

Photoniques

LA LUMIÈRE ET SES APPLICATIONS

ENTRETIENS

Guillaume Adam
Antoine Godard

EXPÉRIENCE

Modulateur spatial
à adressage optique

COMPRENDRE

La sphère
de Poincaré

ACHERER

Choisir la bonne
table optique

DOSSIER

MÉTROLOGIE OPTIQUE

- Métrologie de l'apparence : mesurer ce que l'on voit
- Métrologie optique de surfaces planes multiples par la technologie Shack Hartmann
- Microscope optique à résolution nanométrique pour la texturation de surface par laser de matériaux de grandes dimensions



- La télédétection lidar : des fondements aux applications industrielles



High-end **wavefront**
metrology

We read the light
you write the future.

Photoniques est éditée par la Société Française de Physique, association loi 1901 reconnue d'utilité publique par décret du 15 janvier 1881 et déclarée en préfecture de Paris.

<https://www.sfpnet.fr/>

Siège social : 33 rue Croulebarbe,
75013 Paris, France
Tél. : +33(0)1 44 08 67 10

CPPAP : 0124 W 93286
ISSN : 1629-4475, e-ISSN : 2269-8418

www.photoniques.com

Le contenu rédactionnel de Photoniques est élaboré sous la direction scientifique de la Société française d'optique
2 avenue Augustin Fresnel
91127 Palaiseau Cedex, France
Florence HADDOUCHE
Secrétaire Générale de la SFO
florence.haddouche@institutoptique.fr

Directeur de publication

Jean-Paul Duraud, secrétaire général de la Société Française de Physique

Rédaction

Rédacteur en chef
Nicolas Bonod
nicolas.bonod@edpsciences.org

Journal Manager
Florence Anglézio
florence.anglezio@edpsciences.org

Secrétariat de rédaction et mise en page
Agence de communication la Chamade
<https://agencelachamade.com/>

Comité de rédaction

Philippe Adam (DGA, SFO),
Adeline Bonvalet (CNRS),
Benoît Cluzel (Univ. de Bourgogne),
Sara Ducci (Univ. de Paris),
Nathalie Destouches (Univ. J. Monnet),
Sylvain Gigan (Sorbonne Université),
Aurélien Jullien (CNRS),
Patrice Le Boudec (IDIL Fibres Optiques),
Ariel Levenson (CNRS)
Christophe Simon-Boisson (Thales LAS France)

Advertising Manager

Bernadette Dufour
Cell phone + 33 7 87 57 07 59
bernadette.dufour@edpsciences.org

Photoniques est réalisé par
EDP Sciences,
17 avenue du Hoggar,
P.A. de Courtaboeuf,
91944 Les Ulis Cedex A, France
Tél. : +33 (0)1 69 18 75 75
RCS : EVRY B 308 392 687

Gestion des abonnements

abonnements@edpsciences.org

Impression

Fabrique imprimeur
B.P. 10
87500 Saint-Yrieix la Perche
Dépôt légal : mars 2026
Routage : STAMP (95)



© EDP Science/SFP à l'exception des articles publiés avec une licence CC-BY dont les droits reviennent aux auteurs.

Éditorial



NICOLAS BONOD

Rédacteur en chef

Transmission : de la lumière aux savoirs

La transmission est une notion centrale en optique et en photonique. Transmettre un signal, une information, un savoir : cette notion traverse nos activités, et ce numéro de Photoniques vous propose d'en explorer plusieurs facettes.

Transmettre pour caractériser et fiabiliser. Les besoins en caractérisation et en mesure ne cessent de croître. Le dossier consacré à la métrologie optique montre combien la lumière s'impose comme un outil privilégié pour sonder la matière et quantifier dimensions, formes et propriétés. Sa cohérence, sa courte longueur d'onde, mais aussi l'accès à la phase, à l'amplitude ou à la polarisation, permettent de caractériser matériaux et systèmes avec une finesse unique. L'adage vaut aussi pour la télédétection LiDAR. Dans la rubrique *Perspective*, vous trouverez un article dédié à cette technologie en plein essor, rédigé par un collectif d'experts du club LiDAR de la SFO.

Transmettre pour former. Nous souhaitons depuis longtemps mettre à l'honneur les parcours et les filières d'enseignement. Ce premier numéro 2026 inaugure une rubrique dédiée aux formations. C'est donc avec un plaisir particulier que nous ouvrons cette série par un focus sur le BTS photonique. Nous la poursuivrons dans les prochains numéros afin de mettre en lumière la richesse de l'offre de formation en photonique.

Transmettre pour témoigner. La rubrique *Expérience marquante* revient sur les développements pionniers des modulateurs spatiaux à adressage optique. C'est l'occasion de remercier ces scientifiques qui consacrent un temps précieux à la rédaction de ces articles et qui, ce faisant, œuvrent comme de véritables passeurs de connaissances. En résonance avec ces enjeux, la rubrique *Comprendre* propose une présentation pédagogique de la sphère de Poincaré, un outil conceptuel essentiel pour représenter les états de polarisation. *Transmettre pour faire vivre une communauté.* Nous publions un long entretien avec Antoine Godard, directeur scientifique du domaine physique de l'ONERA, qui entame son mandat de président de la SFO. Nous souhaitons également la bienvenue à Philippe Grangier, président entrant de la SFO. Notre société savante a la chance de pouvoir compter sur de telles personnalités scientifiques, qui s'investissent et se transmettent, mandat après mandat, des projets au long cours faisant de la SFO une société unique, vivante et dynamique. Transmettre savoirs, avancées scientifiques et informations fait partie de l'ADN de Photoniques. Pour cette mission, la revue peut s'appuyer sur une communauté scientifique engagée, capable de partager les dernières avancées et de faire de la photonique un savoir et une technologie de demain.



Sommaire

www.photoniques.com

N° 136

13 **ENTRETIENS :** Guillaume Adam Antoine Godard



19

La Télédétection lidar :
des fondements
aux applications
industrielles

51

La précision
commence à la base :
choisir la bonne
table optique



ACTUALITÉS

- 03 Éditorial et actualités de la SFO
- 05 Informations partenaires
- 13 Témoignage d'entrepreneur : G. Adam
- 16 Entretien : A. Godard

PERSPECTIVE

- 19 La télédétection lidar : des fondements aux applications industrielles

EXPÉRIENCE MARQUANTE

- 24 Modulateur spatial à adressage optique : structure BSO-CL et applications

DOSSIER : MÉTROLOGIE OPTIQUE

- 29 Métrologie de l'apparence : mesurer ce que l'on voit
- 34 Métrologie optique de surfaces planes multiples par la technologie Shack Hartmann
- 39 Microscope optique à résolution nanométrique pour la texturation de surface par laser de matériaux de grandes dimensions

FORMATION

- 45 À Lannion, le BTS photonique au cœur d'un écosystème photonique en plein essor !

COMPRENDRE

- 47 La sphère de Poincaré

ACHERETER

- 51 La précision commence à la base : choisir la bonne table optique

PRODUITS

- 57 Nouveautés

Annonceurs

2B Lighting 33
 American Elements **IV° couv.**
 Edp sciences 21

EPIC 11
 HTDS 21
 Opton Laser 55
 Phasics **II° couv., 43**

Scientec 53
 SFO 05
 Spectrogon 23
 Trioptics 37

Wavetel 27

Crédit photo (couverture) : © iStockPhoto

L'édito de la SFO



PHILIPPE GRANGIER
Président entrant de la SFO



ANTOINE GODARD
Président de la SFO



FRANÇOIS SALIN
Président sortant de la SFO

Harmoniques et prix Nobel

Au moment où nous écrivons cet édito, nous sommes dans la dernière ligne droite dans la collecte des soumissions pour le congrès Optique Bourgogne Franche-Comté. Sous la co-présidence scientifique de Bertrand Kibler et Daniel Brunner, et la présidence locale de Guy Millot, le programme s'annonce exceptionnel et s'ouvrira avec une conférence inaugurale d'Anne L'Huillier, prix Nobel de physique 2023. Tels les atomes de gaz nobles générant les harmoniques d'ordres élevés, les comités scientifiques des clubs de la SFO vont délivrer des sessions qui vont s'agencer en parfait accord de phase pour produire un programme intense et fascinant. Sans vouloir relancer le débat entre Bergson et Einstein sur la nature du temps, cette semaine devrait passer aussi vite qu'une impulsion attoseconde tant elle sera passionnante.

Au-delà de l'excellence de ses travaux de recherche, notre grande conférencière plénière incarne d'autres valeurs partagées par la SFO qui seront largement présentes dans le congrès telles que la promotion de la parité et la transmission des savoirs vers et avec les jeunes. L'importance de ces activités est très bien illustrée par la vidéo devenue virale où Anne L'Huillier reçoit l'appel du comité Nobel pendant son cours et retourne ensuite auprès de ses étudiants. En lien étroit avec notre commission Enseignement, le congrès sera l'occasion de présenter et contribuer au déploiement du projet LUMIFORM 2030 dont l'objectif est d'accompagner les formations en photonique du niveau BAC à BAC+3, et de développer des actions favorisant l'attractivité de ces filières. Cela résonne particulièrement bien avec

ce numéro de Photoniques où nous inaugurons une nouvelle rubrique dédiée aux formations en optique-photonique.

Le prix Nobel se situe évidemment à l'ultime sommet dans la hiérarchie des prix scientifiques. Sans atteindre cette hauteur, nos prix de la SFO célèbrent et récompensent aussi des parcours ou des réalisations remarquables. Un moment clé du congrès sera la remise de ces prix de la SFO qui couvrent chacun un moment de la carrière, allant des prix de thèse que nous lançons cette année jusqu'à la reconnaissance d'une carrière de chercheur ou chercheuse, ou visant à promouvoir l'innovation et la diffusion des savoirs.

Pour finir de vous convaincre de vous inscrire à Optique BFC, soyez certains que telles les composantes spectrales d'une impulsion attoseconde, bons exposés et bonne chère ne peuvent donner lieu qu'à une combinaison des plus cohérentes à Dijon.

Photoniquement vôtre

François Salin

Président et CEO Ilasis laser
Président sortant de la SFO

Antoine Godard

Directeur scientifique
du domaine physique – ONERA
Président de la SFO

Philippe Grangier

Directeur de recherche CNRS
Président entrant de la SFO



■ **OPTIQUE BFC 2026**
Dijon - Palais des congrès

+ 650 participants attendus

+ 70 h de sessions thématiques

OPTIQUE BFC 2026

Appel à contributions jusqu'au 12 mars 2026
Première et dernière prolongation

Les communications sont acceptées aussi bien en anglais qu'en Français

www.sfoptique.org

Des actions concrètes pour parité au congrès OPTIQUE BFC 2026

La SFO, la Société Française d'Optique, affirme depuis plusieurs années un engagement clair en faveur de l'égalité femmes-hommes. Au-delà des intentions, cet engagement se traduit par des actions concrètes, visibles et structurantes au sein de ses congrès et de sa communauté scientifique. À l'occasion du congrès OPTIQUE BFC 2026, la Commission Parité renforce ses initiatives avec deux dispositifs phares : un atelier participatif de théâtre-forum et des déjeuners intergénérationnels dédiés aux femmes scientifiques.

Atelier Parité : le théâtre-forum, un espace pour expérimenter le changement

À travers une approche participative et immersive, l'atelier vise à sensibiliser la communauté scientifique et industrielle aux enjeux de la parité et de l'égalité professionnelle dans le domaine de l'optique et de la photonique. Le théâtre-forum est une forme de théâtre social et participatif née au Brésil dans les années 1970 sous l'impulsion d'Augusto Boal, fondateur du Théâtre de l'Opprimé.

Son principe : mettre en scène une situation problématique inspirée de situations réelles, puis inviter le public à intervenir pour proposer et expérimenter d'autres issues possibles.

Dans le contexte scientifique, ces situations peuvent concerner :

- les biais inconscients dans les recrutements,
- la prise de parole en réunion,
- la répartition des responsabilités,
- l'équilibre entre carrière et vie personnelle,
- ou encore les dynamiques implicites dans les laboratoires et entreprises.

En partageant des expériences concrètes et en testant collectivement des pistes de transformation, cet espace d'échange interactif permet d'identifier les freins, de valoriser les bonnes pratiques et de construire ensemble des solutions durables pour favoriser la mixité et l'inclusion.

Rendez-vous : jeudi 9 juillet 2026 de 14h30 à 16h30.

Déjeuners Parité Intergénérationnels : transmettre, inspirer, soutenir

Les déjeuners parité favorisent la rencontre entre différentes générations de femmes scientifiques : doctorantes, jeunes chercheuses, enseignantes-chercheuses et cadres du secteur industriel.

Dans un cadre convivial et confidentiel, ces moments d'échange permettent :

- de partager des expériences de parcours,
- d'évoquer les défis rencontrés,
- de transmettre des conseils de carrière,
- d'identifier des leviers d'évolution,
- et de créer des réseaux de soutien durables.

Ces rencontres intergénérationnelles jouent un rôle clé dans la construction de trajectoires scientifiques ambitieuses. Elles contribuent à renforcer la confiance, à rendre visibles des modèles de réussite variés et à encourager l'audace professionnelle.

Rendez-vous : jeudi 9 juillet 2026 de 12h30 à 14h00.

Une parité visible au plus haut niveau scientifique

À OPTIQUE Bourgogne Franche-Comté 2026, la programmation des conférences plénières illustre un équilibre exemplaire, avec une représentation 50 % femmes – 50 % hommes parmi les intervenants invités. L'édition s'ouvrira avec la conférence inaugurale d'Anne L'Huillier, Prix Nobel de Physique 2023, affirmant d'emblée l'ambition scientifique et internationale du congrès.

Les conférences plénières réuniront des personnalités majeures issues des plus grands laboratoires européens, couvrant un large spectre de thématiques, de la physique fondamentale aux applications émergentes : Hatice Altug (EPFL), Anne Amy-Klein (LPL), Roel Baets (Ghent), John Dudley (FEMTO-ST), Sylvain Gigan (LKB), Hélène Perrin (LPL), Carlo Sirtori (ENS), Birgit Stiller (MPL & LUH) et Giovanni Volpe (Gothenburg). Cet équilibre au plus haut niveau scientifique témoigne d'un engagement structurant de la SFO en faveur d'une représentation équitable et durable dans la communauté optique-photonique.

CONGRESS

OF THE



July 06/10, 2026

OPTIQUE

**BOURGOGNE
FRANCHE COMTÉ**

WELCOME TO DIJON, FRANCE

2026



www.sfoptique.org

AGENDA

■ AfterPhotonique 2026 : rendez-vous conviviaux de la communauté

Les **26 février, 4 juin et 17 septembre 2026** seront l'occasion de **nouveaux moments conviviaux** entre membres de la communauté photonique, avec échanges informels, discussions sur l'actualité et ses impacts sur la filière !

■ WHAT'S ON 2026 – Édition canadienne : coopération France-Canada

Les **19 & 20 mars 2026** dès 9h30, sur le **Plateau de Saclay**, une **délégation canadienne semi-conducteurs & photonique** viendra à la rencontre de l'écosystème francilien : visites d'entreprises, présentations croisées et rendez-vous **B2B** pour faire émerger des collaborations concrètes.

■ EMP26 : microélectronique & photonique en Europe

Du **20 au 24 avril 2026**, l'EMP26 rassemblera industriels, chercheurs et institutionnels autour des enjeux d'innovation, de souveraineté technologique et de partenariats européens. Au programme : conférences, rencontres d'affaires et temps de networking pour accélérer les projets collaboratifs.

CONTACT

Vous souhaitez connaître l'écosystème de la photonique, développer de nouvelles collaborations majoritairement en Île de France mais aussi hors Île de France, vous impliquer dans des secteurs stratégiques tels que la Data, l'IA, le Quantique, la Décarbonation, le Semi-Conducteur alors n'hésitez plus et rejoignez-nous ! Une question ? Un renseignement ?

Contactez Najwa Abdeljalil, Coordinatrice du Hub : najwa.abdeljalil@systematic-paris-region.org



École de production Photon : une réponse opérationnelle aux besoins de la filière



Portée par iXcampus, l'École de production Photon, implantée à Saint-Germain-en-Laye, vise à répondre au manque identifié de compétences techniques dans les métiers de la photonique. Le projet s'appuie sur le modèle des écoles de production, associant formation par la pratique, immersion en envi-

ronnement industriel et réalisation de commandes réelles. Le comité de pilotage du Hub Optics & Photonics de Systematic Paris-Region a été impliqué dès les phases amont du projet, notamment pour expertiser le projet et mobiliser les acteurs de la filière. Cette implication a permis d'ancrer l'École Photon dans les réalités du terrain et de favoriser l'adéquation entre formation, compétences attendues et débouchés industriels.

ASTEERICS : STRUCTURATION DES COMPÉTENCES EN MICROÉLECTRONIQUE

Le **28 janvier** a marqué le lancement officiel d'ASTEERICS – French Chips Competence Center, un centre de compétences dédié à la microélectronique et aux semi-conducteurs. L'objectif est de renforcer l'accompagnement des industriels, PME et acteurs de la recherche sur l'ensemble du



cycle de développement des composants, de la conception à l'industrialisation. Systematic Paris-Region fait partie intégrante du projet ASTEERICS, qui s'inscrit dans la continuité de son engagement sur la thématique des semi-conducteurs. Le pôle est en effet déjà fortement mobilisé sur ces enjeux à travers son **Groupe de Travail Semi-conducteurs**, qui contribue à structurer les échanges, identifier les besoins industriels et favoriser l'émergence de projets collaboratifs. ASTEERICS proposera des services d'expertise, de formation et d'accès aux infrastructures, en réponse aux tensions actuelles sur la filière.

Formation PhotonHub au III-V Lab : renforcer les compétences technologiques

Dans le cadre du programme PhotonHub Phactory, le III-V Lab propose une série de formations dédiées aux applications photoniques stratégiques, ciblant notamment les infrastructures numériques, la sécurité, la défense et le spatial. L'objectif est d'apporter aux participants une vision concrète des technologies photoniques et de leurs usages industriels. Une journée en présentiel est organisée le 04 Juin 2026 sur le site du III-V Lab à Palaiseau. L'alternance entre immersion en laboratoire, démonstrations technologiques et modules en ligne permet d'aborder à la fois les fondamentaux et des cas d'usage appliqués. Cette formation s'adresse aux ingénieurs et industriels souhaitant consolider leurs compétences et mieux appréhender le potentiel de la photonique dans des contextes technologiques et industriels exigeants. Elle s'inscrit dans une démarche de transfert de compétences et de montée en maturité technologique, en cohérence avec les besoins exprimés par les acteurs de la filière photonique.

SPIE Photonics West 2026 : un bilan mitigé

Le salon SPIE Photonics West à San Francisco vient de s'achever fin janvier. Photonics France était présent pour ce rendez-vous incontournable pour la filière.



Pour cette édition 2026, les fédérations et pavillons ont fait un constat commun : la baisse de fréquentation (moins de contacts mais plus de qualité des échanges) et l'augmentation sensible des coûts d'exposition et de mission. La politique américaine actuelle décourage et inquiète les industriels, dont le salon pâtit. Les avis sont mitigés sur l'intérêt à exposer au salon.

Le salon fut néanmoins agrémenté d'un cocktail sur le pavillon français avec la présence du vice-consul, une conférence organisée par le CEA-Leti LETI et le 25^e anniversaire d'Amplitude.

Près de 30 adhérents de Photonics France étaient présents pour présenter leurs dernières innovations : AeroDIODE, ALPhANOV, Alpha-RLH, Amplitude Laser, AUREA Technology, Bertin Alpao, Bloom Lasers, Cailabs, CEA-Leti, Cedrat Technologies, Cristal Laser, Edmund Optics, Exail, Exosens, GLOphotonics, Hamamatsu, HEF Photonics, Horiba, Imagine Optic, Le Verre Fluoré, Leukos, Lumibird, Lynred, Mahr, Mitutoyo, NKT Photonics, Oxxius, Phasics, Photonics Bretagne, PI France, Polytec, Schott, STIL Marposs, Symetrie, Teem Photonics, Thales, Wyse Light.

Les conclusions du projet PhOENIX présentées en webinaire

Alphanov, PYLA, le CATIE et Photonics France achèvent leur travail commun depuis 3 ans dans le cadre du projet PhOENIX. Leur étude des outils pédagogiques numériques et leur synthèse des bonnes pratiques sera présentée lors d'un webinaire le 10 mars prochain.

Les outils pédagogiques numériques se démocratisent et apparaissent comme des solutions de choix pour former un public hétérogène, tant dans ses qualifications initiales que dans ses possibilités matérielles de formation. Mais leur adoption apparaît souvent limitée, leurs impacts trop rarement évalués.

Les résultats du projet Phoenix seront présentés en webinaire, exposant les enjeux de conception centrée sur les besoins et l'évaluation de technologies de formation pour le cas spécifique de la photonique en France. Nous vous donnons rendez-vous mardi 10 mars de 11h à 12h en visioconférence. Inscription sur le site orientation-photonique.org.



Bienvenue à notre nouvel adhérent !



PhotonikBiz est spécialisé dans l'accompagnement des entreprises de la photonique en business développement, en organisation commerciale et mentor des dirigeants sur les méthodes de vente et les stratégies.

Adhérer à Photonics France, c'est bénéficier de nombreux services pour développer votre réseau professionnel et vos activités. C'est contribuer également à une représentation solide de toute la filière photonique auprès des pouvoirs publics. Rejoignez-nous !

