique émetteur positionné de manière déterministe au centre de l'antenne. La forte accélération de l'émission spontanée a permis de rendre radiative l'émission multiexcitonique.

REFERENCES

[1] R. Esteban, T.V. Teperik, J.J. Greffet, *Phys. Rev. Lett.* 104, 026802 (2010)
 [2] C. Belacel, B. Habert, F. Bigourdan, F. Marquier, J-P. Hugonin, S. Michaelis de Vasconcellos, X. Lafosse, L. Coolen, C. Schwob, C. Javaux, B. Dubertret, J-J. Greffet, P. Senellart, A. Maître, *Nanoletters* 13 1516 (2013)
 [3] Malher B., Spinicelli P., Buil S., Quélin X., Hermier J.-P., Dubertret B., *Nature Materials* 7, 65 (2008)
 [4] A. Dousse, L. Lanco, J. Suczynski, E. Semenova, A. Miard, A. Lemaitre, I. Sagnes, C. Roblin, J. Bloch, P. Senellart, *Phys. Rev. Lett.* 101, 267404 (2008).

UNE RÉPLIQUE MODERNE DE L'EXPÉRIENCE DE FIZEAU D'ENTRAÎNEMENT PARTIEL DE L'ÉTHER PAR L'EAU EN MOUVEMENT

Renaud Mathevet¹, Pierre Labastie², Thierry Lahaye³

¹ LNCMI, UPR 3228, CNRS-INSA-UJF-UPS, Grenoble et Toulouse, France

² LCAR, IRSAMC, UMR 5589, CNRS-Université de Toulouse, Toulouse, France

³ LCF, UMR 8501, CNRS-Institut d'Optique-Université Paris Sud 11, Palaiseau, France

renaud.mathevet@lncmi.cnrs.com

RÉSUMÉ

En 1851 Hippolyte Fizeau démontrait expérimentalement ce qui, en les termes de l'époque, s'appelait l'entraînement partiel de l'éther par l'eau en mouvement. Nous replacerons cette expérience dans son contexte historique et montrerons les résultats que nous avons obtenus avec une réplique moderne de cette expérience.

MOTS-CLEFS : *relativité restreinte ; histoire des science ; optique*

1. CONTEXTE HISTORIQUE

En 1815, Augustin Fresnel jeta les bases de la théorie de la diffraction qui fit triompher la théorie ondulatoire de la lumière contre la théorie corpusculaire très majoritairement acceptée depuis Newton. Dans le modèle Newtonien, la composition des vitesses galiléenne est communément admise et la réfraction s'explique par une force attractive qui accélère les corpuscules lorsqu'ils pénètrent dans un milieu plus dense. En conséquence, la déviation qu'il subissent à la traversée d'un prisme doit-elle être diminuée ou augmentée selon que la source s'approche ou s'éloigne du prisme.

Entre 1805 et 1810, François Arago a mené plusieurs campagnes de mesure pour déceler une telle différence en fonction du mouvement des étoiles par rapport à la terre ou de la terre sur son orbite. Le résultat fut systématiquement négatif. Il demanda alors à Fresnel d'examiner ce problème à la lumière de sa nouvelle théorie. Fresnel proposa un modèle *ad hoc* dans lequel l'éther, considéré alors comme le milieu de vibration de la lumière, n'était que partiellement entraîné par la terre en mouvement. En 1851 Hippolyte Fizeau réalisa une merveilleuse expérience confirmant la prédiction de Fresnel (Figure 1a). Le mystère de cet entraînement seulement partiel restait toutefois entier.

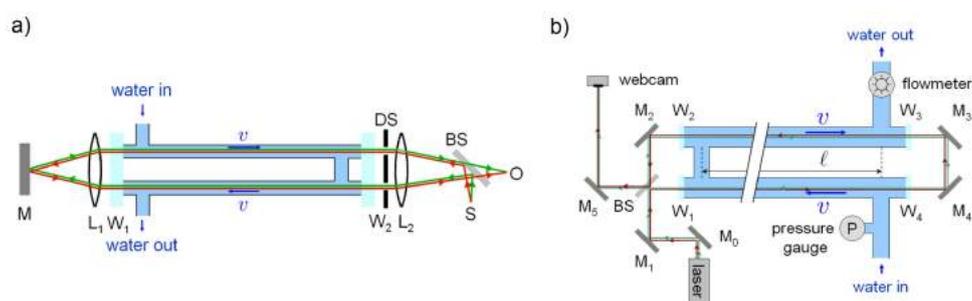


FIGURE 1 : Schémas des montages expérimentaux. a) de Fresnel b) notre réplique. S : source ; O : observateur ; M_i : miroir ; W_i : fenêtres ; L_i : lentilles ; BS : séparateur de faisceau ; DS : double fente. Notre montage est inspiré de celui de Michelson et Morley (1886) qui doutaient du résultat de Fizeau en regard de leur fameuse série d'expériences (1881-1887) démontrant l'invariance de la vitesse de la lumière.

En effet, il faudra attendre sa justification jusqu'à l'avènement de la relativité restreinte par Albert Einstein en 1905. Max von Laue montrera quelques temps plus tard qu'il provient d'une simple application de la loi de composition relativiste des vitesses. Einstein lui-même considérait que l'expérience de Fizeau, fondamentale pour la relativité restreinte, était de celles qui l'avaient le plus influencé.

2. ÉLÉMENTS THÉORIQUES ET RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

La lumière est supposée être une vibration d'un milieu appelé *éther* dans lequel elle se déplace à la vitesse c . Au voisinage d'un corps d'indice de réfraction n et en mouvement à la vitesse v par rapport aux étoiles lointaines on peut faire différentes hypothèses quant à l'entraînement local de l'*éther* par ce corps. L'*éther* pourrait pénétrer sans aucune résistance ce corps (entraînement nul) et la loi de composition galiléenne des vitesses donne pour vitesse de la lumière dans le corps $\mathbf{u}_{\text{Gal.}} = \mathbf{c}/n + \mathbf{v}$. A l'opposé, l'*éther* pourrait être localement totalement entraîné par le corps en question, leur vitesse relative nulle, et $\mathbf{u} = \mathbf{c}/n$. Fresnel postule une situation intermédiaire dans laquelle l'*éther* n'est que partiellement entraîné par le corps en mouvement et se déplace à l'intérieur de celui-ci à la vitesse $(1 - n^{-2})\mathbf{v}$, la valeur du coefficient $1 - n^{-2}$ étant ajustée pour rendre compte des résultats négatifs d'Arago. On a alors $\mathbf{u}_{\text{Fre.}} = \mathbf{c}/n + \mathbf{v}(1 - n^{-2})$.

Un tube en U dans lequel de l'eau circule à la vitesse v est inséré dans un interféromètre (Figure 1). On a représenté en vert et rouge la lumière qui se propage dans le même sens ou en sens opposé à l'eau. Le déphasage accumulé sur les bras de longueur ℓ est $\Delta\phi_{\text{Gal.}} = 2\pi \frac{v}{c} \frac{4\ell}{\lambda} n^2$ ou $\Delta\phi_{\text{Fre.}} = 2\pi \frac{v}{c} \frac{4\ell}{\lambda} (n^2 - 1)$ selon le modèle choisi. Pour des bras de longueur typique $\ell = 2.0\text{ m}$ à une longueur d'onde $\lambda = 0.5\ \mu\text{m}$ et $v = 6.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ les déphasages à mesurer sont d'environ une demie et un quart de frange...

Nous représentons sur la Figure 2 les images des franges, leur traitement numérique et les déphasages qu'on en déduit en fonction de la vitesse de l'eau. Les mesures s'accordent, à 8% près, avec la prédiction de Fresnel et excluent totalement la composition galiléenne des vitesses.