AGENDA

Nos prochains rendez-vous :

- **Le projet PhOENIX**
10 mars 2026 – webinaire

- **Le logiciel en photonique**
18 mars 2026 – webinaire

- **Global Industrie, espace photonique**
30 mars - 2 avril 2026 – Paris

- **Assemblée générale**
3 avril 2026 – Paris

- **Rencontre des nouveaux adhérents**
9 avril 2026 - webinaire

- **SPIE Photonics Europe**
12-16 avril 2026 – Strasbourg

CONTACTER
PHOTONICS FRANCE

contact@photonics-france.org
www.photonics-france.org

En chiffre

8 C'est le nombre de start-up de la cohorte 2026 de Luminedge ! Co-fondé par l'Institut d'Optique et iXcampus, puis rejoint par HEC Paris, LuminEdge est un programme d'accompagnement entrepreneurial dédié aux start-up à haute intensité scientifique, de la recherche à l'industrialisation. Il s'appuie notamment sur les Campus d'innovation 503 de l'Institut d'Optique. Félicitations à Moon Photonics, ICON Photonics, HyprView, Synthwave Lasers, Flatlight, ERPHOS, View Technology et XIMED.
www.luminedge.fr

AGENDA DE LA FORMATION CONTINUE

■ **Approche contemporaine des fondamentaux du traitement d'image et de la vision par ordinateur**
07-09 avril 2026

■ **Conception de Systèmes Optiques sous ZEMAX avec des Composants Commerciaux**
04 au 05 mai 2026
12 au 13 mai 2026

■ **Infrarouge thermique : choix et utilisation d'une caméra**
05 au 07 mai 2026

■ **Capteurs à fibres optiques**
11 au 12 mai 2026

■ **Colorimétrie**
12 au 13 mai 2026

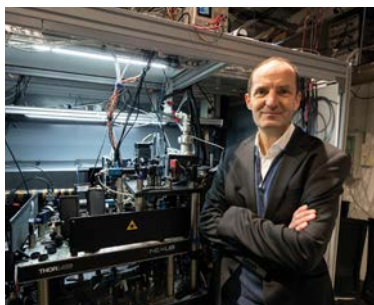
■ **L'optique sans calcul**
18 au 20 mai 2026

■ **Conception optique avec CodeV®**
18 au 22 mai 2026

CONTACT
Clémentine Bouyé,
responsable
de la communication
clementine.bouye@institutoptique.fr

Physique quantique : Deux titulaires des chaires Alain Aspect pour connecter les écosystèmes français et québécois

© Laurence Godart



Le 4 février 2026, l'Institut d'Optique Graduate School, l'Université de Sherbrooke et iXcampus ont annoncé la nomination des premiers titulaires des deux chaires Alain Aspect de recherche et formation en physique quantique, lancées en 2024. Ils auront pour mission de rapprocher deux écosystèmes académiques et industriels complémentaires, unis par une même culture d'innovation francophone.

Deux titulaires pour une ambition commune

Côté français, la chaire Alain Aspect « Sciences et technologies de la lumière et du quantique », portée par l'Institut d'Optique et iXcampus, est confiée à Antoine Browaeys, directeur de recherche CNRS au Laboratoire Charles Fabry (Institut d'Optique, CNRS, Université Paris-Saclay).

Ses travaux porteront sur des recherches de pointe en physique et technologies quantiques, intégrant la question des impacts sociétaux et environnementaux de ces technologies. La chaire comprend également un volet formation d'excellence ainsi qu'un programme de financement de nouvelles thématiques de recherches.

À l'Université de Sherbrooke (Québec, Canada), la chaire Alain Aspect « Système de traitement de l'information quantique » est attribuée à Mathieu Juan, professeur agrégé et directeur adjoint de l'Institut quantique.

L'objectif de ses recherches sera d'accélérer l'émergence de nouvelles technologies dans le domaine des interconnexions quantiques, en s'appuyant sur la forte présence d'entreprises développant différents types d'ordinateurs quantiques. La chaire comprend également un important volet formation, visant à rapprocher les domaines de l'optique quantique et des circuits quantiques.

Un écosystème collaboratif au service d'une culture d'innovation francophone

Ancrées respectivement à Paris et à Sherbrooke, ces deux chaires conjuguent les forces de deux écosystèmes complémentaires. La culture d'innovation francophone qui sous-tend ces projets s'exprimera de part et d'autre de l'Atlantique : les chaires favoriseront la création de synergies durables entre recherche, formation et monde industriel, en lien étroit avec les besoins actuels de la société.

UN NOUVEAU LABORATOIRE DE RECHERCHE COMMUN ENTRE L'INSTITUT D'OPTIQUE, LE CNRS ET LE CEA DIF

Le Laboratoire de Recherche Commun DESIDIX (Développement et Études de Systèmes Innovants pour les Diagnostics de l'Infrarouge au domaine X) entre le CEA DIF, le CNRS et l'Institut d'Optique a été inauguré le 1^{er} décembre dernier dans les locaux de l'Institut d'Optique. Ce Laboratoire de Recherche Commun vise à renforcer et ancrer dans le long terme la collaboration déjà bien établie entre le Laboratoire Charles Fabry et le CEA DIF pour le développement de technologies liées ou dédiées aux diagnostics plasma, notamment des miroirs multicouches pour spectromètres et imageurs X et des sources lumineuses à concentrateurs.

Photonics Bretagne et ses adhérents brillent à Photonics West



Du 17 au 22 janvier, Photonics Bretagne a exposé sur le Pavillon France à Photonics West à San Francisco, pour mettre en avant notamment son expertise en fibres optiques spéciales ainsi que l'excellence et l'innovation du secteur

photonique breton et français aux côtés de ses adhérents : Exail, Leukos, Oxxius, Le Verre Fluoré, Cailabs, BKtel Photonics, Fiber Optics Group (IDIL / SEDI-ATI), Lumibird, Polytec, Toptica, Imagine Optic, Alpha-RLH, ALPhANOV, Amplitude, Thales, Laser Components, OptoSigma, et EXFO. Un "French Apéro" en présence du vice-consul a également permis de renforcer les échanges entre acteurs français et internationaux.

Oxxius renforce son positionnement international avec l'acquisition de 89 North

Oxxius acquiert la société américaine 89 North, spécialisée dans les systèmes d'illumination laser et d'imagerie avancée. Cette opération stratégique vise à élargir et renforcer l'offre technologique d'Oxxius, notamment sur le marché nord-américain, à destination des sciences de la vie et de la microscopie avancée. Cette complémentarité ouvre la voie à des solutions toujours plus intégrées, combinant sources laser, électronique de contrôle et systèmes optiques, afin de répondre aux attentes des fabricants d'instruments et des laboratoires de recherche. Par ailleurs, l'entreprise adopte une nouvelle identité graphique. Nouveau logo, nouvelle charte graphique et nouveau site web viennent soutenir cette dynamique de croissance.



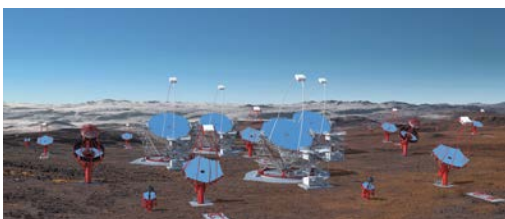
Arlumen et Imagine Optic : une collaboration autour de l'optique adaptative

Arlumen a travaillé avec Imagine Optic sur un projet intégrant un miroir déformable avec une matrice de micro-actionneurs mécaniques. Développé et breveté par Imagine Optic, le système mécatronique inclue un assemblage mécanique de haute précision confié à Arlumen. La multitude de petits actionneurs qui composent le système, permet de corriger en temps réel la planéité d'un miroir et ainsi maîtriser le front d'onde du faisceau réfléchi, une technologie utilisée dans l'astronomie et l'imagerie de précision.

Fiber Optics Group (FOG) : une direction collégiale pour unifier et dynamiser le groupe

Depuis le 1^{er} janvier 2026, un Comité Exécutif assure l'orientation stratégique et la gestion opérationnelle des trois filiales du Groupe - SEDI-ATI, IDIL et FiberTech Optica : Claire GUYONNET – Présidente / Direction Commerciale et Marketing, Boris PEDRONO – Directeur Général / Direction Industrielle et Produits, et Romain DUBREUIL – Directeur Général / Direction Administrative, Financière, Juridique et Services Supports.

KERDRY-HEF GROUPE : QUAND LES MIROIRS BRETONS OUVRENT UNE NOUVELLE FENÊTRE SUR L'UNIVERS



L'entreprise lannionnaise Kerdry, filiale du groupe HEF, a remporté un marché stratégique auprès du CEA-IRFU (Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers), dans le cadre du projet international d'observatoire

gamma CTA (Cherenkov Telescope Array). Kerdry assurera l'ensemble de la chaîne de valeur, de la fabrication au traitement optique, de 700 miroirs hexagonaux destinés aux télescopes MST (Medium Size Telescopes) de 12 mètres de diamètre. Les miroirs sont conçus avec une structure allégée en nid d'abeilles, combinant robustesse mécanique et performance optique, jouant ainsi un rôle clé dans la détection des rayonnements gamma de très haute énergie. Ils seront installés sur le site chilien de l'observatoire, l'un des meilleurs au monde, et permettront d'étudier certains des phénomènes les plus violents de l'Univers, tels que la formation des étoiles ou les trous noirs.

AGENDA

- **OFC**
15-19 mars, Los Angeles (États-Unis)
- **Matching Mission**
PhotonQBoost – Fabrication et optique industrielle
24-26 mars, Prague (République Tchèque)
- **Global Industrie**
30 mars-2 avril, Paris
- **JTech Photonique & Végétaux**
2 avril, Saint-Malo
- **Photonics Europe**
12-16 avril, Strasbourg
- **Meetup Mobilité & Photonique**
28 mai, Rennes

Actualités

24 janvier 2026 : Salon des masters du monde, Paris – un stand NANO-PHOT était présent

Depuis début février, les 15 étudiants M2 ont tous trouvé un stage dans des laboratoires et entreprises

Le recrutement de la prochaine promotion d'étudiants master a commencé :

<https://nano-phot.utt.fr/apply-to-nanophot>

Séjour à l'UTT d'Alexander Gorovov de l'Université d'Ohio Nov. 2025-Janvier 2026 dans le cadre du programme fullbright

AGENDA

■ **Portes ouvertes UTT**
7 mars 2026

■ **3^{ème} école du GDR Or-Nano**
Cargèse, 13-17 avril 2026

■ **International Conference on Energy, Materials, and Photonics – EMP26**
Université Paris-Saclay, 20-22 avril 2026

■ **Forum des microscopies à sonde locale**
8-12 juin - <http://www.sondeslocales.fr/forum2026>

■ **Conférence META 26**
Dublin, 14-17 juillet

CONTACT

<https://nano-phot.utt.fr/>
nanophot@utt.fr

Succès du « research day » de NANO-PHOT



Le 23 Janvier 2026, à l'Université de Reims Champagne-Ardenne a eu lieu la « NANO-PHOT Research Day » 2026, une journée dédiée à la valorisation des projets de recherche des étudiantes et étudiants de master et des doctorantes et doctorants de la Graduate School NANO-PHOT. Dans une atmosphère résolument internationale, plus de 60 participants et de nombreuses présentations orales et poster ont mis une fois encore en valeur une formation innovante et ambitieuse fondée sur l'enseignement par la recherche, répondant aux grands enjeux scientifiques et socio-économiques de la nanophotonique. Les thèmes abordés ont été nombreux et d'actualité comme par exemple les matériaux photoniques innovants tels que le SiC, les approches avancées de nanocaractérisation et nanofabrication, les biocapteurs plasmoniques pour la santé, l'information quantique et la photothermie.

Une belle journée de science, de partage et de synergies au service des chercheurs et des talents de demain.

RETOUR SUR LE « RENDEZ-VOUS AVEC LA PHOTONIQUE » ÉDITION 2025



Dans le cadre de l'Institut photonique du grand-est (<https://institut-photonique.fr/>) dont l'UTT et NANO-PHOT sont membres, une délégation de 28 étudiants et chercheurs de NANO-PHOT a participé à cet événement qui a affiché complet et a donné lieu à une journée captivante à l'Institut Jean Lamour (IJL) de Nancy, en co-organisation avec MAT-PULSE Unys Sciences. Tables rondes, réseautage, posters d'étudiants et convivialité étaient au rdv pour parler des développements et enjeux de la photonique. Les thèmes abordés d'actualité ont couvert de nombreux domaines et

enjeux incluant le recyclage des LED, les matériaux lasers et photoréfractifs, l'optoélectronique moderne à base de QDs et l'utilisation de l'IA en photonique.

Une session dédiée à la formation en optique et la forte présence des étudiants qui représentaient près de la moitié de l'audience, ont démontré une fois de plus le dynamisme et les belles perspectives de la filière.

Principaux organismes laboratoires représentés : LMOPS - Laboratoire Matériaux Optiques, Photonique et Systèmes Université de Lorraine INSA Strasbourg Université de Strasbourg ICube Strasbourg CEA - LCPA2MC - CRM2 - L2n/NANO-PHOT Université de Technologie de Troyes IS2M - Institut de Science des Matériaux de Mulhouse Université de Haute-Alsace - UHA CentraleSupélec CRISTAL LASER CAEN SpA Jeulin.



Make it EPIC!

In Photonics We Unite,
In Europe We Thrive

Journée PHAROS « Armes à Énergie Dirigée »



Cette journée organisée par ALPHA-RLH, Aerospace Valley et le CEA Gramat s'est déroulée le 29 janvier 2026 au Grand Couvent à Gramat, en présence de 120 participants. Elle a rassemblé les industriels et les laboratoires des communautés lasers et micro-ondes, dans le but d'échanger sur l'état de l'art ainsi que sur les solutions opérationnelles, les limitations actuelles ou encore les améliorations possibles des Armes à Énergie Dirigée (AED).

Au programme de la matinée : des conférences avec l'Agence de l'innovation de défense, la Direction Générale de l'Armement, le Commandement de l'Espace, le CEA Gramat, ITOPP, Inoveos, CILAS et MBDA, suivies d'une session de pitches.

L'après-midi, les participants ont pu visiter les installations du CEA Gramat (chambres anéchoïques Hypérior et Mélusine, site du gouffre de Bèdes), qui permettent de réaliser des études de vulnérabilité de systèmes et d'infrastructures soumis à des agressions électromagnétiques.

Plusieurs exposants ont eu l'opportunité de présenter leurs technologies et travaux en matière de systèmes photoniques et électroniques, et d'énergie dirigée électromagnétique et laser.

AGENDA

■ Laser World of Photonics China
18 au 20 mars 2026 à Shanghai

■ PLI Conférences
1^{er} et 2 juillet 2026 à Limoges

Tous les événements sur
www.alpha-rlh.com

La photonique française à Photonics West 2026

La photonique française, notamment la photonique néo-aquitaine, était présente à San Francisco du 20 au 22 janvier 2026 au salon Photonics West, le rendez-vous mondial de l'industrie optique-photonique.

Avec le soutien de la région Nouvelle-Aquitaine, ALPHA-RLH favorise l'internationalisation des PME afin de promouvoir les innovations régionales. Le pôle était présent aux côtés de ses adhérents, nombreux à participer à cette édition 2026.

ALPhANOV, AUREA Technology, BLOOM Lasers, GLOphotronics, Lytid, Photonics Bretagne, STIL - Groupe Marposs - ainsi que le Naquidid Center (dédié aux technologies quantiques) ont exposé sur le Pavillon France, organisé par Business France. D'autres membres étaient sur leur propre stand : AeroDIODE, Amplitude Laser, Bertin Alpao, Cailabs, Edmund Optics, Exail, Exosens, Femto Easy, Imagine Optic, Le Verre Fluoré, OptoSigma, Oxxius, Thales et TOPTICA Photonics.

Tous ont pu présenter leur expertise et leurs technologies dans les domaines de la photonique, des lasers, de la fibre optique, des capteurs... et cette présence collective a permis de mettre en valeur le dynamisme de l'écosystème français.



LES MATÉRIAUX POUR LA PHOTONIQUE DE DEMAIN

ALPHA-RLH et le Pôle Européen de la Céramique, avec le soutien de Saint-Gobain Aerospace, ont organisé le 14 janvier 2026 à Limoges une journée consacrée aux dernières avancées technologiques dans la conception des matériaux de pointe pour la photonique.

75 participants ont suivi les conférences, rythmées par deux thématiques : Matériaux pour composants free-space (céramiques, monocristaux, verres) et Fonctionnalisation de surface - optique guidée (fibres optiques, guides d'ondes, PIC) - métrologie.

Nous avons eu le plaisir d'accueillir le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) pour un keynote sur « Les matériaux pour l'optique spatiale », ainsi que des intervenants industriels et scientifiques. L'évènement s'est clôturé par la visite du CITRA (Centre d'Ingénierie en Traitements et Revêtements de surface Avancés) et de la société Leukos (groupe EXAIL), spécialisée dans les sources laser supercontinuum.



TÉMOIGNAGE D'ENTREPRENEUR

Guillaume Adam, CEO d'ATLENSYS

Groupe européen de photonique né de l'expertise d'Optoprim et structuré autour de l'ingénierie laser, des laboratoires d'applications et de la production de solutions industrielles.

<https://doi.org/10.1051/photon/202613613>

POUVEZ-VOUS NOUS PRÉSENTER EN QUELQUES MOTS VOTRE PARCOURS ?

Mon parcours a commencé de façon assez classique : un bac scientifique, puis un DUT Mesures physiques, donc une formation très ancrée dans l'expérimental, avec beaucoup de physique appliquée. À l'issue de ce DUT, j'ai complété ma formation par une licence professionnelle orientée vers la vente technique. C'est ce qui m'a conduit chez Michelin, où j'ai débuté comme commercial. Michelin est une vraie école de vente : on y apprend la rigueur, la gestion d'un secteur, le suivi des clients, le travail en équipe. En revanche, je ne me projetais pas particulièrement dans le monde du pneumatique et de l'automobile. J'avais envie de revenir vers un environnement plus proche de ma formation scientifique, même si je souhaitais conserver cette dimension business.

COMMENT AVEZ-VOUS DÉCOUVERT L'UNIVERS DE L'OPTIQUE ET DE LA PHOTONIQUE ?

En cherchant un nouveau poste, je suis tombé sur une petite société de distribution spécialisée dans l'optique et les lasers : Optoprim. J'ai rencontré ses deux dirigeants de l'époque, Jean-Pierre Sevestre, le fondateur, et son associé Patrice Benoît. Nous étions en 2001, et la société comptait cinq ou six personnes tout au plus. Ils recherchaient un profil ayant une double culture technique et commerciale. Mon background en physique, combiné à l'expérience de vente acquise chez Michelin, correspondait bien à ce qu'ils attendaient. J'ai passé plusieurs entretiens, et j'ai rejoint Optoprim en 2001 comme commercial, avec au départ un périmètre plutôt orienté mécanique, puis de plus en plus optique. À l'époque,

on ne parlait pas encore spontanément de « photonique ». Le vocabulaire courant, c'était l'optique, l'optoélectronique, les lasers. La notion de photonique au sens large s'est imposée progressivement, à mesure que les applications se diversifiaient. Parmi les fournisseurs historiques de la société, il y avait déjà Thorlabs. Leur catalogue tenait alors dans un mince fascicule.

COMMENT SE SONT DÉROULÉES LES PREMIÈRES ANNÉES ?

Très vite, je me suis spécialisé sur les composants optiques, en particulier les optiques spéciales et les filtres. Au début, je travaillais surtout avec des clients académiques : laboratoires, instituts, écoles d'ingénieurs. Puis, progressivement, je me suis tourné vers les industriels. Avec eux, la discussion ne porte pas uniquement sur un composant « sur étagère ». L'enjeu, c'est de comprendre leur système global, leurs contraintes mécaniques, leurs limites de coût, leurs exigences de performance, et de concevoir des optiques sur mesure adaptées à cet environnement. L'idée est d'optimiser en permanence le compromis coût / performance et d'obtenir le niveau de qualité qui a du sens pour le produit final. En parallèle, j'ai commencé à développer la partie électronique, puis la mécanique et la sécurité laser. J'ai recruté un collaborateur, puis d'autres. Tous ceux que j'ai fait entrer à cette époque sont encore dans le groupe, parfois après des allers-retours, ce qui en dit long sur l'attachement à l'entreprise.

POUVEZ-VOUS NOUS DÉCRIRE L'HISTOIRE DE L'ENTREPRISE ?

Optoprim est née en 1994. À l'époque, Jean-Pierre Sevestre décide de créer une société de distribution spécialisée en

optique et lasers. Parallèlement, un de leurs collègues reprenait la représentation de General Scanning en France, une société américaine qui vendait à la fois des systèmes industriels complets et des composants. Pour éviter des situations de concurrence délicates entre clients de machines et clients de composants, l'idée a été de séparer les activités. Jean-Pierre a alors l'opportunité de créer sa propre structure pour reprendre la partie distribution de composants. C'est la naissance d'Optoprim. Au départ, il travaille seul, avec deux familles de produits : des scanners (galvanomètres) et des optiques CO₂ en ZnSe. Deux ou trois ans plus tard, Patrice Benoît le rejoint pour développer la clientèle académique, alors que Jean-Pierre reste très concentré sur l'industrie. Cette double culture, scientifique et industrielle, fait partie de l'ADN de la société. Avant même mon arrivée, Optoprim avait déjà commencé à s'internationaliser : un premier bureau avait été ouvert en Italie à la fin des années 1990, avec un salarié pour couvrir ce marché.

EN QUELLE ANNÉE LA SOCIÉTÉ A-T-ELLE COMMENCÉ À DÉVELOPPER SES PROPRES PRODUITS ?

Le vrai tournant, c'est 2003, avec la création d'Industrial Laser Systems. À ce moment-là, la maison mère américaine GSI Lumonics décide de fermer sa filiale française, qui avait installé un parc important de machines laser en France. Manuel Mendes, qui travaillait pour cette entité, échange alors avec Jean-Pierre Sevestre. Ils identifient un besoin évident de continuité : assurer le service sur les machines existantes, mais aussi répondre aux nouvelles demandes des industriels. ●●●

De cette réflexion naît Industrial Laser Systems, qui reprend le service sur le parc installé et, très vite, se met à concevoir de nouvelles machines. C'est la première vraie bascule d'Optoprim, qui passe d'un rôle de distributeur de composants à celui de fournisseur de solutions complètes, combinant distribution, production et service. Aujourd'hui, Industrial Laser Systems, basée en Seine-et-Marne, regroupe une trentaine de personnes et constitue l'outil de production du groupe pour l'usinage laser. Depuis, nous avons continué à nous développer à l'international. Ce fil conducteur est resté le même : partir d'une expertise composants, puis construire progressivement un groupe capable d'accompagner les industriels jusqu'au procédé et à la solution complète.

QUELLES FURENT VOS MOTIVATIONS POUR OUVRIR UN LABORATOIRE D'APPLICATIONS LASER EN ITALIE ?

Ce laboratoire d'applications est né d'une observation très simple du marché italien : un tissu industriel extrêmement riche en fabricants de machines-outils, mais avec peu de compétences internes sur le laser. Avec l'arrivée des lasers à fibre, beaucoup d'industriels se disent : « C'est pratique, c'est compact, je branche et ça marche, je vais l'intégrer dans ma machine ». Mais ils ne savent pas forcément comment l'exploiter au mieux, quels paramètres choisir, comment adapter l'optique, la mécanique, la robotique... De l'autre côté, les fabricants de lasers communiquent sur la puissance, la longueur d'onde, les fréquences, mais très peu sur les procédés concrets. Il manquait un maillon : des gens capables de parler le langage de l'industriel et de traduire en procédé laser opérationnel. Nos collègues italiens, et en particulier Giuseppe D'Amelio, ont porté ce projet. Au départ, c'était presque un labo « dans un garage », puis cela s'est professionnalisé. Aujourd'hui, c'est une structure reconnue, avec une quinzaine d'ingénieurs, sept cellules d'essais, des lasers du femtoseconde au CO₂, des diodes haute puissance jusqu'à 22 kW. Un industriel vient nous voir en disant par exemple : « Je veux percer du verre », ou « Je veux renforcer une pièce agricole », ou « Je dois souder ce composant pour

un propulseur ». Nous étudions le besoin, nous réalisons des essais sur ses échantillons, nous optimisons les paramètres de process, nous validons les résultats avec lui, puis nous lui vendons une solution fonctionnelle : la source, l'optique, la tête, et, si nécessaire, la machine complète avec Industrial Laser Systems.

AVEZ-VOUS OUVERT D'AUTRES STRUCTURES À L'INTERNATIONAL ?

Nous avons ouvert une structure en Allemagne, sur un marché de la distribution plus difficile, car la plupart des grands fabricants de composants ou de lasers choisissent d'y implanter directement leur propre filiale.

COMMENT AVEZ-VOUS CRÉÉ GATACA SYSTEMS ?

GATACA Systems est une entreprise spécialisée dans l'instrumentation autour du microscope et la super-résolution, et nous l'avons créé là encore à la suite de la fermeture d'une entité américaine en France. Pour le groupe, c'est une brique essentielle : d'un côté, le labo d'applications italien très tourné vers l'industrie et les procédés laser ; de l'autre, GATACA Systems très orientée sciences du vivant et photonique pour la biologie. Les deux s'appuient sur la même culture optique et laser, mais dans des contextes applicatifs très différents.

POURQUOI ET COMMENT ÊTES-VOUS DEVENU ACTIONNAIRE DE L'ENTREPRISE ?

En 2009, Patrice Benoît prépare son départ à la retraite. Il est actionnaire de la société, et cela ouvre la question de la reconstitution du capital. Avec deux collègues de longue date, François Beck et Arnaud Langlois, nous sommes tous les trois très impliqués dans le développement de l'entreprise. Jean-Pierre nous propose alors de reprendre les parts de Patrice. Nous sommes motivés, nous y voyons un moyen de sécuriser l'avenir, de nous projeter à long terme et de nous engager davantage. Concrètement, nous montons une opération financée par un emprunt bancaire, adossé aux dividendes futurs : c'est notre première expérience d'entrée au capital, à une échelle encore modeste. Sur le plan du quotidien, cela ne change pas immédiatement l'organisation : Jean-Pierre reste président, la structure reste très

« horizontale », comme c'est souvent le cas dans les PME. Mais cela nous donne une responsabilité plus forte dans les décisions et, avec le recul, c'est une étape qui prépare clairement la suite, notamment l'opération de 2022.

COMMENT CETTE OPÉRATION S'EST-ELLE RÉALISÉE ?

En 2022, plusieurs actionnaires historiques souhaitent tourner la page : Jean-Pierre Sevestre pour la partie Optoprim, et certains fondateurs de GATACA Systems et d'Industrial Laser Systems (ILS). L'alternative est alors assez claire : soit vendre à un grand groupe extérieur, soit organiser une reprise par l'équipe en place. J'en discute avec Jean-Pierre, et je lui dis que, pour ma part, je suis prêt à porter un projet de reprise si nous pouvons le faire avec les bonnes personnes. Nous identifions alors un noyau de sept associés : mes collègues historiques en France, des responsables italiens, le directeur technique et co-fondateur de GATACA Systems ... Ensemble, nous montons une opération de type LBO, avec l'appui de deux fonds d'investissement : NCI comme actionnaire de référence et Re-Sources Capital en co-investissement. Le processus de préparation dure une bonne partie de 2021 et 2022, et nous signons le 6 décembre 2022. À ce moment-là, le groupe réalise un peu plus de 50 M€ de chiffre d'affaires avec environ 70 personnes, et une part de production de l'ordre de 15 %. Depuis, la croissance a été très soutenue : nous sommes passés à plus de 80 M€, avec une projection vers 85 M€ et environ 120 salariés, et la part de production approche désormais 30 %, sans que la distribution ait reculé. Cette opération avait un objectif simple : garder le contrôle de l'outil en Europe, continuer à le développer, et accompagner la transformation d'un groupe historiquement de distribution vers un acteur mixte, très orienté solutions et procédés.

COMMENT LE GROUPE EST-IL ORGANISÉ AUJOURD'HUI ?

Juridiquement, nous avons une holding, Optoprim Group, qui joue le rôle de centre de services : finance, RH, informatique, marketing groupe, etc. Sous cette holding, on trouve Optoprim France, Optoprim Italia, Optoprim Deutschland, GATACA

Systems et Industrial Laser Systems (ILS). Historiquement, Optoprim France combinait activité opérationnelle et détention de participations. La structuration en holding clarifie notre organisation et soutient notre développement externe.

Avec ATLENSYS, nous affirmons une réalité industrielle : un groupe européen multi-expertises, capable d'intervenir du composant au système, avec des laboratoires d'applications et des capacités de production.

Cette structuration renforce la cohérence du groupe et marque une évolution claire : d'un acteur principalement distributif vers un groupe industriel intégré.

QUELS SONT AUJOURD'HUI VOS PRINCIPAUX MARCHÉS ET TYPES D'APPLICATIONS, CÔTÉ INDUSTRIEL ET CÔTÉ SCIENTIFIQUE ?

Notre force, c'est la diversification. Côté industriel, nous sommes présents dans l'aéronautique, la défense, l'automobile, l'énergie, l'agro-équipement, la micro-électronique... Nous réalisons par exemple des machines de découpe de verre pour de grands acteurs industriels, des systèmes de soudage laser pour des propulseurs, des installations pour des grands groupes de défense ou encore des solutions de rechargement laser pour des pièces agricoles afin d'augmenter leur durée de vie.

Dans ces secteurs, nos interlocuteurs sont des mécaniciens, des responsables process, des directeurs industriels. Ils n'ont pas besoin qu'on leur parle de modes transverses ou de profils de Gauss ; ils veulent savoir si leur pièce sera plus robuste, si leur temps de cycle sera compatible avec la production, et quel sera le retour sur investissement. Notre rôle est justement de faire le lien entre la physique du faisceau et ces réalités industrielles.

Côté scientifique, *via* Optoprim et Gataca, nous sommes très présents dans les laboratoires académiques et les plateformes d'imagerie, particulièrement en France et en Italie. Nous fournissons des composants, des systèmes complets, et nous co-développons des solutions avec des équipes de recherche. Gataca systems, en particulier, est reconnue dans la communauté de la microscopie avancée et des sciences du vivant.

SUR QUELS AXES D'INNOVATION TRAVAILLEZ-VOUS AUJOURD'HUI ?

Notre valeur ajoutée se situe dans tout ce qui entoure le faisceau laser : optique de mise en forme, mécaniques de déplacement, robotique, contrôle, capteurs, etc. Le procédé laser, c'est l'art de combiner tous ces éléments pour obtenir le bon résultat sur la matière. Concrètement, nous déposons régulièrement des brevets sur ces thématiques. L'un des récents développements concerne une tête optique conçue pour réaliser une opération de brasage jusque-là réalisée à la main. Le défi n'est pas seulement optique : il faut tenir compte des axes du robot, de la répétabilité, des tolérances mécaniques, des conditions thermiques. Il y a aussi toute une « intelligence de conception » qui consiste à spécifier au plus juste. Quand j'étais purement du côté composants, je voyais souvent des plans d'optique avec des tolérances extrêmement serrées... qui faisaient exploser les coûts sans être justifiées par l'application. C'est exactement la même chose en mécanique : demander un déplacement au nanomètre avec un robot multi-axes n'a pas de sens. Notre rôle est d'expliquer ces limites et de proposer des solutions réalistes, robustes et économiquement viables.

COMMENT PERCEVEZ-VOUS L'ÉVOLUTION DU MARCHÉ DE LA PHOTONIQUE ?

Le marché reste globalement très porteur. En vingt-cinq ans, j'ai vu passer plusieurs vagues : le boom des télécoms, son crash, l'essor de la biophotonique, maintenant l'émergence du quantique. Personne ne peut dire aujourd'hui si le quantique sera le « nouveau télécom » ou si, comme pour la fibre, une part importante de la chaîne de valeur partira en Asie. Ce qui est certain, en revanche, c'est qu'on découvre de nouvelles applications du laser et de la photonique presque chaque semaine. Prenez par exemple le soudage laser manuel : il y a encore deux ou trois ans, cela n'existait quasiment pas ; aujourd'hui, c'est en pleine explosion, avec tous les enjeux de formation et de sécurité que cela implique. On assiste aussi à une forte concentration, avec de très gros acteurs américains ou asiatiques qui rachètent des sociétés européennes.

Sans tomber dans le protectionnisme, je pense qu'il est important que certaines technologies restent en Europe, voire en France. À notre échelle, nous essayons de jouer un rôle de consolideur européen, capable d'accompagner ou de reprendre des entreprises technologiques pour éviter qu'elles ne partent trop vite chez des groupes extra-européens.

PARVENEZ-VOUS À RECRUTER LES PROFILS DONT VOUS AVEZ BESOIN ? L'OFFRE DE FORMATION VOUS SEMBLE-T-ELLE ADAPTÉE ?

C'est probablement l'un de nos défis majeurs. Le profil dont nous avons le plus besoin, c'est l'ingénieur mécanique ou mécatronique ayant une compréhension suffisante de l'optique et du laser. Ce type de profil est rare. Les grandes écoles forment d'excellents ingénieurs, mais l'optique y est souvent peu présente ou abordée de manière assez générale.

Ces profils s'orientent généralement vers de grands groupes industriels. Notre structuration en groupe industriel européen, intégrant ingénierie de procédés laser, laboratoires d'applications et production de machines, nous permet aujourd'hui d'offrir des trajectoires techniques et managériales attractives. Plusieurs collaborateurs ont ainsi évolué vers des postes de direction technique ou générale, démontrant qu'il existe une réelle opportunité d'impact et de progression au sein du groupe. Nous travaillons activement à renforcer notre image employeur afin d'attirer ces talents clés.

COMMENT VOUS ÊTES-VOUS ADAPTÉ À LA CROISSANCE DES ÉQUIPES ?

Les deux dernières années, nous avons connu des croissances de 20 à 30 % par an. Nous avons doublé le chiffre d'affaires d'Industrial Laser Systems en deux ans, ce qui implique forcément d'augmenter les équipes, de structurer, de faire grandir tout le monde. Le plus difficile, pour moi, dans la transition de commercial à CEO d'un groupe d'environ 120 personnes, c'est d'arriver à prendre du recul : mesurer le chemin parcouru, ne pas être uniquement tourné vers ce qu'il reste à faire, et surtout ne pas oublier de mettre en lumière le travail des équipes. ●



Entretien avec Antoine Godard

Directeur scientifique du domaine physique de l'ONERA, Directeur de recherche spécialiste d'optique non linéaire, Président de la SFO.

<https://doi.org/10.1051/photon/202613616>

POUVEZ-VOUS REVENIR SUR VOTRE PARCOURS ET SUR CE QUI VOUS A ORIENTÉ VERS LES SCIENCES ?

J'ai grandi en Normandie, à Caen, dans un environnement où la science occupait une place importante. Très tôt, j'ai été attiré par les mathématiques, la physique, mais aussi la biologie : j'aurais pu me passionner pour chacun de ces domaines. J'ai ainsi suivi une terminale scientifique et une classe préparatoire au lycée Malherbe, à Caen.

QU'EST-CE QUI VOUS A CONDUIT À CHOISIR SUPOPTIQUE ?

Je voulais intégrer une école orientée "physique" et clairement spécialisée ; les écoles généralistes m'attiraient moins. Après les concours, j'ai choisi SupOptique parce que cette école permettait d'approfondir une discipline, avec une ouverture vers la recherche ou, à défaut, vers une ingénierie de pointe. J'étais également admis dans des écoles généralistes, mais j'ai fait le choix assumé d'une école spécialisée. Et je ne l'ai jamais regretté : dès mon arrivée, j'ai tout de suite adoré l'optique.

Comment s'est déroulée votre formation ? La promotion dans laquelle je suis entré était la première à proposer la formation par l'apprentissage. J'ai choisi cette voie parce qu'elle correspondait à mon envie d'être au contact d'un environnement de recherche et de développement. J'ai passé plusieurs entretiens à l'issue desquels j'ai choisi d'effectuer mon apprentissage à l'ONERA. J'y ai travaillé sur les oscillateurs paramétriques optiques (OPO) et l'optique non linéaire. Cette expérience m'a passionné et m'a permis de cosigner une première publication scientifique. Le projet a duré bien plus longtemps qu'un stage de master : c'était une immersion

longue, avec un vrai temps de maturation. À l'issue de cette expérience, j'aurais pu rester pour une thèse à l'ONERA, mais mes encadrants m'ont conseillé de diversifier mon parcours en faisant ma thèse ailleurs, quitte à revenir ensuite. C'est ce que j'ai fait. Entre-temps, il y avait encore le service national : je l'ai effectué à Saclay, sur la séparation isotopique de l'uranium par laser, un autre sujet très stimulant d'interaction laser-matière.

OÙ AVEZ-VOUS EFFECTUÉ VOTRE THÈSE ET QUEL ÉTAIT LE SUJET ?

J'ai réalisé une thèse CIFRE à l'Institut d'Optique, avec la société Photonetics, bien connue dans l'écosystème de la SFO. À l'époque, cette société commercialisait les lasers Tunicas qui étaient assez uniques : il s'agissait de diodes laser à cavité étendue contenant un réseau de diffraction, et permettant d'obtenir une accordabilité continue sur un large spectre. Ils servaient notamment à tester les composants et les réseaux de télécommunication : c'était un produit phare, très connu dans le domaine. Sur le plan académique, j'étais au laboratoire Charles Fabry, dans une équipe spécialisée dans les matériaux photoréfractifs. Mon directeur de thèse était Gilles Pauliat, au sein d'un groupe dirigé à l'époque par Gérard Roosen. L'idée des filtres adaptatifs dans les cavités laser a vraiment dynamisé l'équipe : plusieurs thèses ont été lancées autour de ce thème, qui était alors un sujet « chaud ».

QUEL ÉTAIT LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE CE LASER ACCORDABLE ?

L'idée est d'introduire dans la cavité laser un cristal photoréfractif : l'onde

stationnaire inscrit un réseau d'indice, un réseau de Bragg en volume, qui "auto-affine" le laser par interférences à l'intérieur de la cavité. On obtient ainsi un filtre auto-adaptatif qui favorise le fonctionnement monomode.

Dans un laser simple, entre deux miroirs, l'ajout de ce filtre permet effectivement d'obtenir un laser monomode, mais sans choisir précisément la fréquence : le système se stabilise sur un mode qui "veut bien" fonctionner. Dans ma thèse, l'enjeu était d'augmenter le régime d'accordabilité de lasers qui possédaient déjà un réseau de diffraction en configuration Littmann : on ajoutait le cristal photoréfractif pour auto-stabiliser l'émission tout en conservant l'accordabilité.

QUELS ONT ÉTÉ LES PRINCIPAUX RÉSULTATS OBTENUS ?

Pour moi, la contribution scientifique la plus forte porte sur le couplage entre modes dans un semi-conducteur. C'est un problème particulièrement riche, car on met en jeu des électrons, des trous, des porteurs de charge : le milieu est dynamique. Lorsqu'on couple des modes, on induit des oscillations dans les populations d'électrons et de trous ; ces modulations, à leur tour, recourent les modes *via* un mélange à quatre ondes, stimulé par un milieu à gain actif. Il y a donc une résonance avec le milieu lui-même. Ce n'est pas comparable à un mélange à quatre ondes dans une fibre ou un cristal non linéaire hors résonance, où le matériau n'a pas cette dynamique interne : ici, les porteurs se chauffent, se refroidissent, s'écartent de la distribution de Fermi, etc. C'est une physique très riche et passionnante.

AVIEZ-VOUS DÈS LE DÉPART L'IDÉE DE VOUS ORIENTER VERS LA RECHERCHE ?

Quand j'ai commencé l'apprentissage, je ne visais pas forcément une thèse : je voulais devenir ingénieur et faire de la R&D. Mais en entrant dans ce milieu, en côtoyant des doctorants, je me suis dit assez vite que je souhaitais faire une thèse. Comme l'apprentissage s'était très bien passé, j'avais conservé des contacts à l'ONERA, et il a été décidé avant ma soutenance que je retournerais ensuite à l'ONERA, dans l'équipe où j'avais fait mon apprentissage.

COMMENT SE SONT DÉROULÉES VOS PREMIÈRES ANNÉES À L'ONERA ?

J'ai d'abord effectué un post-doc de onze mois, le temps qu'un poste pérenne se libère. J'ai ensuite intégré l'ONERA en 2004 comme ingénieur-chercheur. L'ONERA a une spécificité : il n'y a pas deux corps distincts, "chercheurs" d'un côté et "ingénieurs d'appui" de l'autre. Ce sont les mêmes personnes, avec des sensibilités différentes, mais on fait à la fois de l'ingénierie et de la recherche. Pendant plusieurs années, j'ai mené les deux : publications, développement d'OPO, nouvelles architectures de cavités, modèles... L'objectif était de construire des dispositifs pour des applications avec notamment la détection de gaz à distance, donc des sources infrarouges accordables très spécifiques, tout en maintenant une compréhension fine des mécanismes physiques en optique non linéaire. Cela s'est traduit par des travaux de modélisation en parallèle de travaux plus applicatifs.

DANS QUEL DÉPARTEMENT ÉTIEZ-VOUS RATTACHÉ À L'ONERA ?

À mon arrivée, j'ai été accueilli et encadré par Michel Lefebvre, spécialiste des OPO, qui a ensuite terminé sa carrière à la Direction scientifique générale de l'ONERA. Peu avant mon retour, Emmanuel Rosencher (venu de Thales) avait rejoint l'ONERA et pris la responsabilité de l'équipe : il a fortement dynamisé l'activité avec le développement de plusieurs axes de recherche. Mon retour a permis de renforcer cette dynamique qui reposait principalement sur des doctorants mais

avec très peu de personnels permanents sur le thème des OPO et de leurs applications ; Puis l'équipe a grandi avec l'arrivée de plusieurs autres permanents au fil des années.

Michel Lefebvre a ensuite pris des responsabilités et est devenu directeur de département. L'ONERA est organisé en sept départements ; le DOTA (Département d'Optique Théorique et Appliquée) est bien connu des opticiens. Pour ma part, je n'étais pas au DOTA : j'étais dans un département devenu aujourd'hui DPHY, anciennement "Département de Mesures Physiques", et désormais "Physique, Instrumentation, Environnement, Espace". Historiquement, l'équipe OPO y était rattachée, notamment en raison de ses activités en diagnostics optiques non linéaires appliqués aux jets réactifs (installations de combustion pour l'aéronautique et le spatial) et non réactifs (souffleries). C'est dans ce cadre que j'ai construit l'essentiel de ma carrière scientifique.

QUELS MATÉRIAUX NON LINÉAIRES AVEZ-VOUS ÉTUDIÉS AU FIL DE VOS TRAVAUX ?

Un axe de recherche important a porté sur les semi-conducteurs III-V, qui sont transparents jusque dans l'infrarouge lointain et fortement non linéaires mais optiquement isotropes et donc plus complexes pour réaliser l'accord de phase. Nous avons notamment exploré des approches comme des interactions "en zigzag" dans le matériau, afin de réaliser un quasi-accord de phase dit de Fresnel *via* l'exploitation des déphasages associés à la réflexion totale interne. Mais, à l'échelle de la communauté, la technique qui s'est imposée est le retournement périodique de domaines, par exemple dans le niobate de lithium : on applique un champ haute tension périodique pour inverser les domaines ferroélectriques, et chaque inversion induit un déphasage de π qui compense le désaccord de phase et maintient l'interaction constructive. Dans les semi-conducteurs, ce retournement de domaines n'est pas réalisable par l'application d'un champ électrique ; en revanche, des collègues ont réussi à faire croître par épitaxie des matériaux

périodiquement orientés (par exemple du GaAs orienté périodiquement, ou des structures "orientation-patterned"). Nous avons ensuite collaboré très activement avec Thales et Teem Photonics sur plusieurs projets OPO émettant dans l'infrarouge moyen utilisant leurs matériaux : c'est un succès et, à mes yeux, une véritable excellence française.

QUELS ONT ÉTÉ LES PRINCIPAUX DOMAINES APPLICATIFS ?

Les sources OPO étant devenues très performantes, nous les avons intégrées dans des instruments LIDAR. Aujourd'hui, on sait faire des systèmes embarqués, notamment sur avion, pour des mesures aéroportées : c'est typiquement le cœur du métier de l'ONERA.

Nous avons aussi eu une parenthèse plus fondamentale sur les statistiques de photons. En exploitant l'absorption à deux photons dans un semi-conducteur, nous avons pu mesurer les fluctuations statistiques que l'on appelle le "photon bunching". Une source incohérente (par exemple un corps noir) n'émet pas de manière constante : elle émet de façon chaotique, par bouffées. Le phénomène était connu théoriquement depuis longtemps, mais il n'avait jamais été mesuré sur un vrai corps noir car l'échelle de temps pertinente est de l'ordre de quelques femtosecondes. Grâce à un montage interférométrique, nous avons pu le mettre en évidence expérimentalement pour la première fois. Cela illustre bien l'approche ONERA : une recherche finalisée, mais qui laisse aussi la place à l'étude fine des phénomènes, à leur compréhension, et à leur exploitation.

COMMENT VOUS ÉTES-VOUS PROGRESSIVEMENT IMPLIQUÉ DANS DES FONCTIONS D'ANIMATION SCIENTIFIQUE ?

Au fil des années, j'ai été amené à prendre davantage de responsabilités d'animation pour structurer l'activité scientifique, coordonner, impulser. En 2016-2017, j'ai ainsi pris la fonction d'adjoint scientifique au sein du département DPHY. Dans chaque département, le directeur porte une responsabilité hiérarchique et de management lourde (personnel, plan de charge, ●●●

contrats, etc.) et s'appuie sur un conseiller scientifique : l'adjoint scientifique.

DPHY regroupe des thématiques très diverses : au-delà de l'optique non linéaire, il y a des activités MEMS pour la mesure inertielle, des capteurs et accéléromètres spatiaux par mesure électrostatique, des équipes sur les atomes froids, les plasmas... et, à Toulouse, des équipes qui modélisent l'environnement spatial et ses effets sur les matériaux et l'électronique. J'ai donc dû animer scientifiquement l'ensemble, en m'appuyant bien sûr sur des relais, chaque thématique ayant ses responsables. Dans les faits, cela représentait environ 50% de recherche et 50% d'animation : évaluations, discussions stratégiques, propositions de thèses, projets internes... bref, l'animation scientifique d'un département. Et cette fonction m'a aussi conduit à m'impliquer dans des instances et à représenter l'ONERA dans le champ de la physique. Après 4 à 5 ans, en 2022, j'ai eu l'opportunité de devenir directeur scientifique du domaine physique. Le poste s'est libéré lorsque Riad Haïdar, qui l'occupait auparavant, est devenu directeur scientifique général. J'ai candidaté, et j'ai été retenu.