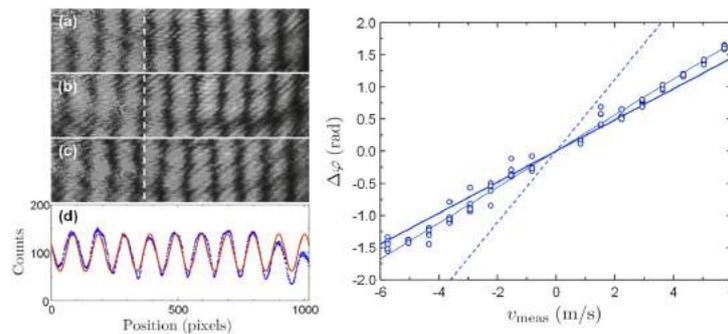


FIGURE 2 : Résultats expérimentaux. Gauche : images obtenues sur la webcam pour différentes vitesses, (a) $v = -5.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, (b) $v = 0.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, and (c) $v = 5.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Le pointillé blanc marque la position de la frange centrale pour $v = 0$. (d) traitement numérique de l'image : les points correspondent à une intégration en colonne de l'intensité et le trait rouge le meilleur ajustement sinusoïdal. Droite : déphasage mesuré en fonction de la vitesse de l'eau. Cercles : données brutes, ligne fine : meilleur ajustement linéaire, ligne épaisse : prédiction de Fresnel, pointillés prédiction galiléenne.

CONCLUSION

Soulignons le tour de force et le génie de la conception expérimentale de Fizeau. Seul un montage interférométrique, technique relativement récente à l'époque puisque les expériences de Thomas Young datent de 1802, permettait d'obtenir la sensibilité suffisante. Mais la turbulence de l'écoulement dans les tuyaux rendrait inopérant tout dispositif où l'on voudrait utiliser des tuyaux indépendants sur chaque bras. La configuration de Fizeau anticipe celles de type "Sagnac" dans lesquelles les rayons correspondant aux deux voies de l'interféromètre parcourent exactement le même chemin mais en sens inverse, éliminant ainsi le mode commun de turbulence.

RÉFÉRENCES

- [1] T. Lahaye, P. Labastie and R. Mathevet, "Fizeau's "aether drag" experiment in the undergraduate laboratory", *Am. J. Phys.*, vol. 80, p. 497, 2012.

RAYONNEMENT SYNCHROTRON ET MATÉRIAUX DU PATRIMOINE

Loïc Bertrand^{1,2}, Pierre Gueriau^{2,1}, Mathieu Thoury^{1,2}

¹ IPANEMA, CNRS, ministère de la culture et de la communication, UVSQ, USR3461, Université Paris-Saclay, F-91192 Gif-sur-Yvette, France

² Synchrotron SOLEIL, BP48 Saint-Aubin, F-91192 Gif-sur-Yvette, France

loic.bertrand@synchrotron-soleil.fr

RÉSUMÉ

L'hétérogénéité intrinsèque des matériaux anciens du patrimoine culturel, de l'archéologie, de la paléontologie et des paléoenvironnements en fait des candidats idéaux à une étude par spectroscopie ou imagerie synchrotron. Nous dresserons un bref historique de l'apport de ces techniques à leur compréhension, présenterons des travaux récents et esquisserons des pistes de développement futur.

MOTS-CLEFS : *synchrotron ; imagerie ; matériaux anciens ; patrimoine*

Depuis la fin des années 1980, la caractérisation sur source synchrotron est progressivement entrée comme part intégrante de nombreuses études portant sur des matériaux archéologiques, artistiques et paléontologiques [1, 2, 3]. En particulier, la révolution marquée par l'imagerie synchrotron au tournant du millénaire s'est avérée très adaptée à des matériaux dont le potentiel d'information est généralement à rechercher dans des fluctuations de composition et de structure à multi-échelles.

Après une brève revue des premières études marquantes de matériaux anciens sur source synchrotron, nous présenterons des travaux récents associant la plateforme européenne de recherche sur les matériaux anciens IPANEMA (CNRS, ministère de la culture et de la communication, UVSQ ; Paris-Saclay) et le Synchrotron SOLEIL. Nous évoquerons en particulier l'étude de l'environnement d'enfouissement de fossiles préservés dans un état exceptionnel et datant du Crétacé (env. 100 millions d'années) [4, 5], celle d'objets métalliques des premiers temps de la métallurgie de précision, et l'identification de matériaux d'artistes employés en peinture et en lutherie [6, 7, 8]. IPANEMA a été créée en 2010 et son nouveau bâtiment, attenant au synchrotron SOLEIL, a été inauguré en 2013. IPANEMA participe au développement de nouveaux instruments et d'approches méthodologiques dédiés (développement de la ligne de lumière PUMA, optimisée pour les matériaux anciens, dans les rayons X durs ; imagerie de photoluminescence dans l'UV lointain) et à l'analyse statistique des données.

Les développements récents sur synchrotron concernant l'étude de matériaux anciens visent à accroître les *dynamiques* spatiales, spectrales et de détection : imagerie haute définition, accroissement du rapport signal / bruit, extension des gammes d'excitation et de l'accordabilité pour l'imagerie de spéciation chimique et des défauts cristallins, mais également à une meilleure exploitation de la cohérence latérale des faisceaux : tomographie de rayons X par contraste de phase, ptychographie, diffraction cohérente [9]. L'imagerie à haute définition permet de caractériser des matériaux hétérogènes à haute résolution spatiale sur de grands champs de vue, et ainsi de déterminer des lois de comportement aux différentes échelles d'homogénéité du matériau pour mieux en comprendre l'origine, la *chaîne opératoire* de fabrication et d'usage, la circulation, les échanges ou l'altération. L'impossibilité de recréer les matériaux anciens au laboratoire entraîne la nécessité de les étudier *tels quels*. Il faut enfin noter que les approches mises en place pour déterminer les seuils maximaux d'exposition au rayonnement au-delà desquels apparaissent des dégâts d'irradiation à l'échelle macroscopique sont remis en cause pour l'imagerie haute définition. En effet, l'apparition de dommages locaux aux points les plus sensibles impose alors de rechercher un compromis avec l'exhaustivité des données recueillies [10].

Le couplage entre de telles approches sur grands instruments, études par instrumentation portable et prise en compte des problématiques portant sur les collections et données numériques a conduit la Commission européenne à lancer en mars 2016 la préfiguration de l'infrastructure européenne E-RIHS

(*European Research Infrastructure for Heritage Science*), pour l'étude des objets matériels du patrimoine, qui sera graduellement mise en place à l'horizon 2021 et que nous présenterons succinctement.

RÉFÉRENCES

- [1] K. Janssens, M. Alfeld, G. Van der Snickt, W. De Nolf, F. Vanmeert, M. Radepon, L. Monico, J. Dik, M. Cotte, G. Falkenberg, C. Miliani, and B. G. Brunetti, "The use of synchrotron radiation for the characterization of artists' pigments and paintings," *Ann. Rev. Anal. Chem.*, vol. 6, no. 1, pp. 399–425, 2013. [Online]. Available : <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-anchem-062012-092702>
- [2] L. Bertrand, L. Robinet, M. Thoury, K. Janssens, S. X. Cohen, and S. Schöder, "Cultural heritage and archaeology materials studied by synchrotron spectroscopy and imaging," *Appl. Phys. A*, vol. 106, no. 2, pp. 377–396, Feb 2012. [Online]. Available : <http://dx.doi.org/10.1007/s00339-011-6686-4>
- [3] P. Gueriau, S. Bernard, and L. Bertrand, "Synchrotron advanced imaging of paleontological specimens," *Elements*, vol. 12, no. 1, pp. 45–50, Feb 2016. [Online]. Available : <http://dx.doi.org/10.2113/gselements.12.1.45>
- [4] P. Gueriau, C. Mocuta, D. B. Dutheil, S. X. Cohen, D. Thiaudière, the OT1 consortium, S. Charbonnier, G. Clément, and L. Bertrand, "Trace elemental imaging of rare earth elements discriminates tissues at microscale in flat fossils," *Plos One*, vol. 9, no. 1, p. e86946, Jan 2014. [Online]. Available : <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0086946>
- [5] P. Gueriau, C. Mocuta, and L. Bertrand, "Cerium anomaly at microscale in fossils," *Anal. Chem.*, vol. 87, no. 17, pp. 8827–8836, 2015. [Online]. Available : <http://dx.doi.org/10.1021/acs.analchem.5b01820>
- [6] M. Thoury, J.-P. Echard, M. Réfrégiers, B. Berrie, A. Nevin, F. Jamme, and L. Bertrand, "Synchrotron UV-visible multispectral luminescence micro-imaging of historical samples," *Anal. Chem.*, vol. 83, no. 5, pp. 1737–1745, Feb 2011. [Online]. Available : <http://dx.doi.org/10.1021/ac102986h>
- [7] L. Bertrand, M. Réfrégiers, B. Berrie, J.-P. Echard, and M. Thoury, "A multiscale photoluminescence approach to discriminate among semiconducting historical zinc white pigments," *Analyst*, vol. 138, no. 16, pp. 4463–4469, Aug 2013. [Online]. Available : <http://dx.doi.org/10.1039/C3AN36874B>
- [8] J.-P. Echard, M. Thoury, B. H. Berrie, T. Séverin-Fabiani, A. Vichi, M. Didier, M. Réfrégiers, and L. Bertrand, "Synchrotron DUV luminescence micro-imaging to identify and map historical organic coatings on wood," *Analyst*, vol. 140, no. 15, pp. 5344–5353, 2015. [Online]. Available : <http://dx.doi.org/10.1039/C5AN00483G>
- [9] L. Bertrand, M. Cotte, M. Stambanoni, M. Thoury, F. Marone, and S. Schöder, "Development and trends in synchrotron studies of ancient and historical materials," *Phys. Rep.*, vol. 519, no. 2, pp. 51–96, Oct 2012. [Online]. Available : <http://dx.doi.org/10.1016/j.physrep.2012.03.003>
- [10] L. Bertrand, S. Schöder, D. Anglos, M. B. H. Breese, K. Janssens, M. Moini, and A. Simon, "Mitigation strategies for radiation damage in the analysis of ancient materials," *Trends Anal. Chem.*, vol. 66, pp. 128–145, Mar 2015. [Online]. Available : <http://dx.doi.org/10.1016/j.trac.2014.10.005>