QUEL EST LE RÔLE DE LA DIRECTION SCIENTIFIQUE ?

La direction scientifique n'est pas une structure hiérarchique. Le management relève de la direction technique générale, à laquelle sont rattachés les directeurs de départements. La direction scientifique a un rôle d'orientation de la politique scientifique à long terme de l'ONERA et d'arbitrage de la recherche interne. Nous disposons de fonds propres, ainsi que de moyens issus de projets collaboratifs. Nous définissons le plan stratégique scientifique, c'est-à-dire les grandes orientations de recherche que l'ONERA se fixe à moyen-long terme, et nous pilotons les partenariats de recherche structurants. Et au quotidien, nous arbitrons les projets internes : ce qui est financé, ce qui ne l'est pas, les sollicitations reçues, mais aussi celles que nous stimulons. C'est également vrai pour les thèses : nous intervenons sur les choix et les orientations. Enfin, la direction scientifique coordonne la filière recherche, qui reconnaît l'implication scientifique au travers de grades (chargé de recherche, directeur de recherche).

VOUS AVEZ ÉTÉ FORTEMENT IMPLIQUÉ DANS L'UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY

J'ai en effet participé à diverses instances. J'animais le pôle optique du département PhOM (Physique des Ondes et de la Matière) et j'ai été l'un des cinq préfigureurs de l'Institut des Sciences de la Lumière. Avec Jean-Jacques Greffet, Laurent Vivien, François Treussart et Jean-Pierre Hermier, nous avons posé les bases de cette structure transversale destinée à fédérer la photonique sur le campus.

QUELLES ACTIONS MAJEURES ONT ÉTÉ MISES EN PLACE PAR CET INSTITUT ?

L'une des plus importantes est le programme cofund Light in Paris, obtenu après un travail considérable piloté par Jean-Jacques Greffet puis repris par Patrick Georges. Il soutient aujourd'hui des projets interdisciplinaires autour des sciences de la lumière.

VOUS AVEZ ÉTÉ TRÈS IMPLIQUÉ DANS LA SFO. D'OÙ VIENT CET ENGAGEMENT ?

J'ai toujours aimé le travail collectif et je suis membre de la SFO quasiment sans interruption depuis ma thèse. Mes collaborations, notamment avec Benoît Boulanger et des collègues de l'ONERA, m'ont naturellement conduit à m'investir dans la communauté et à participer au réseau CNRS CMDO+ et au club JNCO de la SFO.

COMMENT ÊTES-VOUS ARRIVÉ À LA PRÉSIDENTIE ?

En discutant avec Benoît puis avec Ariel Levenson, la possibilité de rejoindre la présidence s'est posée, l'un des trois postes revenant à un représentant d'un grand organisme de recherche. J'ai immédiatement accepté. Lorsqu'on en fait partie, on réalise à quel point la SFO est dynamique : ce n'est pas seulement un congrès ou une revue, mais une multitude d'actions au service de la communauté.

COMMENT S'EST DÉROULÉE VOTRE PREMIÈRE ANNÉE DANS CE RÔLE ?

La première année est une année de transition. J'ai été associé aux réunions du bureau et j'ai travaillé en étroite collaboration avec

Ariel et François. Il existe des points réguliers entre les trois présidents, ce qui m'a permis d'apprendre les dossiers et de comprendre le fonctionnement global. C'était une période de formation et de prise en main progressive.

QUELS ONT ÉTÉ LES GRANDS DOSSIERS QUE VOUS AVEZ SUIVIS EN TANT QUE PRÉSIDENT ENTRANT ?

Plusieurs projets d'importance étaient déjà engagés. (i) Le rachat de notre revue Photoniques. (ii) Le projet LUMIFORM 2030 dont l'objectif est d'accompagner les formations en photonique du niveau BAC à BAC+3 et de favoriser l'attractivité de ces filières. (iii) La démarche d'utilité publique (ARUP), initiée il y a plusieurs années et visant à renforcer la légitimité et le modèle économique de la SFO. (iv) Le projet PEPITES, consacré à la pérennité du patrimoine scientifique et documentaire de la société.

QUELLES SONT LES ÉVOLUTIONS SUR LES PRIX DÉCERNÉS PAR LA SFO ?

La SFO dispose d'un ensemble de prix historiques (Fabry-de Gramont, Lumières Arnulf-Françon, Léon Brillouin). Le prix Jean Jerphagnon, qui valorise le lien avec l'industrie et l'innovation, s'est ajouté récemment et il est essentiel de pérenniser son financement. C'est l'un des chantiers actuels. Par ailleurs, nous venons de créer des prix de thèse, afin de reconnaître de jeunes chercheurs et chercheuses au moment clé de leur début de carrière. Leur lancement aura lieu dès cette année.

QUELLES ACTIONS SOUHAITEZ-VOUS METTRE EN PLACE ?

Les projets engagés vont déjà produire de nombreux effets. Compte tenu de l'activité très dense et des capacités limitées de l'équipe permanente, il n'est pas souhaitable d'ouvrir encore de nouveaux chantiers lourds à court terme. En revanche, j'aimerais organiser des visites de laboratoires deux fois par an, afin de renforcer le lien entre la SFO et la communauté, afin de mieux faire connaître ses actions et d'encourager l'implication des équipes locales. ●

La télédétection lidar : des fondements aux applications industrielles

En France, la recherche sur les lidars est particulièrement dynamique et couvre une grande diversité d'applications. Ces travaux scientifiques ont conduit à des transferts industriels fructueux, notamment dans le domaine des lidars destinés à la caractérisation de l'atmosphère. D'autres domaines d'application buttent encore sur la taille et le coût de ces systèmes. Le Club Lidar de la SFO a pour vocation de promouvoir les échanges scientifiques au sein de cette communauté de chercheurs.



Photographie d'un tir lidar à l'Observatoire de Haute Provence (OHP – Crédit Hervé Dole).

<https://doi.org/10.1051/photon/202613619>

Patrick FENEYROU¹*, Alain MIFFRE², Philippe KECKHUT³, Philippe GOLOUB⁴, Stéphane VICTORI⁵, Sophie GODIN-BEEKMANN³, Nicolas CEZARD⁶, Laurent LOMBARD⁷, Fabien GIBERT⁸, Irène XUEREF-REMY⁹

¹Thales TRT, Palaiseau, France, ²ILM, Lyon, France,

³LATMOS, Paris, France, ⁴LOA, Lille, France

⁵Cimel, Paris, France, ⁶ONERA, Toulouse, France

⁷ONERA, Palaiseau, France, ⁸LMD Palaiseau, France

⁹OSU Pythéas, Aix-en-Provence, France

*patrick.feneyrou@thalesgroup.com

Un lidar (acronyme de Light Detection and Ranging) est un système de télédétection optique analogue du radar bien connu dans le domaine micro-ondes. Cette méthodologie a connu un essor remarquable à la suite de l'invention du laser (années 1960), en mettant à profit la directivité du faisceau (pour accroître la portée du lidar) et/ou ses caractéristiques spectrales (en vue d'applications spectroscopiques). Aujourd'hui, son champ d'application est particulièrement vaste, allant de l'archéologie, à la météorologie et l'étude de l'atmosphère depuis le sol comme par satellite, à la défense, à la topographie et la bathymétrie, aux transports et même aux loisirs. Cette diversité conduit à des systèmes dont la taille, la finalité ou encore les composants utilisés sont eux-mêmes diversifiés. La portée varie ainsi de quelques cm à plusieurs centaines de milliers de km pour la télémétrie Terre-Lune, avec des résolutions de quelques μm à plusieurs centaines de mètres et des mesures cadencées de la μs jusqu'à plusieurs heures. Certaines de ces caractéristiques découlent de l'intensité très faible des signaux à mesurer (jusqu'à 25 ordres de grandeur inférieurs à la puissance émise) combinée aux contraintes de sécurité oculaire qui limitent la puissance optique pouvant être émise. L'ensemble de ces paramètres doit donc être adapté lors de la conception du système, en fonction de l'application et des caractéristiques de la cible (aérosols et/ou molécules atmosphériques – cibles dures). La conception doit également tenir compte de la plateforme utilisée qui peut aller de dispositifs portables grand public à des plateformes mobiles - sur rail, sur route ou aéronautique - jusqu'au domaine spatial. A ce titre, l'environnement du lidar peut constituer une contrainte importante en raison des larges variations de température, des vibrations, du rayonnement, ainsi que de la nécessité de gérer des échos parasites inévitables (tel que l'écho de la surface de la mer en bathymétrie). Enfin, les contraintes de taille, de masse, de consommation et de coût constituent un frein au déploiement de tels systèmes pour nombre d'applications.

Cet article a pour objectif d'illustrer les principaux axes de recherche sur les lidars, de l'étude des composants élémentaires au développement de nouvelles architectures et méthodes de mesure, en passant par le traitement et la qualification des signaux acquis, jusqu'à l'exploitation des produits des ●●●

mesures lidar. Les auteurs sont membres du Club Lidar de la SFO créé en 2021. Ce club, favorise le dialogue au sein de la communauté nationale sur les lidars, notamment lors de son école biannuelle (2023, 2025). Leur diversité conduit nécessairement à un survol de ces thématiques et le tableau 1 présente les contributions des auteurs. Le tableau 2 propose des liens vers les principaux réseaux et applications lidar. Pour illustrer le niveau de maturité de cette technologie, une seconde section présente les freins au transfert industriel mais également plusieurs réussites de transfert à un niveau commercial. Le document se termine par une conclusion et propose des perspectives à l'échelle internationale.

Composants et architecture lidar

a. Des composants optiques nouveaux au service de lidars plus performants

La recherche sur les composants optiques pour les lidars se concentre notamment sur les axes suivants :

- *Les sources laser.* La recherche sur les sources laser (fibrées, cristallines, ou hybrides) est un domaine foisonnant, et les systèmes lidars bénéficient de leurs progrès selon de multiples dimensions, en particulier dans la zone dite à sécurité oculaire : augmentation de la puissance pour une portée accrue, de l'accordabilité spectrale pour la détection de gaz, de la finesse spectrale (lidars à détection cohérente), de la modularité et des capacités de modulation en amplitude comme en fréquence pour des mesures multifonctions, de la compacité pour les lidars embarqués... L'emploi de sources laser hybrides, mélangeant des étages d'amplification fibrés et d'autres en espace libre, vise à associer les atouts des sources fibrées (cavité intégrée, architecture facile à aligner et peu sensible aux vibrations) et ceux des amplificateurs cristallins (haute puissance de sortie). Une telle combinaison permet d'éviter l'écueil des cavités laser en espace libre, elles aussi très puissantes mais beaucoup plus sensibles aux perturbations extérieures.
- *Les détecteurs optiques.* L'objectif principal est ici d'accroître la sensibilité dans l'IR (> 1,7 µm) où il n'existe pas de détecteur amplifié (photomultiplicateurs, photodiodes à avalanches). Pour les lidars, ces études trouvent principalement leur application dans les systèmes à détection directe. Des convertisseurs non-linéaires de fréquence rendent aujourd'hui possible l'emploi de détecteurs bas-bruit, fonctionnant dans le visible/proche-IR, dans des bandes spectrales dans l'IR moyen. Ces aspects de détection peuvent être associés à d'autres fonctions de technologie photonique intégrée. Ces développements visent à réduire la taille des dispositifs mais également à accroître leur stabilité thermique, dans un environnement soumis à des vibrations intenses.
- *Les systèmes de balayage/ Imagerie rapide.* L'observation 3D est réalisable par « scanning imaging » ou « flash imaging », ces techniques utilisant respectivement des détecteurs monopixel ou matriciel. Pour l'imagerie par balayage, les exigences de cadence de certains systèmes embarqués sont difficilement atteignables avec des dispositifs mécaniques. La recherche de scanners non mécaniques trouve alors naturellement son application.

b. Les systèmes lidar et les nouvelles méthodes associées

Les systèmes lidars reposent sur deux types de détection : l'une basée sur l'intensité lumineuse (détection directe), l'autre fondée sur la mesure d'un battement (détection cohérente).

- Concernant la détection directe, de nouveaux algorithmes d'inversion voient le jour pour permettre une meilleure classification des aérosols minéraux (poussières), urbains, biologiques (pollens), de combustion (suies) et de leur origine. On peut citer la télédétection lidar élastique / inélastique, avec des applications sur le climat et la qualité de l'air (ACTRIS), incluant des aspects de fluorescence, et même d'incandescence et de partitionnement optique de mélanges à deux et à trois composantes (sulfates, minéral, sels marins).
- Concernant la détection cohérente, jadis appliquée exclusivement dans l'IR, des solutions fibrées dans le visible sont utilisées de nos jours. Ces architectures cohérentes permettent

CONTRIBUTEUR	THÉMATIQUES DE RECHERCHE
CIMEL	Fabricant d'instruments de télédétection dont des lidars pour la détection des aérosols et des gaz
iLM	Aérosols, polarimétrie, expériences de laboratoire à 180°, développement méthodologique
LATMOS	Stratosphère, ozone, température, aérosols, vent, surveillance atmosphérique, DIAL
LMD	Lidar atmosphère, Raman, DIAL et Doppler, sources laser et détection NIR pour lidar
LOA	Développement et exploitation des lidars : propriétés et dynamique des aérosols et des nuages
ONERA	Mesure de vent et de concentration de gaz (CO ₂ , CH ₄ , H ₂) par lidars à détection cohérente et/ou à détection directe. Mesures de distance, de vibration, de rugosité. Conception et réalisation de sources laser fibrées forte énergie pour lidar (UV, 1µm, 1.5µm, 2µm)
PYTHEAS	Lidar aérosols, Troposphère, surveillance atmosphérique, propriétés optiques, ACTRIS
THALES	Téléométrie, vélocimétrie et anémométrie, Conception de circuits photoniques intégrés (PIC), Sources laser pour lidar

Tableau 1. Contributions des auteurs à la Télédétection lidar.

Tableau 2. Sigles et liens proposés vers les principaux réseaux et applications lidar.

RÉSEAU	MOTS CLEFS ET LIEN
ACTRIS	The Aerosol, Clouds and Trace Gases Research Infrastructure - https://www.actris.fr/
Aeolus	https://earth.esa.int/eogateway/missions/aeolus
EARLINET	European Aerosol Research Lidar Network https://earlinet.eu/
EarthCare	Earth Cloud, Aerosol and Radiation Explorer https://earth.esa.int/eogateway/missions/earthcare
IGN - LiDAR HD	https://geoservices.ign.fr/lidarhd
MERLIN	Methane Remote Sensing Lidar Mission https://cnes.fr/projets/merlin
NDACC	Network for the Detection of Atmospheric Composition Change - https://ndacc.larc.nasa.gov/

des mesures de décalage Doppler (lidar vent) ou, sur cibles dures, des mesures de télémétrie et vélocimétrie simultanées à haute résolution. Ces architectures lidar sont encore à l'étude pour augmenter la portée des systèmes, notamment dans le domaine des transports. La recherche sur les lidars « smart-pulses » illustre l'hybridation entre détection cohérente et détection directe, en combinant différentes modulations temporelles et spectrales de la lumière (découpage d'impulsions, façonnages en peignes ou forme d'onde basée sur des rampes de fréquences) pour permettre différentes fonctions de mesure au sein d'un seul système lidar.

c. Les traitements et qualification du signal lidar

Une fois le système lidar développé et opérationnel, l'exploitation des mesures lidar, qu'elles soient atmosphériques ou sur cible dure, suit généralement les étapes suivantes :

- *L'inversion lidar*, permettant de résoudre le problème inverse (par exemple la distance à partir du signal lidar). Cette étape aboutit à la définition de nuages de points dont la complétude et la précision sont contrôlés. De manière complémentaire, l'inversion lidar permet des avancées sur le bilan radiatif dans l'atmosphère. L'algorithme BOREAL restitue ainsi les propriétés microphysiques des aérosols à partir de leur extinction, rétrodiffusion et dépolarisation, également accessibles en laboratoire en géométrie lidar de rétrodiffusion à 180 deg.
- *La classification*. La figure 1 illustre la capacité de classification des aérosols. Un autre exemple typique est la production à partir d'un nuage de points de modèles numériques de terrain dans le cadre de la lasergrammétrie. Cette étape, qui fait souvent appel au Deep Learning, attribue à chaque point une classe comme « bâtiment », « sol », « végétation »... En robotique et dans le domaine des transports, cette étape recouvre l'ensemble des algorithmes de localisation et cartographie simultanées (SLAM).

- *La mise à disposition des données lidar*, centralisées dans des bases de données publiques (ACTRIS, EARLINET, AERIS, ...), accessibles y compris à des utilisateurs non spécialistes (IGN, Pôle, ...).

Exemples d'utilisation des produits de mesure lidar

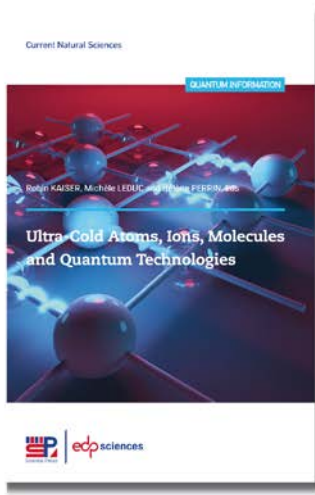
a. Topographie et modèles numériques de terrain

Dans le cadre du programme national LiDAR HD, l'IGN produit et diffuse une cartographie 3D de l'intégralité du sol et du sursol de la France en données lidar ainsi que des modèles numériques de terrain. Les données accessibles par blocs de 50×50 km² sont en particulier des nuages de points recalés, bruts ou classifiés avec une densité de points supérieure à 10 pts/m², une précision altimétrique meilleure que 10 cm et une précision en planimétrie meilleure que 50 cm. L'acquisition de ces données a mobilisé plus de 7000 heures de vol avec des systèmes lidar commerciaux fonctionnant à 1064 nm à une cadence de 1 à 2 MHz, couplés à des centrales inertielles et GPS. Le contrôle qualité s'est notamment appuyé sur des mesures complémentaires au sol. La classification a été réalisée selon 11 catégories. Cette cartographie est maintenant utilisée pour la prévention des risques d'inondations, les gestions forestières et agricoles, l'urbanisme. Une politique rigoureuse de contrôle qualité est également appliquée avec des mesures complémentaires pour vérifier que les algorithmes d'intelligence artificielle attribuent correctement les classes et que les données forment un ensemble complet. La figure 2 présente un exemple du nuage de points accessible sur le site LiDAR HD.

Ce même type de lidar est utilisé en archéologie, domaine dans lequel il apporte notamment une capacité de détection au travers du couvert végétal.

Ultra-cold atoms, ions, molecules and quantum technologies

By Robin Kaiser, Michèle Leduc, Hélène Perrin



This book is the English translation of 'ATOMES, IONS, MOLÉCULES ULTRAFROIDS ET TECHNOLOGIES QUANTIQUES' that received a special mention from the Roberval prize jury in the category 'Academic books'.

The field of cold atoms was born forty years ago and today remains a theme regularly awarded Nobel Prizes and at the forefront of physics research. The book presents the most recent developments and traces the exceptional growth of this field over the last ten years.

Prix
Roberval 

ISBN : 978-2-7598-2745-9
192 illustrated pages
Price : 95 €
Also available in ebook
On sale on
laboutique.edpsciences.fr



b. Etude de l'atmosphère

Le développement de filières (nationales et européennes) de traitement centralisé (ACTRIS/AERIS) permet d'harmoniser les données optiques aérosols issues de multiples lidars. L'initiative européenne, menée par l'Infrastructure de Recherche ACTRIS et les partenaires d'EARLINET, a transformé un réseau dispersé en une infrastructure intégrée, grâce à l'harmonisation des protocoles, au contrôle qualité et à l'intégration des bases de données dans ACTRIS-ARES, garantissant des produits homogènes et accessibles. Des filières de traitement communautaire, des services quasi temps réel pour les campagnes opérationnelles et des produits de niveau supérieur destinés à la validation satellitaire (EarthCare, en partenariat avec le CNES), à la modélisation et aux applications climatiques et de qualité de l'air ont été développés. L'apport majeur réside dans la qualité, la standardisation et la mise à disposition de données et produits prêts à l'emploi, qui rendent possible un usage opérationnel et scientifique à grande échelle des observations lidar en Europe. En France, les lidars aérosols ACTRIS opèrent sur les observatoires ou sites instrumentés nationaux avec, depuis 2020, l'intégration des mesures lidar de gaz trace atmosphériques effectuées dans le cadre du réseau international NDACC. Les lidars mesurant le profil d'ozone dans la stratosphère et la troposphère font également partie des mesures intégrées dans ACTRIS. Ces mesures lidar de long-terme sont effectuées en France à l'Observatoire de Haute-Provence (OHP) et à l'Observatoire de Physique de l'Atmosphère de La Réunion. Ces séries de profils d'ozone s'étendent sur plusieurs décennies et sont les plus longues séries de ce type à l'échelle mondiale. Ce réseau de mesures pour la surveillance de l'ozone stratosphérique a été ensuite élargi à la mesure des gaz trace, des aérosols et des paramètres dynamiques de la troposphère libre à la mésosphère.

Maturité des systèmes lidar et quelques exemples de transfert industriel

La plupart des systèmes lidar ont atteint un niveau de maturité élevé. Cependant, le transfert industriel butte fréquemment sur plusieurs difficultés. La technologie lidar reste fréquemment perçue comme couteuse et complexe. La capacité multi-fonction, pourtant réelle et dont la prise en compte permettrait de relativiser le coût, est parfois perçue comme conduisant à une pénalité incontournable sur les performances de détection. Récemment, les perspectives liées au marché de l'automobile ont conduit à de nombreuses annonces, pas toujours factuelles. Enfin, l'impression de complexité peut venir de la diversité de ces systèmes. Cette constatation a conduit à la définition de normes dans le but de faciliter l'uniformisation des systèmes et de l'exploitation des données. A titre d'exemple, la norme NF ISO 28902 portant sur la qualité de l'air et la météorologie de l'environnement comprend plusieurs volets associés à l'utilisation des lidars pour la mesure de la portée visuelle et de vent (par détection cohérente, pulsée ou à émission continue).

Malgré ces freins, plusieurs transferts réussis issus de travaux de recherche ont cependant marqué l'histoire du lidar.

L'ONERA développe des lidars vent cohérents depuis les années 90. A cette époque, les sources étaient des lasers CO₂ continus et les montages hétérodynes étaient en espace libre. L'essor des télécoms des années 2000 a engendré un développement rapide de la technologie fibrée à 1,5 μm, incluant des sources laser compactes et fiables, des amplificateurs Erbium, des composants fibrés de type circulateurs, séparateurs de polarisation, modulateurs acousto-optiques... Dans les années 2000, l'ONERA a utilisé ces composants pour concevoir et démontrer les premiers lidars vent tout fibrés et résolus en distance. Ces développements ont été transférés à KEOPSYS (maintenant LUMIBIRD) pour la source laser et LEOSPHERE (maintenant VAISALA) pour l'architecture lidar et le traitement de signal. LEOSPHERE a développé son premier WindCube d'après le démonstrateur de laboratoire de l'ONERA transféré, et est maintenant leader mondial sur le marché des lidars pour l'éolien.

De même, le laboratoire commun AGORA-Lab, partenariat entre le LOA et CIMEL, illustre un autre transfert réussi de la recherche vers l'industrie. Il a conduit au développement d'instruments innovants tels que le CE376, lidar Raman compact et automatisé pour la surveillance atmosphérique locale, et le CE710, prototype avancé de lidar à fluorescence multi-longueur d'onde (LIFE). Ces systèmes combinent l'expertise scientifique du LOA et le savoir-faire industriel de CIMEL, garantissant fiabilité et interopérabilité au sein d'ACTRIS. Cette synergie accélère la mise sur le marché de lidars intégrant mesures Raman, polarisation et fluorescence, ouvrant la voie à une nouvelle génération d'outils opérationnels pour la surveillance atmosphérique.

D'autres sociétés comme Gordien Strato développent des systèmes lidars basés notamment sur le savoir-faire acquis au sein de laboratoires comme le LATMOS. Enfin, des grands groupes industriels développent également des systèmes pour leurs marchés respectifs, qu'il s'agisse de la défense ou des transports et bénéficient du tissu français de laboratoires académiques au travers de projets collaboratifs.

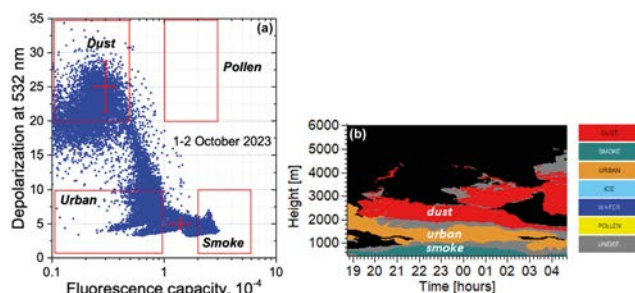


Figure 1. (a) Diagramme Dépolarisation–Fluorescence montrant les domaines caractéristiques de différents types d'aérosols (poussière, pollen, fumée, urbain). (b) : Distribution spatiotemporelle des types d'aérosols durant la nuit du 1^{er} au 2 octobre 2023 sur le site ATOLL-Université de Lille (source I. Veselovskii, B. Barchunov, Q. Hu, P. Goloub, T. Podvin, M. Korenskiï, G. Dubois, W. Boissiere, and N. Kasianik : Retrieval and analysis of the composition of an aerosol mixture through Mie–Raman–fluorescence lidar observations, *Atmos. Meas. Tech.*, **17**, 4137–4152, <https://doi.org/10.5194/amt-17-4137-2024>, 2024 sous licence CC BY 4.0).

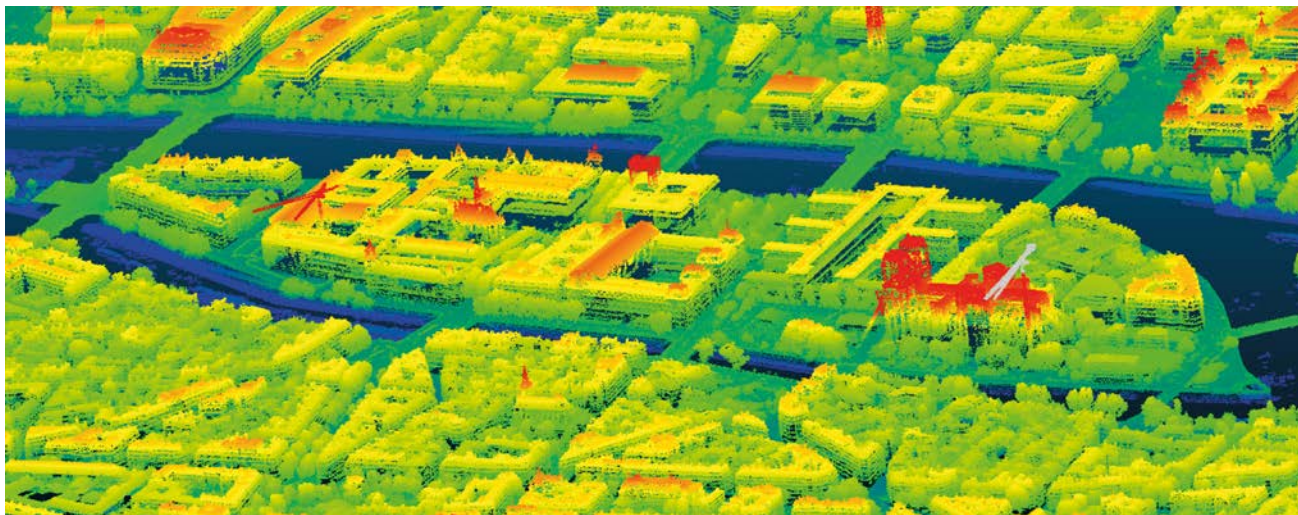


Figure 2. Nuage de points sur l'Île de la Cité - Paris (Données issues de LiDAR HD - IGN - <https://geoservices.ign.fr/lidarhd> - données chargées en Oct. 2025).

De manière complémentaire, des développements sont réalisés, en partenariat avec le CNES, pour contribuer au développement de nouveaux lidars satellites (Aeolus, EarthCare, MERLIN), reposant sur les développements, en matière de sources laser, détecteurs optiques et inversions lidar mentionnés ci-dessus, basés sur des développements en recherche fondamentale notamment en optique.

Conclusion

Le positionnement français est reconnu à l'échelle internationale, notamment au sein des projets portés à cette échelle (réseaux européens, missions satellites, conférences

internationales dont CRLC et ILRC). Si la concurrence asiatique se distingue par une forte intensité en dépôts de brevets et par une stratégie de réduction des coûts, les lidars développés en France conservent un haut niveau de performance. Issus de la recherche fondamentale et appliquée menée en optique dans les laboratoires et institutions nationales, ils reposent sur des technologies émergentes à l'origine d'innovations souvent disruptives. L'effort de transfert dans le domaine industriel a connu des succès et doit se poursuivre en travaillant notamment sur l'acceptabilité de la technologie qui passe notamment par une réduction de la taille et du coût des systèmes lidar et l'accroissement de leur automatisation. ●

SPECTROGON

State of the art products

Filtres Interférentiels

De 200 à 15000 nm

- Passe-bande
- Passe-haut
- Passe-bas
- Large bande
- Densité neutre
- Disponible en stock



Réseaux Holographiques

De 150 à 2000 nm

- Compression d'impulsion
- Télécom
- Accordabilité spectrale
- Monochromateurs
- Spectroscopie
- Disponible en stock



UK (parle français): sales.uk@spectrogon.com • Tel +44 1592770000

Sweden (headquarters): sales.se@spectrogon.com • Tel +46 86382800

US: sales.us@spectrogon.com • Tel +1 9733311191

www.spectrogon.com

MODULATEUR SPATIAL À ADRESSAGE OPTIQUE : STRUCTURE BSO-CRISTAL LIQUIDE ET APPLICATIONS

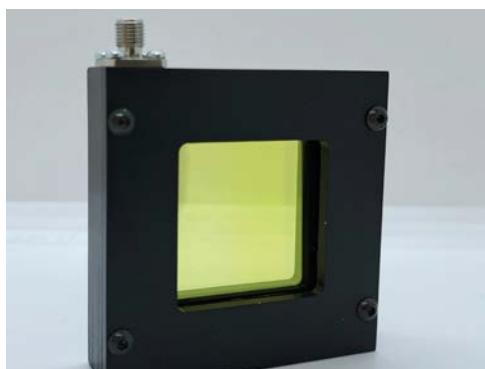
Jean-Pierre HUIGNARD^{1,2,*}, Brigitte LOISEAUX¹

¹ THALES –TRT Palaiseau (Retraités), 1 av Augustin Fresnel 91120 Palaiseau

² Institut Langevin ESPCI-Université PSL, 1 rue Jussieu 75005 Paris

³ HOASYS - Stefania Residori , Umberto Bortolozzo - 120 Route des Macarons 06560 Valbonne

*jphuignard@free.fr



Les modulateurs spatiaux sont des composants importants pour la conception et réalisation de systèmes photoniques de hautes performances. On présente la technologie OASLM initiée par THALES-TRT et la diversité de ses applications au traitement de faisceaux lasers.

<https://doi.org/10.1051/photon/202613624>

Retour sur l'histoire spatial light modulator...

Dans les années 1965 - 1970 l'optique de Fourier avait déjà fait l'objet en France de recherches et de développements importants et reconnus au niveau international dans plusieurs laboratoires par exemple, l'Institut d'Optique, les Laboratoires d'Optique Université Paris et de Besançon, le LCR Laboratoire Central de Recherches de la compagnie CSF spécialiste reconnu des Radars et traitement du signal RF (maintenant THALES-TRT). L'objectif à cette époque était d'exploiter les propriétés connues et déjà enseignées des ondes optiques cohérentes et de l'holographie pour réaliser des fonctions

de traitement en parallèle de l'information telles que la transformée de Fourier ou plus complexe, la fonction de corrélation entre deux images. Une époque où les capacités potentielles du calcul optique analogique et parallèle pouvaient apparaître comme nettement supérieures au traitement numérique. De très belles expériences et démonstrateurs de principe ont été réalisés, on pense par exemple aux démonstrations à CSF - LCR de corrélateurs optiques pour la reconnaissance de formes et le premier traitement optique du radar à vision latérale. Le point faible restait bien entendu l'entrée des données dans ces dispositifs: cette fonction était réalisée par une diapositive photographique ou

un film reproduisant le signal à traiter. C'est ce besoin d'une "diapositive programmable" qui a constitué notre motivation au LCR - Thomson-CSF et chercher à innover : réaliser un composant optoélectronique capable de convertir au moins à cadence vidéo un signal $S(t)$ en une modulation spatiale contrôlée de l'amplitude et/ou de la phase d'une onde laser cohérente visible ou proche IR - composant aujourd'hui connu sous le nom bien établi de EASLM - electrically addressed ou OASLM - optically addressed spatial light modulator, configuration retenue et réalisée par le LCR. On note que dans les premières publications le composant OASLM était souvent désigné sous le nom : LCLV pour liquid

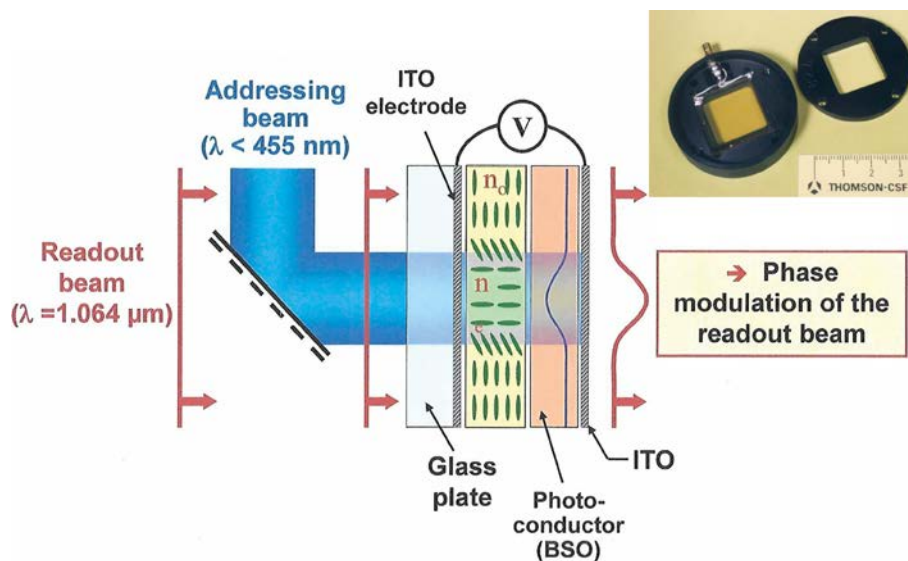


Figure 1. Structure du composant OASLM : Cristal Photoconducteur-Cristal liquide Modulation spatiale de la phase 1.06 μm

crystal light valve. Bien au-delà du traitement optique ces composants à base de matériau cristal liquide ouvraient la voie aux applications grand public très importantes telles que les écrans plats TV et projecteurs TV de haute luminance qui sont des composants à adressage électrique matriciel.

La structure OASLM du LCR et la grande diversité de ses applications en Photonique

Elle est issue des travaux du laboratoire sur l'holographie dynamique dans les cristaux photoréfractifs qui ont conduit à identifier un cristal aux propriétés remarquables le $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ ou son équivalent $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$: création dans ces cristaux à la fois Photoconducteurs et Electro-Optiques-EO – d'un champ de charge d'espace qui module l'indice du cristal par effet photoréfractif et dans ces conditions génère un hologramme dynamique de volume issu de l'interférence de deux ondes Référence et Signal. Des performances remarquables, un temps de réponse de quelques ms sous

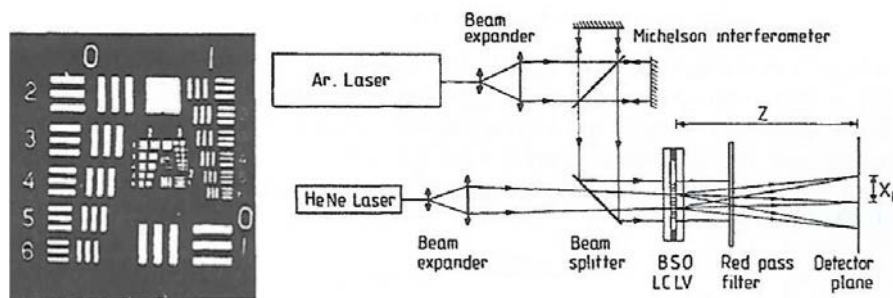
éclairage de quelques $10\text{mW}/\text{cm}^2$ dans le vert. L'idée de l'OASLM-LCR consistera donc à associer un très bon cristal photoconducteur comme le BSO au meilleur milieu EO : une couche mince de cristal liquide nématique dans la mesure où l'on recherche des temps de réponse du composant de l'ordre de 1 - 20 ms. Le schéma retenu du OASLM sur la figure 1 intègre un cristal BSO d'épaisseur 1 mm à un film orienté de cristal liquide nématique CL d'épaisseur de l'ordre de $10\mu\text{m}$ - $20\mu\text{m}$. Sous éclairage d'une image projetée sur le BSO dans le domaine spectral bleu-vert, la tension appliquée sur l'électrode transparente ITO du photoconducteur est reportée sur le cristal liquide en phase nématique

qui selon son orientation modifie la phase (mode parallèle CL) ou l'amplitude (mode twisté CL) de l'onde plane cohérente traversant le composant. Ce premier composant réalisé en collaboration avec le laboratoire Cristal Liquide du LCR va déjà présenter d'excellentes caractéristiques. C'est Philippe Aubourg, doctorant au laboratoire, qui dans le cadre de sa thèse effectuera une analyse du composant incluant modélisations, schéma équivalent, et expériences très complètes de caractérisations EO et sera l'auteur de la publication originale sur le sujet OASLM-BSO CL [1]. En relation avec les applications visées au traitement temps réel de l'information, l'adressage optique du photoconducteur avait pu être obtenu par projection de l'image d'un tube cathodique et puis quelques années plus tard par un mini projecteur TV cristal liquide ou MEMS qui permettait un système compact et fiable. Les principales caractéristiques du composant OASLM étaient les suivantes : dimension typique BSO $20 \times 20 \times 1$ mm – Cristal liquide E7- $10\mu\text{m}$ - Δn : 0.2 - Temps de réponse 10 ms - Résolution spatiale $20\mu\text{m}$ – Faible tension de commande < 50V - 200Hz – Tenue au flux IR de l'ordre de $0.5 \text{ J}/\text{cm}^2$ – Excursion de phase typique de $0 - 2\pi$ ou plus selon épaisseur et choix du CL.

Les avantages importants de cette structure étaient:

- Fonctionnement en transmission dans IR et proche IR
- Grande surface BSO par exemple : 4×4 cm

Figure 2. Mesure de la MTF du composant BSO-CL issu de la référence 1 - Image incohérente projetée par OASLM.



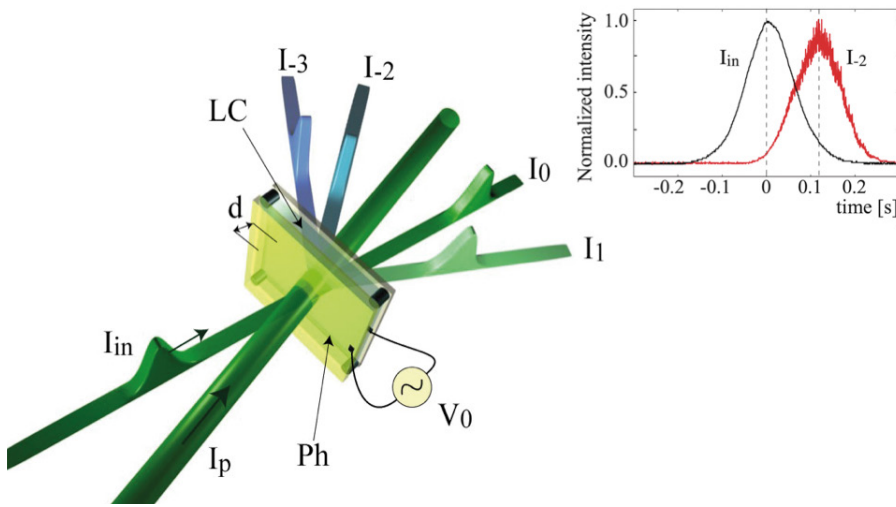


Figure 3. Interaction pompe-signal - Diffraction et couplage nonlinéaire entre les ondes. Effets de lumière lente issue de la référence 4.

- Pas de pixellisation, électrodes transparentes ITO homogènes donc sans diffraction parasite de l'onde cohérente transmise. À partir de ces très bonnes caractéristiques, l'OASLM avait été intégré à un système temps réel de corrélation optique pour le tri d'objets dans le cadre d'un projet européen.

L'holographie dynamique et interférométrie

Outre les bonnes propriétés mentionnées ci-dessus, le composant BSO-CL peut aussi être considéré comme un milieu Kerr dans une interaction de mélange holographique deux ondes référence et signal spatial multimode générant une modulation d'indice en fonction de l'intensité du champ

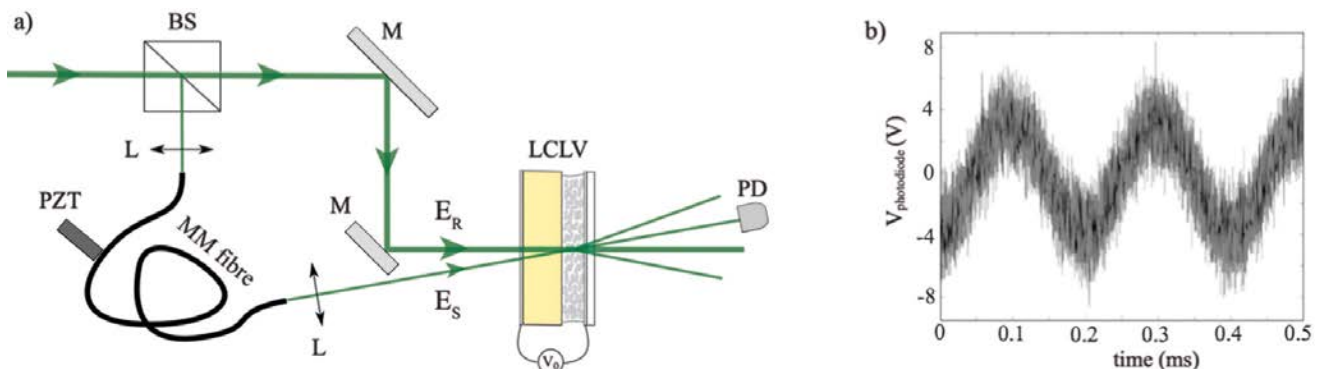
d'interférences induit dans le domaine de sensibilité spectrale du BSO, typiquement bleu-vert. Il en résulte un réseau d'indice type Raman Nath, de période spatiale de l'ordre de 20 μm et efficace compte tenu du Δn élevé du cristal liquide (Δn max CL nématique E7 : 0.2). Il a été montré par Arnaud Brignon l'obtention d'une amplification de type paramétrique d'une image $\times 10$ par mélange holographique à deux ondes référence-signal [2]. En relation avec THALES-TRT, l'équipe cristal liquide de Stefania Residori et Umberto Bortolozzo de l'Institut Non Linéaire de Nice - INLN (aujourd'hui Institut de Physique de Nice du CNRS et de l'Université Côte d'Azur), développera aussi vers 2005 la technologie de ce composant en le considérant

comme un milieu nonlinéaire équivalent Kerr avec une valeur du coefficient n_2 exceptionnellement élevée puisque de l'ordre de 0.2 cm^2/W [3]. Cette approche va apporter un grand nombre d'expériences et de modélisations originales sur des interactions de type holographie dynamique pompe-signal avec couplage entre les ondes multiples issues de la diffraction Raman-Nath [4]. Par exemple, de nouvelles expériences pour l'holographie interférométrique temps réel, pour l'interférométrie Sagnac d'un milieu en rotation... Également, pour des applications capteurs à fibres multimodes à haute sensibilité, les expériences de l'INLN montrent que la détection cohérente avec le composant BSO-CL à 0.53 μm ou GaAs-CL à 1.06 μm permet d'excellentes performances en termes de limites de l'amplitude de vibration du petit signal détectable : typiquement de l'ordre du pm voire fm dans une bande passante de quelques kHz. Ces travaux vont aussi jusqu'à démontrer et exploiter en interférométrie pompe - signal les concepts de lumière lente liés à la dispersion de la vitesse de groupe d'une impulsion signal de quelques dizaines de ms [4].