LA VRAIE NATURE DE LA LUMIERE : UNE QUETE JAMAIS TERMINEE

Michèle Leduc

Laboratoire Kastler-Brossel, ENS, UPMC, Collège de France, CNRS

leduc@lkb.ens.fr

RÉSUMÉ

La « vraie » nature de la lumière a toujours été un objet d'interrogation au cours des siècles. Nous montrons ici la succession des différents modèles établis par une expérimentation de plus en plus habile et des théories mathématiques de plus en plus précises. Ces modèles ont fait l'objet de maints débats passionnés et même à plusieurs reprises de retournements spectaculaires, jusqu'à aujourd'hui où l'optique quantique et les fluctuations du vide ouvrent de nouveaux espaces à l'imagination, sans mettre un point final à la quête de la connaissance de la lumière.

MOTS-CLEFS : *optique ; ondes ; interférences ; quantique*

1. DE PYTHAGORE A NEWTON : UNE VISION MECANISTE DE LA LUMIERE

Depuis l'Antiquité l'Homme a cherché à faire entrer ses conceptions sur la lumière dans un cadre rationnel. Les premiers progrès sont liés à l'étude des événements astronomiques tels que les éclipses ou les phases de la Lune. Pythagore conçoit que la lumière se propage en ligne droite mais l'envisage comme allant de l'œil vers la source. Trois siècles plus tard, le traité « Optique » d'Euclide fonde les bases de l'optique géométrique et de la réflexion sur des miroirs pour les rayons visuels, toujours considérés comme distincts des rayons lumineux. C'est Alazen au Caire, vers l'année 1000, qui comprend que les rayons de lumière se propagent en ligne droite de l'objet à l'œil « comme une balle à l'extrémité d'une flèche ».

Les débuts de l'optique classique au 17^{ème} siècle sont à relier à l'invention de la lunette d'approche constituée par l'assemblage de deux lentilles, perfectionnée par Galilée. Partout en Europe se développent alors simultanément de multiples recherches : à Prague Johannes Kepler indique dans « Dioptrique » en 1610 que les objets forment des images sur le fond de l'œil. Isaac Newton étudie la lumière dans son cabinet à l'aide du prisme dont il décompose et recompose les couleurs. Il connaît bien les travaux de ses illustres prédécesseurs tels que Descartes, Boyle ou Hooke. Son célèbre Traité d'Optique paru en 1704 résulte de quarante années d'expériences faites par lui-même. Il y développe un modèle hétérogène de la lumière blanche où des particules constituent des rayons et possèdent des masses et des vitesses différentes selon les couleurs. C'est ainsi qu'il explique la réflexion et la réfraction à travers un milieu matériel, mais pas la diffraction, pourtant déjà observée par Grimaldi à cette époque.

2. HUYGHENS, YOUNG, FRESNEL, MAXWELL ... : LA LUMIERE EST UNE ONDE

Ce dernier phénomène ne sera interprété qu'avec la théorie ondulatoire de la lumière, issue des premiers travaux pionniers de Huyghens au 17^{ème} siècle, qui voyait la lumière « *comme une sorte d'ébranlement qui se propage en cercles dans un milieu étendu à partir de la source* ». Un peu oubliée pendant deux siècles, pendant lesquels le prestige de Newton est immense, la théorie ondulatoire de la lumière se développe avec Young par analogie avec ses expériences d'acoustique.

Il trouve que deux ondes lumineuses peuvent interférer et parvient à mesurer les longueurs d'onde correspondant à différentes couleurs. A la même époque Fresnel effectue le calcul mathématique rigoureux des franges d'interférence par addition des fronts d'onde et donne une interprétation complète du phénomène de diffraction. Toutefois les savants français de cette époque restent attachés à la vision mécaniste de Newton pour la lumière comme pour l'Univers. Il faut que Fresnel, mis au défi, réussisse avec Arago en 1819 la fameuse expérience dite du « point blanc de Poisson » pour convaincre les académiciens français de la validité de la théorie ondulatoire de la lumière.

Fresnel travaille aussi sur la polarisation de la lumière, avec Arago et après Biot. Il trouve que le mouvement ondulatoire de la lumière est transversal, et non pas longitudinal comme pour le son. Il fonde ainsi les bases de la théorie de la vibration transversale de la lumière, ouvrant la voie à la théorie classique de la lumière établie à la fin du 19^{ème} siècle par Maxwell: la lumière est une onde constituée d'un champ électrique et d'un champ magnétique qui se propagent en suivant les fameuses lois dite lois de Maxwell. On découvre alors que le spectre de la lumière s'étend bien au-delà du visible, d'une part dans le domaines des ondes ultra-violettes et au-delà (Roentgen découvre la radiographie avec les rayons X en 1895) et dans le domaine des ondes radio avec Hertz en 1885.

3. LA RÉVOLUTION QUANTIQUE

Pourtant nul n'aurait pu prévoir alors la révolution en physique que suscita l'avènement de la théorie quantique au 20^{ème} siècle. Déjà Planck avait imaginé les quanta d'énergie pour interpréter le spectre du corps noir. Il revient à Einstein d'inventer en 1905 le concept de quantum de lumière, baptisé photon en 1926, pour expliquer l'effet photoélectrique. Il semble qu'il y ait là un retour en arrière à la théorie corpusculaire de Newton dont la fausseté avait été démontrée. Les quanta lumineux d'Einstein rencontrent à leur tour le scepticisme des plus grands physiciens au fameux congrès Solvay de 1911. Il faut pourtant bien se résigner à faire coïncider les deux conceptions : la lumière est à la fois onde et particule. De plus la mécanique quantique est particulièrement subtile : on doit faire intervenir le concept de probabilité pour déterminer la probabilité de trouver le photon à un endroit. La dualité onde corpuscule est ensuite étendue par De Broglie dans sa thèse de 1924 à des particules matérielles telles que des électrons. Et l'histoire ne s'arrête pas là puisque depuis la fin du 20^{ème} siècle l'optique quantique s'applique à « intriquer » les photons les uns avec les autres et avec la matière, ce qui revient à des interférences de probabilités.

4. OU EST LA VÉRITÉ?

Pour finir, savons-nous aujourd'hui ce qu'est vraiment la nature de la lumière ? On peut certes faire une description mathématique complète et non ambiguë des phénomènes lumineux. On a aussi besoin d'images physiques simples pour stimuler l'intuition : on parle d'ondes, de particules, d'interférences de probabilités, de fluctuations du vide ...Il semble probable qu'il reste encore beaucoup à découvrir sur la vraie nature de la lumière.

RÉFÉRENCES

[1] Voir par exemple la revue faite par : B.Maitte "les théories de la lumière dans une science en mouvement", page 16, dans le numéro spécial de Reflets de la Physique n° 47-48 "Sources et ressources".