La correction - mise en forme - traitement de faisceau laser

L'évolution remarquable des performances des sources laser pompées par diodes en termes de

Figure 4. Interférométrie-vibrométrie avec fibre multimode



Pôle d'Expertise Photonique :
Précision, Performance,
Innovation

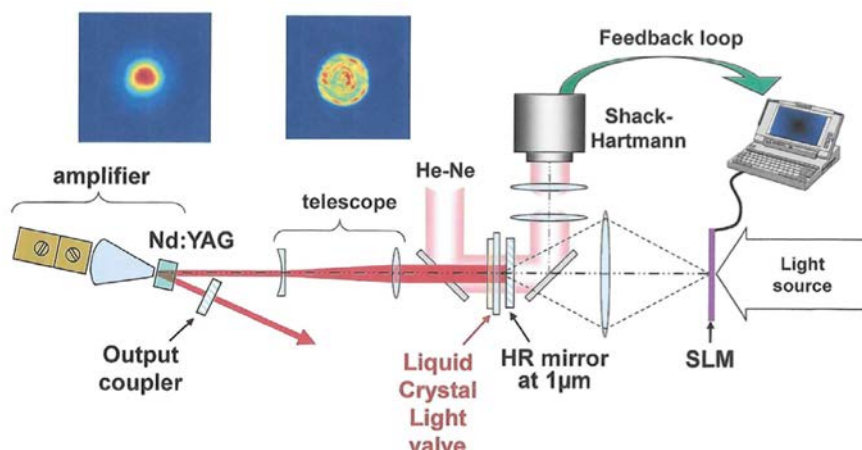


Figure 5. Contrôle de faisceau intracavité Nd:YAG. Génération d'une super-gaussienne.

puissance délivrée du régime continu à l'impulsionnel femtoseconde a conduit à reconsidérer les problèmes de qualité spatiale du faisceau émis et du contrôle du mode en cavité. Dans ce cadre il est apparu que le composant OASLM possédait les bonnes caractéristiques requises pour ces applications, à savoir, la correction de défauts de phase importants ainsi que la génération d'une forme d'onde particulière requise aujourd'hui pour les applications industrielles. La structure BSO-CL a ainsi été utilisée intracavité par Jérôme Bourderionnet pour démontrer la mise en forme adaptative du mode émis de la source Nd-YAG pompée diodes, par exemple un faisceau Supergaussien et la correction des distorsions résiduelles de phase dues aux effets thermiques. L'OASLM est adressé par un SLM-CL à adressage électrique projeté et légèrement défocalisé sur le cristal photoconducteur BSO, les signaux d'adressage SLM étant issus d'un capteur de front d'onde [5]. Dans ces expériences la résolution spatiale étant de l'ordre de 20 µm, le OASLM traite en parallèle le front d'onde sur l'équivalent de 500x500 pixels ce qui est remarquable par comparaison avec les techniques d'optique adaptative conventionnelles. Avec l'objectif de valider ces fonctions sur des chaînes laser de très haute énergie le LCR avait collaboré avec le laboratoire LULI de l'école Polytechnique dirigé

alors par Arnold Migus. Il s'agissait pour l'expérience d'une source Nd-Glass délivrant 100 TW et des impulsions de 300 fs. Dans les expériences l'OASLM était placé à l'entrée des chaînes d'amplification pour rester dans les limites de tenue du flux du composant. Il permet la correction des aberrations sur chaque tir ainsi que les dérives thermiques de la chaîne et le contrôle de phase de chaque composante spectrale de l'impulsion [6]. Ces premières expériences avec succès sur les chaînes laser du LULI ont conduit THALES-TRT à des contacts avec le laboratoire du CEA qui préparait le projet chaîne laser Mégajoule à Bordeaux. Dans le cadre de cette potentielle application, la maîtrise technologique et des caractérisations précises et reproductibles de tenue au flux et de résolution spatiale du composant BSO-CL ont été effectuées à THALES-TRT par Brigitte Loiseaux et Anne Delboulbé. Ces travaux aboutissent en 2004 à un démonstrateur adressé par LED bleue et adapté au traitement de faisceau laser haute énergie. C'est finalement ce composant qui a été retenu pour une fonction particulière de mise en forme du faisceau Mégajoule avant modules préamplificateurs aux Etats-Unis au Lawrence Livermore National Lab, puis sur les projets équivalents en Chine National Laboratory on High Power Laser et à CEA-Bordeaux. Comme le dit le Dr Heebner dans sa présentation SPIE de 2010 [7] : « OASLMs are ideal for ●●●



PHOTOMÈTRE
OFDR LASER EDFA
SWITCH DAS OSA DTS
BOSA OSA FBGI
COMPOSANTS
TLS VOA



www.wavetel.fr
about.wavetel.fr



coherent laser beams » ; Une issue remarquable et non prévue pour ce composant électro-optique BSO-CL dont les premiers résultats ont été publiés par le LCR en 1982 et qui a contribué le 5 Décembre 2022 au « LLNL break Fusion record » sur une source délivrant 2 MJ !

Nouveaux développements par HOASYS

Quarante ans après leurs débuts, les OASLM tels que BSO-CL continuent d'améliorer leurs performances et de stimuler des nouvelles applications. Actuellement, ils sont produits en France par l'entreprise HOASYS, une start-up à la pointe sur le développement de systèmes optiques pour contrôler et détecter la lumière, née au sein de l'Incubateur Provence Côte d'Azur, grâce à loi sur l'innovation, et sous l'égide des programme RISE du CNRS Innovation et DeepTech de BPI France. Les

OASLM actuels sont devenus avant tout des composants faciles d'accès et d'utilisation, avec un contrôle électronique et optique intégrés. Ils présentent aussi des nouvelles fonctionnalités, ainsi que la possibilité de les adapter en fonction de l'application et de les personnaliser selon les exigences des clients. Bien que le principal marché des OASLM soit encore celui des laboratoires de recherche, les applications liées à l'imagerie médicale prennent une importance croissante. Par ailleurs,

ces dispositifs présentent également un fort potentiel commercial dans des domaines tels que celui des lasers à forte puissance destinés aux milieux industriels. D'autres domaines très intéressés par les OASLM sont les communications en espace libre, la cryptographie quantique et la détection de phase. On peut dire que les OASLM suscitent aujourd'hui un intérêt grandissant, avec un potentiel en forte croissance et on peut s'attendre à les voir intégrer des marchés en expansion. ●

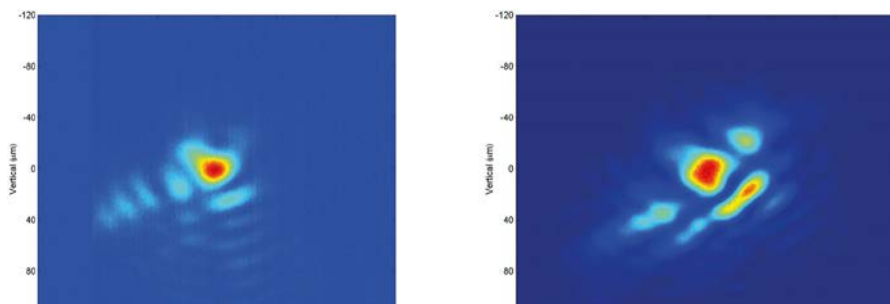
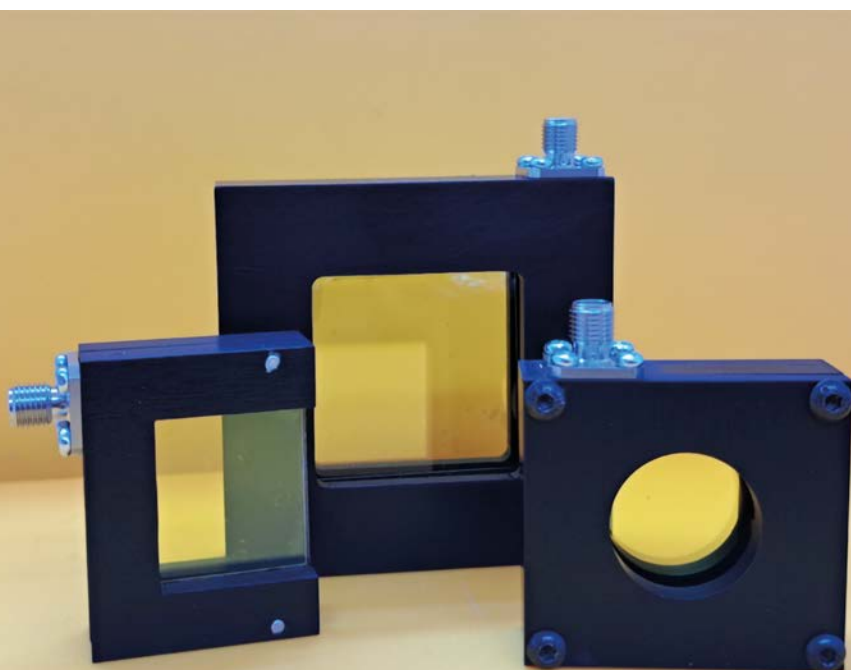


Figure 6. Faisceau laser très haute énergie LULI (100TW - 300fs) - Qualité de faisceau proche de limite de diffraction après correction (à droite).

Figure 7. Composants OASLM BSO-CL réalisés par la société HOASYS.



RÉFÉRENCES

- [1] P.Aubourg, J-P. Huignard, M.Hareng, R.A.Mullen, *Appl.Opt.* **21**, 3706 (1982)
- [2] A. Brignon, I. Bongrand, B. Loiseaux, J-P. Huignard, *Opt.Lett.* **22**, 1855 (1997)
- [3] S. Residori, U. Bortolozzo, J-P. Huignard, *Appl.Phys.B.* **95**, 551 (2009)
- [4] U. Bortolozzo, S.Residori, J-P. Huignard, *Laser Photonics Review.* **1**, 1 (2009); A.Peigné *et al.* *Opt.Lett.* **40**,5482 (2015)
- [5] J. Bourderionnet, A. Brignon, J-P. Huignard, A. Delboulbé, B. Loiseaux, *Opt.Lett* **26**, 1958 (2001)
- [6] J-C. Chanteloup *et al.*, *Opt.Lett* **23**, 475 (1998) – C. Dorrer *et al.*, *Opt.Lett* **23**,709 (1998)
- [7] J.Heebner *et al.*, *SPIE Boulder Symposium*, 28.September (2010)

MÉTROLOGIE DE L'APPARENCE : MESURER CE QUE L'ON VOIT

Gaël OBEIN*

LNE-Cnam (EA 2367), La Plaine St Denis, France

*gael.obein@lecnam.net



Dans la continuité de la colorimétrie initiée au XIX^e siècle, la métrologie optique s'applique aujourd'hui à développer des grandeurs, des techniques de mesures et des étalons pour caractériser les effets visuels contemporains que sont l'iridescence, le scintillant, le mat, le brillant ou la translucidité, en accord avec la sensation visuelle qu'ils génèrent. On appelle cette branche de la spectrophotométrie, la métrologie de l'apparence.

<https://doi.org/10.1051/photon/202613629>

L'apparence visuelle des objets manufacturés occupe aujourd'hui une place centrale dans l'industrie et la société.

Dans un contexte où la fonctionnalité des produits a atteint un haut niveau de maturité, l'apparence est devenue un facteur déterminant de différenciation, de valeur perçue et de choix pour l'utilisateur. Couleur, brillant, texture, translucidité, scintillement ou iridescence sont des attributs visuels qui permettent à un observateur d'identifier un matériau, d'inférer sa qualité, son mode de fabrication, voire son histoire (fig1).

Pour le métrologue, la difficulté majeure réside dans le fait que l'apparence n'est pas une grandeur physique directement accessible. Elle est une sensation construite par le système visuel à partir du signal optique issu de l'interaction entre la

lumière, l'objet et l'environnement. La métrologie de l'apparence se situe précisément à cette interface entre optique, vision et perception : elle vise à développer des grandeurs, des méthodes et des étalons permettant de mesurer des indicateurs pertinents, en cohérence avec ce qui est effectivement perçu par un observateur humain. Cet article propose une introduction à la métrologie de l'apparence qui est une branche de la spectrophotométrie.

APPARENCE ET MÉTROLOGIE

L'apparence d'un objet est définie par la CIE comme « l'aspect de l'expérience visuelle par laquelle les choses sont reconnues » [1]. Lorsqu'un observateur regarde une scène, les photons issus des sources lumineuses sont réfléchis, transmis ou diffusés par les objets, puis captés par la rétine. Le système visuel traite ensuite

ces signaux pour construire une représentation cohérente de cette scène. La scène vient d'apparaître. Ainsi, l'apparence n'est pas localisée dans l'objet, mais dans l'observateur.

Cette caractéristique pose un défi au métrologue : le mesurande n'est ni directement accessible, ni aisément définissable. La stratégie adoptée en métrologie de l'apparence consiste à travailler sur le stimulus physique, c'est-à-dire le flux radiométrique émis par l'objet dans des conditions données – et à établir des liens entre ce stimulus et la sensation visuelle, par le biais d'études psychophysiques.

En effet, l'expérience montre que, bien que complexe, l'apparence est quantifiable. Lorsqu'on demande à des observateurs de classer des échantillons selon leur couleur, leur niveau de brillant ou leur translucidité, les classements obtenus sont remarquablement ●●●

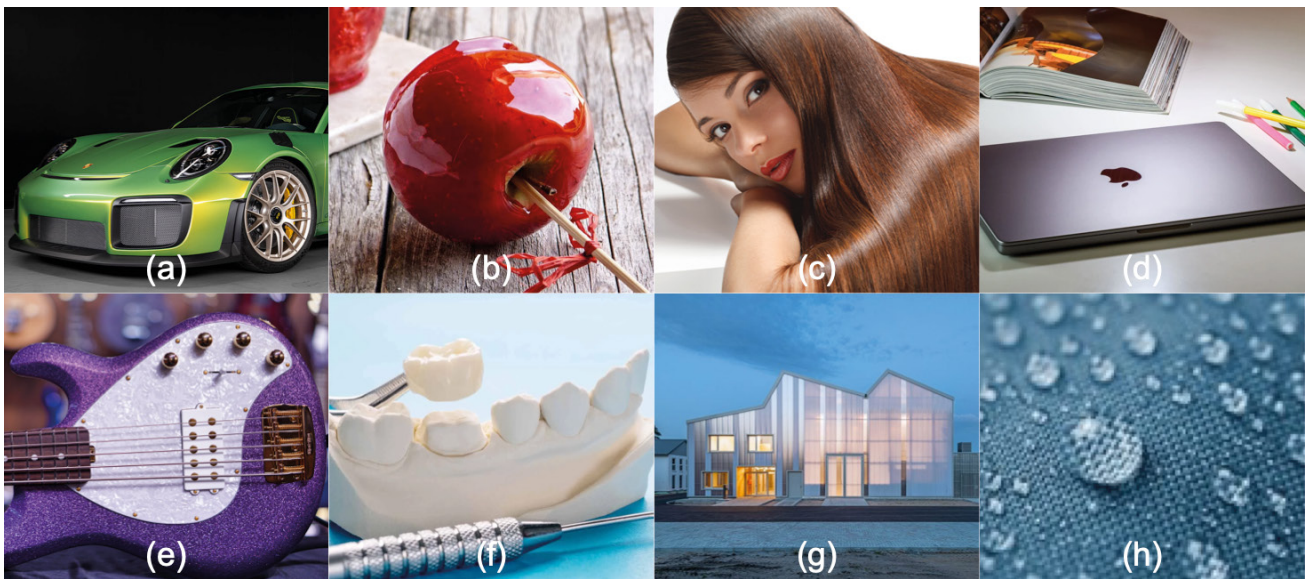


Figure 1. goniochromatisme (a), brillant (b), texture (c), matité (d), scintillant (e), translucidité (f), transparence (g), fonctionnalité (h), sont des attributs visuels qui participent à notre sentiment d'esthétique, de qualité et de singularité. Le contrôle de ces attributs est essentiel pour toutes les industries car ils sont impliqués dans les critères de choix des consommateurs et leur envie d'acheter.

reproductibles. Le rôle du métrologue est ainsi de définir des grandeurs spectrophotométriques et des indicateurs associés qui permettent de retrouver ces classements perceptifs à partir de mesures physiques traçables.

Cette démarche repose sur un triptyque :

- l'acquisition de la sensation visuelle par des protocoles psychophysiques,
- la mesure de grandeurs pertinentes par des méthodes radiométriques et spectrophotométriques,
- la modélisation des relations entre mesures et perception, qui peut dans certains cas aller jusqu'à la normalisation et la création d'observateurs « étalons ».

La spécificité de la métrologie de l'apparence est donc de ne jamais perdre de vue la finalité perceptive de la mesure : ce que l'on mesure doit correspondre, autant que possible, à ce que l'on voit.

GRANDEURS SPECTROPHOTOMÉTRIQUES POUR LA MÉTROLOGIE DE L'APPARENCE

BRDF : Bidirectional Reflectance Distribution Function

La grandeur centrale pour la caractérisation de l'apparence en réflexion est la fonction de distribution

bidirectionnelle du coefficient de luminance, plus connue sous son acronyme anglais BRDF [2]. La BRDF décrit l'évolution de la luminance d'une surface rapportée à l'éclairement de celle-ci, en fonction des directions d'illumination et d'observation, de la longueur d'onde et, le cas échéant, de l'état de polarisation. C'est une grandeur à 6 dimensions qui s'exprime en inverse stéradian (figure 2a).

La BRDF (fig2a) constitue une description complète du comportement optique directionnel d'une surface opaque. Elle est indispensable dès lors que l'on s'éloigne du modèle lambertien, ce qui est le cas de la majorité des surfaces industrielles modernes : surfaces brillantes, satinées, métalliques, goniochromatiques ou scintillantes.

En théorie, la BRDF est définie pour des paramètres géométriques infinitésimaux, à savoir angles solides, diverges et surfaces éclairées nulles. Dans la pratique, il convient d'ouvrir ces paramètres, ce qui appelle une prudence mêlée d'une

expertise en fonction des surfaces explorées [3].

On mesure la BRDF avec des dispositifs dédiés appelés goniospectrophotomètres (fig 3a). Il s'agit d'instruments capables de contrôler les géométries d'illumination et de détection. Aujourd'hui, la plupart de ces instruments combinent les atouts des bras robots et des capteurs imageurs. Les principaux défis métrologiques des goniospectrophotomètres se situent au niveau des résolutions angulaires, de la dynamique de la détection, de la maîtrise de la polarisation, de la gestion des volumes de données, de la vitesse de mesure, de la traçabilité des mesures à différentes échelles ou encore de la compréhension des effets de la cohérence sur les résultats.

BTDF : Bidirectional Transmittance Distribution Function

Lorsque l'on s'intéresse aux matériaux transmissifs ou semi-transparents, la grandeur pertinente est la fonction de distribution bidirectionnelle de la

transmittance, ou BTDF. Elle décrit la luminance transmise dans une direction donnée, rapportée à l'éclairement directionnel (fig2b).

La BTDF est essentielle pour caractériser des diffuseurs, des verres dépolis, des matériaux architecturaux, des composants pour l'éclairage ou les revêtements des panneaux photovoltaïques. Bien que des mesures de BTDF existent depuis longtemps, la définition métrologique rigoureuse de la BTDF et sa traçabilité sont des développements récents [6].

BSSRDF : Bidirectional Scattering Surface Reflectance Distribution Function

La translucidité constitue un attribut visuel majeur de l'apparence, mais longtemps négligé du point de vue métrologique. Elle résulte de phénomènes de diffusion volumique, pour lesquels la lumière pénètre dans le matériau, y subit des interactions multiples, puis ressort dans le demi-espace à une position différente de celle du point d'incidence.

La grandeur adaptée pour décrire ce comportement est la fonction de distribution bidirectionnelle de la diffusion sous la surface, ou BSSRDF. Contrairement à la BRDF, la BSSRDF dépend non seulement des directions d'illumination et d'observation, mais également de la distance spatiale entre les points d'entrée et de sortie de la lumière (fig 2c). Elle s'exprime par le rapport de la luminance d'un élément de surface dans une direction donnée par le flux tombant sur un autre élément de surface et provenant d'une direction particulière. Son unité est en $[m^{-2} \cdot sr^{-1}]$.

La BSSRDF est une grandeur à 8 degrés de liberté, ce qui rend sa mesure particulièrement complexe sur le plan instrumental. Elle n'a commencé à devenir accessible qu'avec les progrès récents en goniospectrophotométrie et en imagerie [7, 8]. Elle ouvre la voie à une véritable métrologie de la translucidité, avec des applications directes sur

des surfaces comme la peau ou les prothèses dentaires. Au-delà, la mesure de la BSSRDF va permettre de valider des modèles de propagation radiative largement utilisés dans la formulation ou la synthèse d'image, mais qui n'ont jamais été confrontés à des mesures.

BSSTDF et extension aux matériaux complexes

Si l'on bascule sur l'autre hémisphère, une extension naturelle de la BSSRDF conduit à la BSSTDF (fig2d), qui décrit la diffusion bidirectionnelle à travers des matériaux minces, épais ou multicouches [9]. Cette grandeur, encore en cours de structuration, est appelée à jouer un rôle croissant dans la caractérisation de matériaux fonctionnels et de structures complexes issues, par exemple, de l'impression 3D. Elle permettra également de quantifier les pertes latérales ou l'absorption. Là encore, de nombreux modèles existent mais n'ont jamais été validés.

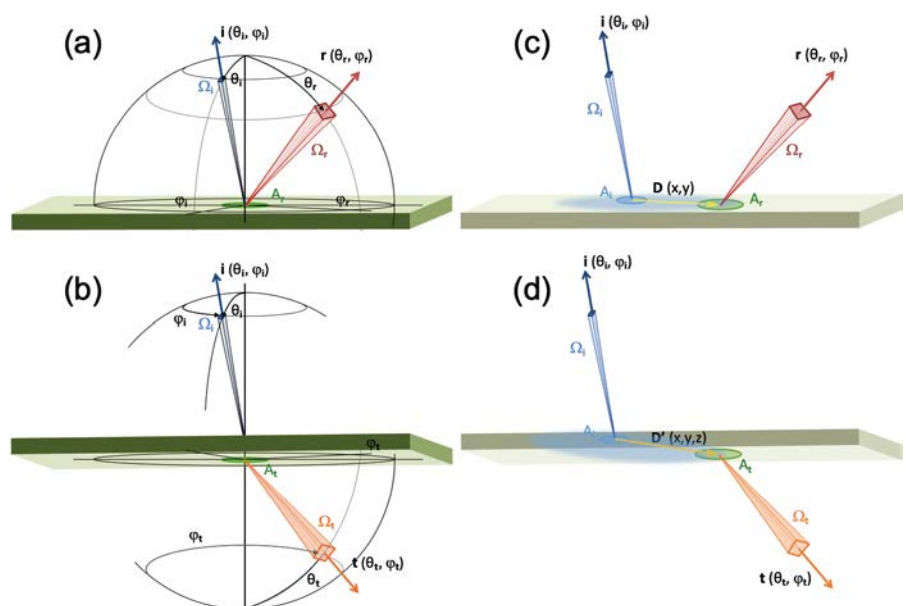
STRUCTURATION DE LA DISCIPLINE

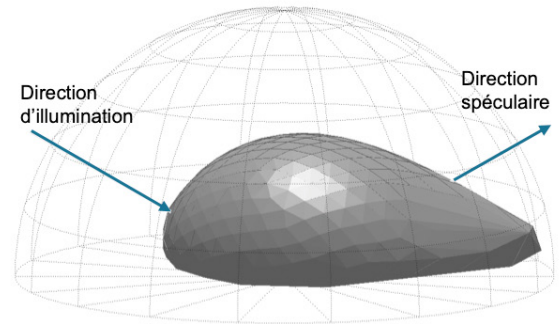
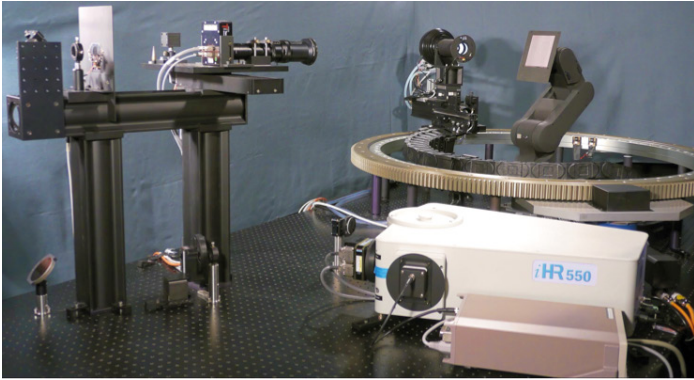
Au cours de la dernière décennie, la métrologie de l'apparence a connu un développement rapide, porté en grande partie par des projets collaboratifs européens [10]. Ces travaux ont permis de faire évoluer la discipline d'un ensemble de pratiques instrumentales hétérogènes vers une approche plus cohérente et traçable.

Un premier axe majeur a consisté à améliorer les dispositifs primaires de mesure de la BRDF. Les progrès réalisés en résolution angulaire, en dynamique de détection et en maîtrise des effets de polarisation et de speckle ont permis de réduire significativement les incertitudes de mesure et d'accéder à des phénomènes jusqu'alors hors de portée instrumentale (Fig 4).

Un second axe a porté sur la définition de protocoles de mesure et de stratégies d'échantillonnage adaptées aux différents types ●●●

Figure 2. Les différentes grandeurs de la métrologie de l'apparence sont la BRDF (a) et la BTDF (b), définies respectivement comme le rapport de la luminance selon r et t par l'éclairement selon i, et la BSSRDF et la BSSTDF, définies respectivement comme le rapport de la luminance selon r et t par le flux incident au point A_i selon la direction i. La BRDF et la BTDF ont 6 dimensions ($\theta_i, \theta_r, \phi_i, \phi_r, \lambda, \sigma$), la BSSRDF a 8 dimensions ($\theta_i, \theta_r, \phi_i, \phi_r, \lambda, \sigma, x, y$), la BSSTDF a 9 dimensions ($\theta_i, \theta_r, \phi_i, \phi_r, \lambda, \sigma, x, y, z$).





d'effets visuels. Il est désormais établi que les paramètres instrumentaux pertinents dépendent fortement de la nature de la surface étudiée. Des recommandations ont ainsi été formulées pour la mesure de surfaces quasi-lambertiennes [12], brillantes [13], goniochromatiques [14] ou scintillantes [15], en lien avec les seuils de perception visuelle.

Parallèlement, des travaux importants ont été menés pour définir de nouvelles grandeurs spectrophotométriques, en particulier la BTDF et la BSSRDF, et pour développer des références primaires et des artefacts de transfert associés [16]. Ces développements constituent une étape essentielle vers la mise en place d'une infrastructure métrologique complète pour l'apparence.

Enfin, un effort particulier a été consacré à la corrélation entre mesures physiques et sensation visuelle. Des études psychophysiques ont permis de mieux comprendre les mécanismes perceptifs associés au brillant [17], au scintillement [18] ou à la translucidité [19]. Malheureusement, il reste difficile aujourd'hui de corréler les mesures spectrophotométriques et les échelles perceptives, afin de

Figure 3. gauche : ARGon³, un goniophotomètre classique qui combine l'utilisation d'un bras robot, d'une source rotative et d'un système imageur en guise de détecteur [4]. Droite : Mesure de la BRDF d'un échantillon de spectralon® pour $\theta_i = 60^\circ$, $\phi_i = 0^\circ$, $\lambda = 550$ nm et 332 directions d'observation réparties sur l'hémisphère [5]. La surface illuminée était d'environ 1,2 cm², l'angle solide $\Omega_i = 0,96 \times 10^{-3}$ sr, faisceau dépolarisé. La sphère représente une BRDF de 0,56 sr⁻¹.

proposer des indicateurs métrologiques mieux alignés avec l'expérience visuelle des observateurs.

APPLICATIONS INDUSTRIELLES ET SCIENTIFIQUES

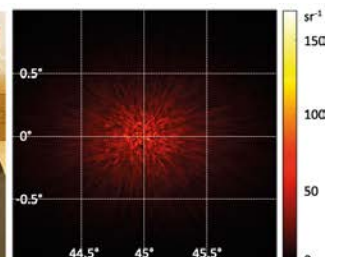
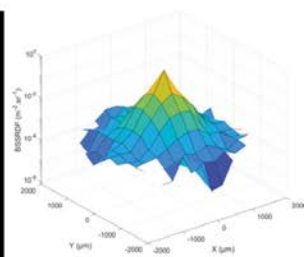
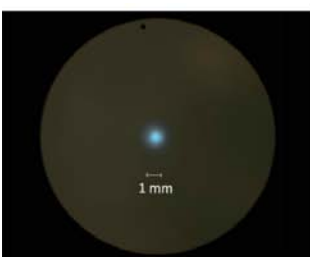
Les retombées de la métrologie de l'apparence sont multiples et concernent un large spectre d'applications.

Sur le plan industriel, ces travaux permettent d'assurer un contrôle objectif et traçable de l'apparence des produits manufacturés, en complément ou en remplacement de l'expertise visuelle. Ils ouvrent la voie à une maîtrise fine des effets visuels, à la formulation de nouveaux matériaux et à la stabilisation des procédés de production.

La métrologie de l'apparence joue également un rôle clé dans la validation des modèles de rendu utilisés pour l'imagerie scientifique, la réalité virtuelle et le prototypage numérique. Des données spectrophotométriques fiables et traçables sont indispensables pour produire des images virtuelles crédibles, tant du point de vue physique que perceptif.

Les secteurs émergents de l'impression 3D et du jumeau numérique bénéficient directement de ces avancées, en permettant la caractérisation et l'archivage de propriétés optiques complexes, notamment pour des objets patrimoniaux ou des œuvres d'art.

Figure 4. gauche : Mesure de BSSRDF réalisée sur un échantillon de spectralon®. Le spot d'illumination mesure 50 μ m. La diffusion s'étale sur plus de 4 mm [8]. Droite, mesure de BRDF dans la direction spéculaire d'un échantillon brillant en spectre photopique $V(\lambda)$ [11]. La résolution angulaire est de 0,017°, ce qui impose d'avoir des faisceaux tellement collimatés que le speckle apparaît, bien que la largeur de bande soit d'environ 150 nm.



Au-delà de l'industrie, la métrologie de l'apparence fournit des outils précieux pour la compréhension du fonctionnement du système visuel humain et des phénomènes de transfert radiatif dans les matériaux. Elle contribue ainsi à un dialogue fécond entre optique, vision et sciences des matériaux.

CONCLUSION

La métrologie de l'apparence constitue aujourd'hui un champ de recherche à la croisée de l'optique, de la spectrophotométrie et des sciences de la vision. En s'attachant à mesurer non

seulement des grandeurs physiques, mais des grandeurs pertinentes du point de vue perceptif, elle répond à des besoins industriels et sociétaux croissants.

Les progrès récents dans la définition des grandeurs bidirectionnelles, le développement d'instruments primaires et l'intégration des connaissances issues de la psychophysique ont structuré la discipline. Si de nombreux défis subsistent, les bases sont désormais posées pour une métrologie de l'apparence robuste, traçable et utile. ●

RÉFÉRENCES

- [1] J. S. Christie, *CIE-Journal* **5**(2), 41 (1986)
- [2] F. Nicodemus, J. Richmond, J. Hsia, I. Ginsberg, T. Limperis, NBS Monogr. 160, National Bureau of Standards (1977)
- [3] G. Obein, in *Quand la matière diffuse la lumière*, Presses des Mines, 71 (2019)
- [4] A. Höpe, T. Atamas, D. Hünerhoff, S. Teichert, K.-O. Hauer, *Rev. Sci. Instrum.* **83**, 045102 (2012)
- [5] G. Obein, R. Bousquet, M. Nadal, *Proc. SPIE* 5880, T1-T10 (2005)
- [6] J. Fu *et al.*, *Metrologia* **61**(3) (2024)
- [7] P. Santafé-Gabarda, A. Ferrero, N. Tejedor-Sierra, J. Campos, *Opt. Express* **29**, 34175 (2021)
- [8] L. Gevaux, D. Saha, G. Obein, *Appl. Opt.* **62**(18) (2023)
- [9] M. Gerardin, M. Paulin, R. Pacanowski, *Opt. Express* **32**, 39267 (2024)
- [10] JRP projects xDReflect, BiRD, BxDiff, xDDiff (2013–2027), EMRP/EMPIR/EPM programmes (2009–2030)
- [11] P. Chavel, T. Labardens, L. Simonot, M. Hébert, Y. Sortais, G. Obein, *Frontiers in Optics + Laser Science*, paper JTh5A.76 (2021)
- [12] N. Basic *et al.*, *Appl. Opt.* **62**(13), 3320 (2023)
- [13] A. Rabal, G. Ged, G. Obein, *Proc. 29th Quadrennial Session of CIE, CIE x046:2019, OP88* (2019)
- [14] C. Strothkämper, K.-O. Hauer, A. Höpe, *J. Opt. Soc. Am. A* **33**(1) (2016)
- [15] A. Ferrero *et al.*, *Metrologia* **57**, 065029 (2020)
- [16] P. Santafé-Gabarda *et al.*, *J. Opt.* **26**(3), 035601 (2024)
- [17] G. Ged, A. M. Rabal, M. Himbert, G. Obein, *Color Res. Appl.* **45**(6), 591(2020)
- [18] O. Gómez, E. Perales, E. Chorro, V. Viqueira, F. Martínez-Verdú, *Appl. Opt.* **55**, 6458 (2016)
- [19] D. Gigilashvili, J. B. Thomas, J. Hardeberg, M. Pedersen, *J. Vis.* **21**(8), 4 (2021)

2BLighting Technologies

High performance and reliable fiber optic assemblies



PM+

Ultra high Polarization Extinction Ratio (PER)

- Up to +4dB higher PER
- State-of-the-art insertion Loss (IL) and Return Loss (RL) values
- Best connector type and tolerance E-2000®, DMI, Mini AVIM® and Micro AVIM®
- Available on homologated fibres and cables



16W

NEW

E-2000® PS+

Contact expanded beam

- Low loss
- Interlock solution optional
- 1310-1550nm or 980-1060nm



100W

E-2000® PSm

Contact pump laser connector

- Low loss
- Interlock solution optional
- MM 105 0.22NA (MM 200 0.22NA optional)



www.2blighting.fr

info@2blighting.com

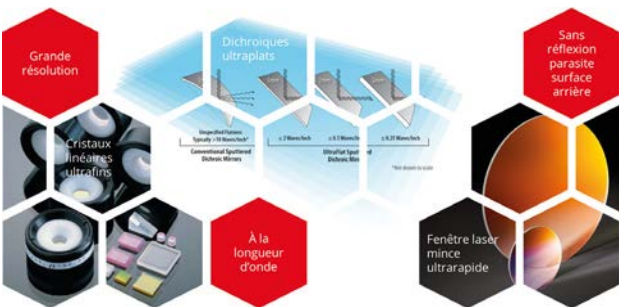
+33 1 64 59 21 30

MÉTROLOGIE OPTIQUE DE SURFACES PLANES MULTIPLÉS PAR LA TECHNOLOGIE SHACK HARTMANN

Rafael PORCAR*, Nicolas LEFAUDEUX, Xavier LEVECO

Imagine Optic SA, Orsay, France

*rporcar@imagine-optic.com



<https://doi.org/10.1051/photon/202613634>

L'analyseur de Shack Hartmann s'est imposé comme un outil de métrologie optique pour sa facilité d'utilisation, sa très grande dynamique de mesure, son caractère achromatique et sa versatilité. Une nouvelle implémentation a été proposée récemment pour caractériser de multiples surfaces d'un même échantillon tirant parti de sa capacité à mesurer une combinaison de plusieurs fronts d'onde sans que le signal brut acquis n'en soit compromis, ne générant pas d'interférences. Mieux encore, il s'accommode de sources à toutes longueurs d'onde, et a su évoluer pour augmenter drastiquement sa résolution !

La métrologie sans contact de pièces optiques est primordiale, que ce soit pendant le process de fabrication, pour l'optimiser, ou une fois la pièce terminée, pour valider sa qualité optique et ses spécifications. Le besoin concerne tant les fabricants que les intégrateurs et utilisateurs de ces composants. Parmi ceux-ci, les pièces à surfaces parallèles nécessitent un effort particulier de mise en œuvre de leur

contrôle, de par leur forme -comme les fenêtres, wafers, écrans de protection - ou leurs propriétés spectrales - cristaux, filtres, dichroïques, lames séparatrices et tout substrat ayant reçu un traitement antireflet ou réfléchissant-.

Le parallélisme des surfaces parallèles fait qu'il est en effet compliqué de séparer le signal provenant d'une surface et de l'autre, créant des artéfacts qui limitent la précision des solutions de métrologie. Par exemple, dans

le cas d'un interféromètre de type Fizeau, un motif d'interférences à 3 ondes se forme qui entrave la reconstruction des données. Les traitements appliqués -ou les matériaux utilisés- peuvent quant à eux rendre compliquée ou impossible la métrologie systématique à la longueur d'onde d'un laser HeNe. Par exemple, mesurer la forme d'une surface d'une optique laser avec un traitement réfléchissant à 800nm se complique lorsqu'elle est transparente à 632.8nm !

Des solutions plus ou moins pratiques et plus ou moins onéreuses ont bien été développées [1]. Ainsi, nombreux sont les lecteurs qui ont appliqué un revêtement -presque une potion secrète- à la surface arrière de leurs échantillons à tester pour éviter que la réflexion de la surface arrière ne vienne perturber leurs mesures. Néanmoins, cela signifie préparer la pièce donc la nettoyer par la suite, ce qui impacte fortement le temps du poste métrologie. De plus, le revêtement peut affecter la forme de la pièce et introduire une erreur de mesure, surtout si elle est fine, et représenter un risque de manipulation de la pièce. D'autres approches travaillent les propriétés de la source, comme sa longueur de cohérence, pour sélectionner les surfaces caractérisées. Elles représentent un réel surcout financier et de manipulation.

Imagine Optic, forte de son expertise en mesure de front d'onde par la technologie de Shack Hartmann a breveté une approche, dénommée POP, qui tire parti de la robustesse de ce principe de mesure. Elle permet de tester facilement et simplement des écrans et des fenêtres, des filtres et des filtres dichroïques ou des cristaux laser. Elle est compatible avec toutes les épaisseurs d'échantillons et s'adapte aux propriétés spectrales des traitements de surface pour qualifier les optiques que ce soit en transmission ou en réflexion.

Ces fonctionnalités sont rendues possibles par l'utilisation combinée de sources de lumière communes de faible longueur de cohérence, à n'importe quelle longueur d'onde et d'un capteur de front d'onde Shack Hartmann haute résolution.

EXPLOITATION DE MESURE DE PLUSIEURS FRONTS D'ONDE MOYENNÉS (COMBINÉS)

La méthode, qui s'applique à des échantillons optiques partiellement transparents à la longueur d'onde de test, est décrite pour un échantillon à faces planes et parallèles. Il est illuminé par un faisceau incident de faible cohérence temporelle, et les faisceaux réfléchis par chacune des faces de l'échantillon, ainsi que le faisceau transmis, sont dirigés vers un analyseur de front d'onde de Shack Hartmann au moyen d'un système optique qui adapte le diamètre de la pupille d'analyse (figure 1 gauche).

Le principe de la méthode est simple : la réalisation de deux mesures (M1 et M2) liant deux inconnues à déterminer -a la déformation de la surface A de l'échantillon et β la déformation de la deuxième

surface B- permet leur détermination par la résolution d'un système d'équations linéaires. L'analyseur de Shack Hartmann est dans ce cas un outil qui s'adapte parfaitement à cette approche car il peut mesurer la combinaison de plusieurs contributions sans qu'elles interfèrent destructivement entre elles, en utilisant une source à faible cohérence temporelle. Chacune des contributions doit simplement être pondérée de son intensité relative.

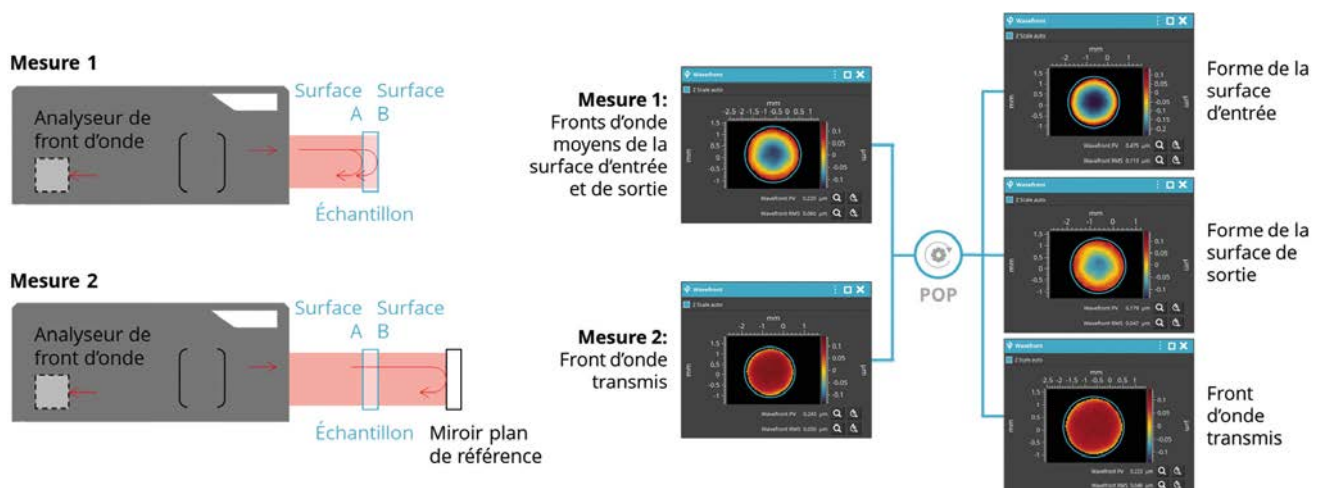
La méthode consiste donc à réaliser tout d'abord la mesure (M1) du front d'onde moyen correspondant à la déformation produite en réflexion par les deux surfaces A et B de l'échantillon :

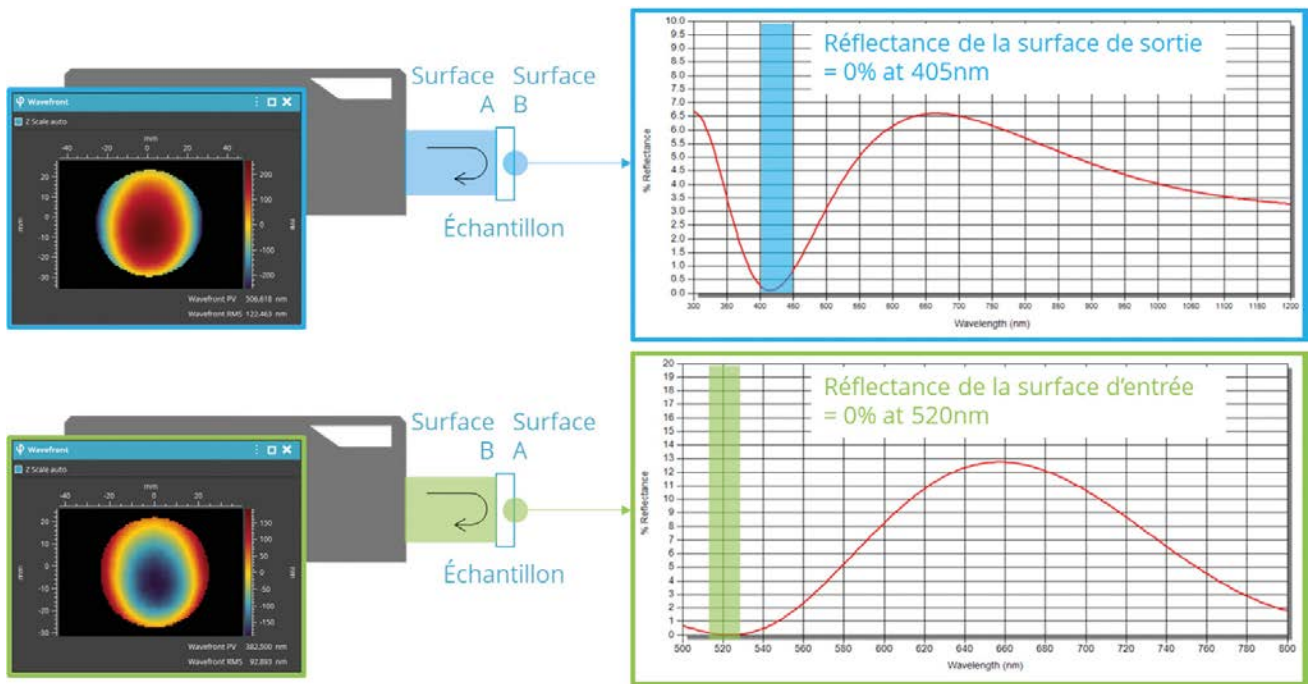
$$M_1 = \frac{[2\alpha(R_A + R'_B) - 2R'_B n(\alpha - \beta)]}{R_A + R'_B}$$

avec n l'indice de réfraction de l'échantillon. Chaque contribution est pondérée par les coefficients R_A pour la surface A et $R'_B = R_B(1 - R_A)^2 T^2$ pour la face B, avec R_A et R_B la réflectivité des faces A et B respectivement et T la transmission de l'échantillon.