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

A. Escarguel¹, R. Baude¹

¹ 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 Bousquet¹, Lionel Canioni¹, Jean-Paul Guillet¹, Martin Hachet¹, Stéphanie Fleck²,
David Furio¹, Benoit Coulais¹, Jeremy Bergognat³,**

¹Université de Bordeaux, 351 cours de la Libération, 33405 Talence

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

³Cohabit, IUT de Bordeaux, 15 rue Naudet CS102017, 33175 Gradignan

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 Latour¹, Marie Godard², Vincent Guillet³, Marion Jacquy⁴

¹ IMNC, Université Paris-Sud, CNRS, Université Paris-Saclay, Orsay, France

² CSNSM, Université Paris-Sud, CNRS, Université Paris-Saclay, Orsay, France

³ IAS, Université Paris-Sud, CNRS, Université Paris-Saclay, Orsay, France

⁴ LAC, CNRS, Université Paris-Sud, ENS Cchan, Université Paris-Saclay, Orsay, France

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.

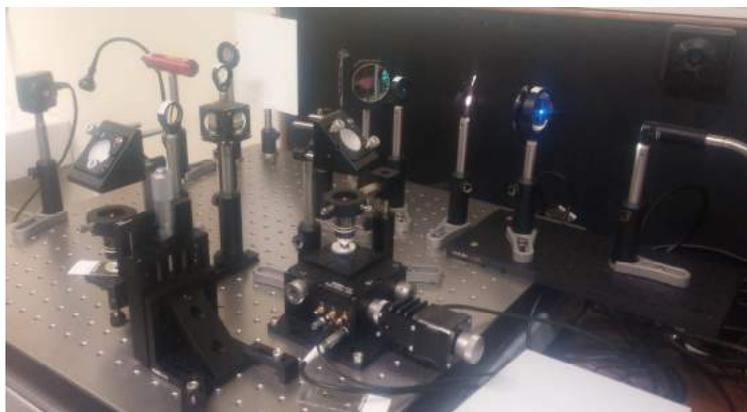


Fig. 1 : Dispositif d'imagerie OCT monté, aligné, caractérisé et exploité par les étudiants.

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. Dutertre¹, B. Fabre², E. D'humière², S. Petit², D. Lyoen³, J. Dronval¹, E. Boeri⁴ and E. Cormier^{2,4}

¹ IDSC,

² CELIA Université de Bordeaux- CNRS-CEA-UMR 5107, 33405 Talence, France

³ NOVO3D,

⁴ PYLA,

laurent.dutertre@idsc-group.com, baptiste.fabre@u-bordeaux.fr, emmanuel.dhumieres@u-bordeaux.fr,
stephane.petit@u-bordeaux.fr, dlyoen@novo3d.fr, julien.dronval@idsc-group.com,
e.boeri@pyla-routedeslasers.com, 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 Mathevet¹

¹ 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).

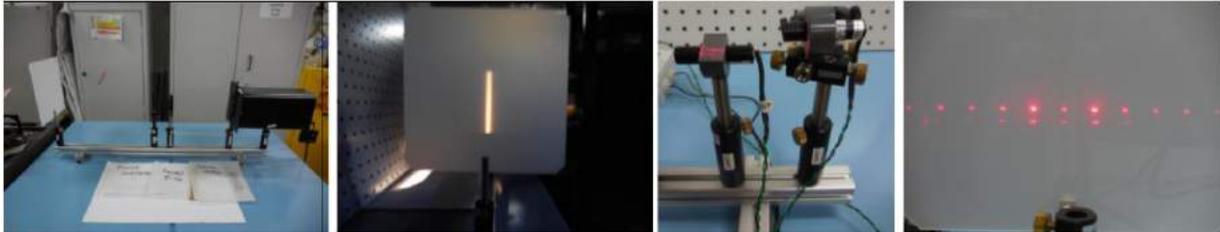


FIGURE 2 : de gauche à droite : a) montage pour diffraction/interférences en lumière blanche b) figure de diffraction d'une fente. c) montage à deux diodes laser 650 et 635nm d) diffraction par un réseau correspondante.

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.