Ensuite, la méthode propose l'acquisition du front d'onde correspondant à la déformation produite ●●●

Figure 1. Gauche : protocole de mesure de la méthode POP. L'échantillon à caractériser est placé et aligné une fois en face d'un système optique composé d'un éclairage et d'un analyseur de front d'onde fonctionnant en double passage. Droite : les algorithmes POP calculent les formes des surfaces de l'échantillon à partir des mesures de front d'onde moyens, et en bonus, la qualité de front d'onde transmis.





en transmission par les deux surfaces de l'échantillon (M2) :

$$M2 = (n - 1)(\alpha - \beta)$$

Les défauts de forme de surface peuvent alors se déduire des deux mesures réalisées (figure 1 droite) :

$$\alpha = \frac{M_1}{2} - \left(\frac{nR'_B M_2}{2(n-1)(R'_A + R'_B)} \right)$$

$$\beta = \alpha + \left(\frac{M_2}{2(n-1)} \right)$$

La méthode présente plusieurs avantages :

Il n'est pas nécessaire de manipuler et retourner l'échantillon pour accéder aux propriétés de chacune des surfaces, comme le nécessite une mesure optique en réflexion classique, ou une mesure par contact. Il n'est pas non plus nécessaire de préparer l'échantillon, ce qui minimise l'impact de la métrologie dans

Figure 2. Mesure de la forme des surfaces en réflexion, en s'assurant de ne pas avoir de réflexion parasite provenant de la surface arrière de l'échantillon grâce à la sélection appropriée de la longueur d'onde de test : en haut, mesure à 405 nm, en bas, mesure à 520 nm.

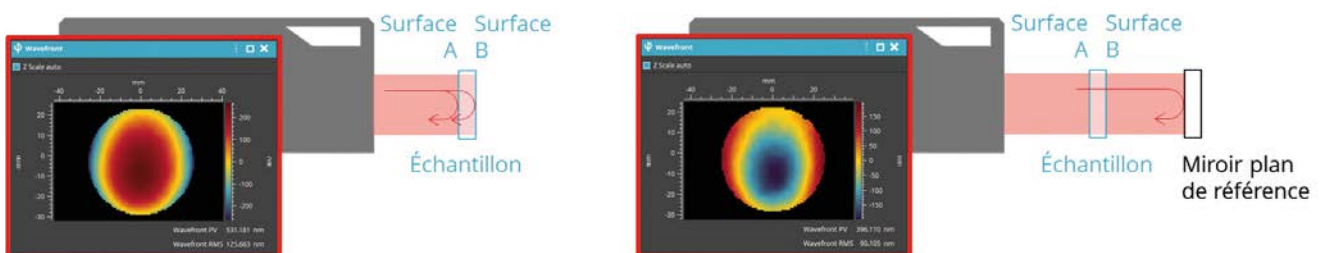
le processus de fabrication ou de contrôle de qualité final, avec un cycle de test complet en moins de 1 minute.

La technique fonctionne à n'importe quelle longueur d'onde : elle s'adapte ainsi parfaitement aux contraintes spectrales imposées par les designs et les pièces à contrôler, de par les propriétés des matériaux ou leur revêtement optique : les pièces peuvent alors être qualifiées aussi après traitement, répondant aux exigences croissantes des applications optiques.

La technique est compatible avec des échantillons extrêmement fins – quelques dizaines de microns – grâce à l'utilisation de sources à faible longueur de cohérence, de type SLED par exemple, très accessibles, économiques et durables. La maintenance périodique de la source utilisée pour la métrologie n'est plus un poste récurrent et onéreux comme dans le cas des solutions basées sur l'interférométrie et des lasers très stables.

La méthode hérite aussi des avantages de la technologie Shack

Figure 3. Mesure de la forme des surfaces en réflexion par la méthode POP.



LA TECHNOLOGIE DE SHACK HARTMANN ET SES AVANTAGES

Un analyseur de Shack Hartmann est un appareil de métrologie compact composé d'une caméra devant laquelle est montée une matrice de microlentille permettant d'échantillonner un faisceau incident. Les caractéristiques de la technologie sont :

TEMPS RÉEL : mesure dynamique de tous les paramètres

ROBUSTESSE : Insensible aux vibrations et aux turbulences atmosphériques

PRÉCISION : Précision standard de $\lambda/100$ RMS

ACHROMATISME : Achromaticité sur toute la gamme spectrale de sensibilité du capteur

FACILITÉ D'UTILISATION : Mesure absolue grâce à l'étalonnage usine

Hartmann, et est robuste aux vibrations. Cela facilite son implémentation dans des environnements habituellement contraignants, au plus proche de la ligne de production, évitant d'avoir à déplacer les échantillons vers le laboratoire de métrologie avec les contraintes que cela implique : impact sur le rendement, risque pour les pièces optiques (fragiles, ou requérant de nombreuses itérations de fabrication) ou inconvenients de manipulation (pièces encombrantes, extrêmement lourdes, etc.)

Enfin, la technique est compatible avec des mesures sur de multiples régions d'intérêt simultanées, ce qui permet de contrôler des assemblages : fagots de cristaux, pièces cimentées sur une même cale par exemple avec la même cadence.

DÉMONSTRATIONS ET RÉSULTATS DE MESURES

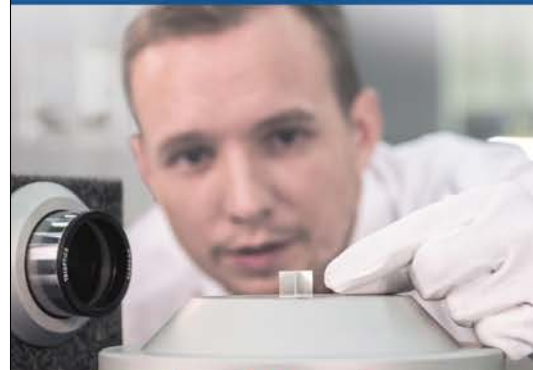
Pour démontrer la justesse de la mesure de surface de forme d'échantillon optique par la méthode POP, un calibre de 40mm de diamètre et 10mm d'épaisseur dont les deux faces ont été traitées a été utilisé. Les caractéristiques de réflectance de chacune des faces sont visibles dans la figure 2. Pour la mesure de front d'onde, l'instrument MESOL [2], équipé avec 4 sources aux longueurs d'onde 405nm, 520nm, 635nm et 850nm a été choisi et, parmi les 5 zooms optiques motorisés qu'il intègre,

réglé sur le diamètre de faisceau de test 2 pouces (50mm).

Pour la mesure de la première surface (A), le calibre est placé en face de l'instrument, aligné *via* l'interface utilisateur et mesuré à 405 nm. Comme la surface de sortie (B) est traitée avec un revêtement antireflet à 405nm, il n'y a pas de signal parasite non désiré généré par la surface B de l'échantillon qui viendrait perturber la mesure. Pour la mesure de la seconde surface (B), le calibre est retourné, réaligné et mesuré à 520 nm. Comme la surface de sortie de cette configuration (A) est, elle, traitée avec un revêtement antireflet à 520 nm, on s'assure à nouveau qu'il n'y a pas de signal parasite non désiré qui viendrait perturber la mesure. Ces deux mesures, faites de manière classique en réflexion, donnent une référence d'erreur de front d'onde à laquelle comparer la mesure.

Le même calibre est maintenant mesuré *via* la méthode POP. Pour cela, le calibre est placé en face de l'instrument et aligné une seule fois : il ne sera pas nécessaire de le retourner pour effectuer les deux mesures présentées dans la section précédente: la première correspondant aux fronts d'ondes combinés des deux surfaces en réflexion, la deuxième correspondant à la mesure en transmission de l'échantillon en double passage. Les algorithmes développés retournent ensuite les ●●●

Métrologie des systèmes photoniques



Mesure de la plupart des paramètres d'un système optique

Systèmes imageurs, Lidars, Lasers, Objectifs, AR-VR

Tests en R&D et contrôle en production



Optimisation des alignements CamTest

Station de mesure de la FTM ImageMaster HR2



Optimisation du centrage

Station de Centrage OptiCentric 101

TRIOPTICS France

76 rue d'Alsace | 69100 Villeurbanne
Tel. +33 (0)4 72 44 02 03
www.trioptics.fr

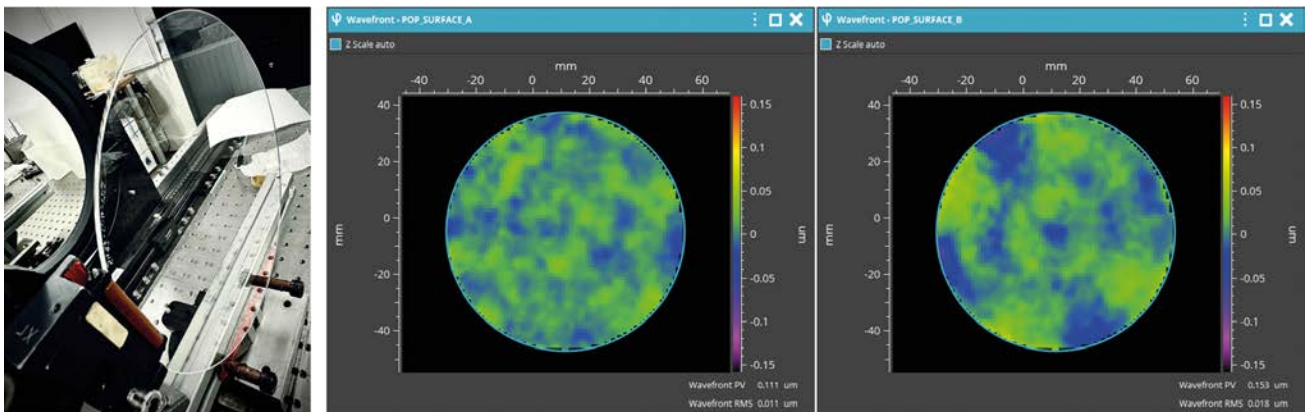


Figure 4. Substrat plan caractérisé par la méthode POP (gauche) et les formes de surface mesurées (droite) visualisées hors courbure (sphère) pour sélectionner celle qui sera traitée avec un revêtement réfléchissant.

deux cartes d'erreur de front d'onde des deux formes de surface. Il est alors possible de les comparer aux mesures précédentes obtenues en réflexion.

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 1.

On constate que les mesures de forme de surface mesurées sont parfaitement cohérentes : la surface A et la surface B présentent les mêmes erreurs de front d'onde RMS quelle que soit la méthode de test utilisée, à l'erreur près de l'instrument utilisé ($\lambda/100$ RMS).

Résultats annexes : on peut aussi constater que la justesse de mesure est assurée alors que les différentes mesures ont été réalisées à 3 longueurs d'onde différentes, ce qui montre aussi l'achromaticité de l'analyseur de Shack Hartmann. Les cartes de forme de surface visibles dans les figures 2 ou 3 montrent aussi que l'échantillon n'est pas parfaitement plan. La surface A est légèrement convexe, et la B légèrement concave.

La méthode POP peut aussi être appliquée à des échantillons avant traitement, comme par exemple des substrats minces (2 mm) de grand diamètre (200mm) visibles en figure 4, afin de sélectionner la surface de meilleure qualité. Cette surface est celle qui sera traitée avec un revêtement réfléchissant pour laser de haute intensité : la « SURFACE_A » dans le cas présenté. La méthode permet de minimiser les manipulations de l'échantillon qui est délicat, et

d'optimiser la qualité optique des miroirs produits.

CONCLUSION

La méthode POP démontre qu'une exploitation innovante de la technologie Shack-Hartmann permet de répondre efficacement aux défis de la métrologie des optiques à surfaces parallèles. En mesurant des fronts d'onde combinés sans interférences à l'aide de sources à faible cohérence, elle autorise la reconstruction simultanée des formes des deux surfaces d'un même échantillon, sans préparation ni retournement, et à toute longueur d'onde.

Les résultats expérimentaux montrent une excellente cohérence

avec des mesures de référence en réflexion, confirmant la justesse et l'achromaticité de l'approche.

Au-delà de la performance métrologique, la méthode développée se distingue par sa rapidité, sa robustesse environnementale et sa compatibilité avec des contextes industriels contraignants. Les perspectives de développement concernent l'extension à des composants de grand diamètre, et la déclinaison de la méthode pour déterminer la variation d'indice de l'échantillon. POP se positionne comme une évolution prometteuse de la métrologie photonique, adaptée aux exigences croissantes de la fabrication optique moderne. ●

Tableau 1. Résultats obtenus.

	MESURE CLASSIQUE EN RÉFLEXION	MESURE NOUVELLE MÉTHODE POP
Surface A	122,5 nm RMS	125,7 nm RMS
Surface B	92,9 nm RMS	90,1 nm RMS

RÉFÉRENCES

- [1] Craig R. Forest, Claude R. Canizares, Daniel R. Neal, Michael McGuirk, and Mark Lee Schattenburg, *Optical Engineering* **43(3)**, (2004). <https://doi.org/10.1117/1.1645256>
- [2] MESO, spécifications techniques. <https://www.imagine-optic.com/products/meso-metrology-system/>

MICROSCOPE OPTIQUE À RÉOLUTION NANOMÉTRIQUE POUR LA TEXTURATION DE SURFACE PAR LASER DE MATÉRIAUX DE GRANDES DIMENSIONS

Guillaume MACHINET^{1,*}, Alberto AGUILAR², Pierre BON^{2,3}, Aurélien SIKORA¹,
Girolamo MINCUZZI¹, Laura GEMINI¹, Marc FAUCON¹

¹ALPhANOV, Institut Optique d'Aquitaine, Talence, France

²Iotamatrix, Ester Technopole, France

³XLIM, Université de Limoges, France

*guillaume.machinet@alphanov.com



La texturation de surface par laser à impulsions ultrabrèves révolutionne la fonctionnalisation de surfaces des matériaux métalliques, composites ou transparents sans produit chimique, offrant une alternative plus durable aux traitements traditionnels. Pour industrialiser ces procédés permettant d'améliorer les propriétés des surfaces sur de grandes pièces, une métrologie optique ultra-haute résolution en temps réel est cruciale : elle permet de contrôler la géométrie des micro et nanostructures (rugosité, périodicité) et d'ajuster dynamiquement les paramètres laser (fluence, vitesse).

<https://doi.org/10.1051/phonon/202613639>

Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

LA TEXTURATION DE SURFACE PAR LASER FEMTOSECONDE, UNE ALTERNATIVE À L'USAGE DE PRODUITS CHIMIQUES SUR LES MATÉRIAUX DE GRANDES DIMENSIONS

La texturation de surface par laser ultracourt est une technique qui utilise

des impulsions laser ultrabrèves dont la durée est inférieure à la dizaine de picoseconde pour modifier la structure des surfaces des matériaux à traiter sans utiliser de produit chimique. Elle réduit ainsi considérablement les risques environnementaux, tout en répondant aux objectifs

de développement durable, et offre une grande diversité d'applications.

Grâce à l'augmentation significative de la puissance des lasers à impulsions ultracourtes au cours des dix dernières années, ceux-ci ont suscité un vif intérêt comme outil de texturation de surface. ●●●

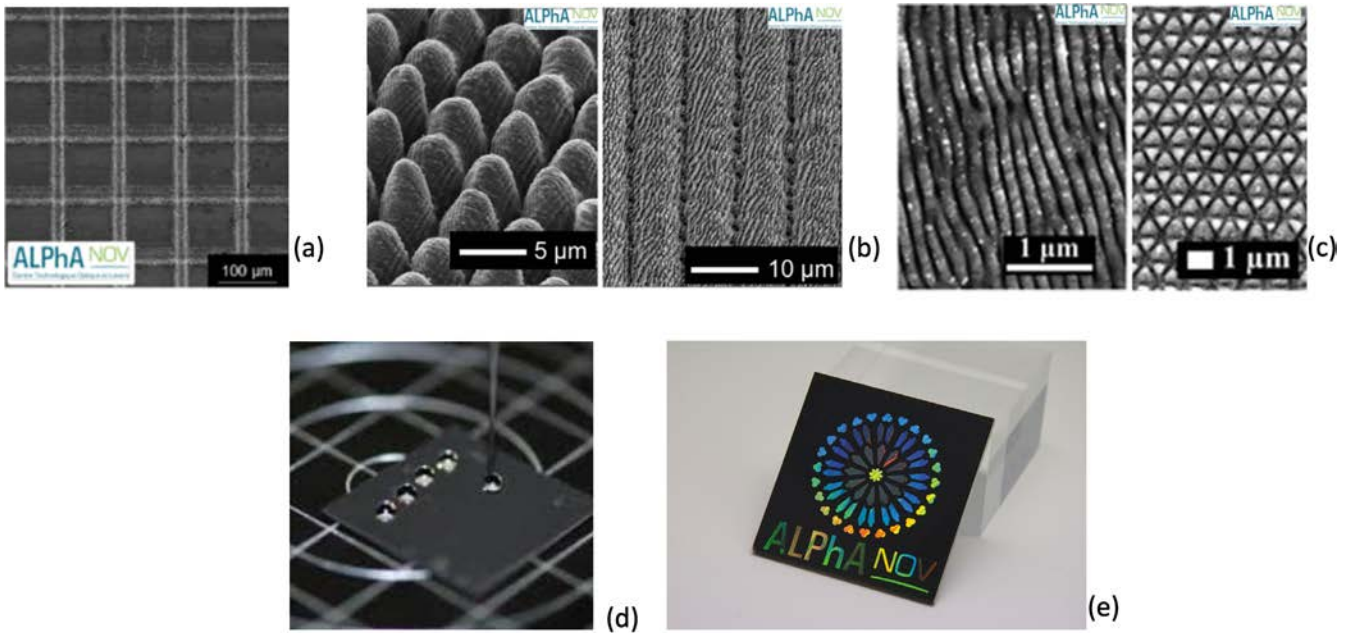


Figure 1. En haut, les différentes techniques de texturations de surface par laser femtoseconde. De gauche à droite : la gravure directe pour des résolutions supérieures à la dizaine de microns (a), le DLIP pour des échelles de l'ordre de quelques µm (b) et le LIPSS avec des résolutions dans la centaine de nanomètres (c). En bas, exemple de cas applicatifs de surfaces texturées par laser : surface hydrophobe (d), coloration structurelle d'une surface métallique (e).

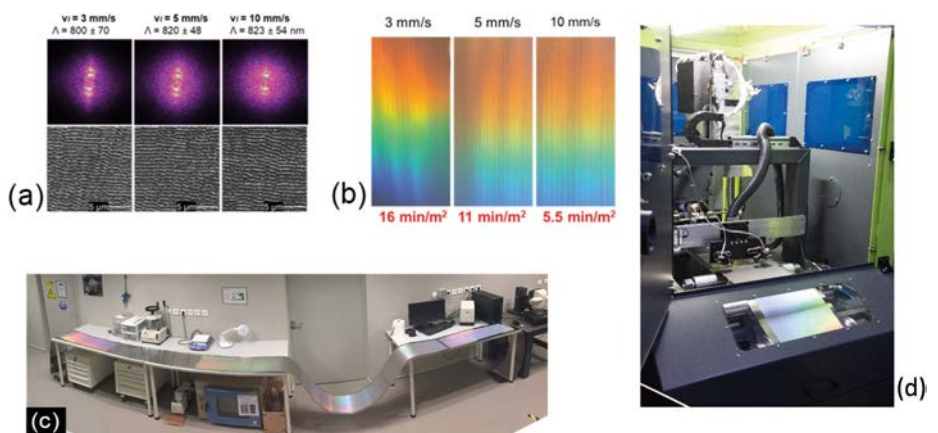
Cette technique permet de réaliser des structures dont la taille varie de quelques centaines de nanomètres à quelques centaines de microns, et ce, sur de grandes surfaces et avec un débit adapté aux besoins industriels (Figure 1). Comme abordé lors d'une précédente édition (Numéro 87, Juillet-Août 2017 <https://doi.org/10.1051/photon/20178744>), diverses fonctionnalisations de surface clés ont été démontrées, la propriété spécifique étant souvent associée à la génération d'une morphologie de surface particulière inspirée bien souvent de la nature (biomimétisme) [1-2] :

- La **peau de requin**, reproduite par des micro-rainures alignées (50 à 200 µm de large), est utilisée pour sa capacité à réduire l'adhésion des biofilms. Cette structure limite également les forces de frottement et son déploiement sur des ailes d'avions permettrait de réduire la traînée hydrodynamique et ainsi la consommation en kérozène jusqu'à 2-3 % [3].
- La **feuille de lotus**, caractérisée par des nanostructures hiérarchiques (piliers de 5 à 10 µm recouverts de rugosités de taille nanométrique), confère aux surfaces une super-hydrophobie extrême (angles de

contact supérieurs à 150°) et un effet auto-nettoyant. Ces propriétés sont exploitées dans les revêtements de panneaux solaires, les textiles techniques ou les surfaces extérieures pour éviter l'accumulation de saletés ou d'eau.

- Les **pattes de gecko**, imitées par des micro-piliers flexibles (100 nm à 2 µm de diamètre), offrent une adhésion réversible sans colle. Ce principe est utilisé en robotique pour des systèmes de préhension ou dans le développement d'adhésifs

Figure 2. Réalisation d'une surface antibactérienne sur plusieurs mètres de longueur en procédé "Roll-to-roll" dans le cadre du projet Newskin [2]. (a) : Surface LIPSS réalisée en imagerie MEB. (b) Visualisation en imagerie optique conventionnelle grand champ. (c) : Echantillon d'inox de 15m de longueur texturée par laser avec un temps de 15mn/m² (d) Plateforme Roll-to-roll à ALPhANOV.



secs réutilisables, combinant résistance et propreté.

- Les **ailes de papillon**, avec leurs nanostructures périodiques (200–300 nm), inspirent des surfaces aux couleurs structurelles (sans pigment). Ces motifs sont particulièrement utiles dans les capteurs optiques ou les dispositifs esthétiques où la durabilité des couleurs et la résistance à l'humidité sont critiques.

En fonction de la dimension des motifs recherchés et de la vitesse du procédé associé, différentes techniques de texturation laser ont été développées au cours des dernières décennies :

- La première technique est le Direct Laser Writing (DLW). Les structures sont générées par ablation de matière et leur taille est limitée par la taille du spot laser minimale atteignable sur le matériau, soit quelques microns. Le motif réalisé quant à lui est plutôt à l'échelle de la centaine de microns (Figure 1.a et Figure 1.d).
- Dans le cas d'une structuration de la matière avec un motif répété à l'échelle de quelques dizaines de microns, on utilise le Direct Laser Interference Patterning (DLIP), qui est une technique de texturation de surface qui exploite l'interférence de plusieurs faisceaux laser pour

créer des motifs périodiques. Cette méthode permet de structurer rapidement de grandes surfaces avec une précision et une répétabilité élevées, en ajustant l'angle et la longueur d'onde des faisceaux pour contrôler la périodicité des motifs (Figure 1.b).

- Enfin pour des dimensions entre petites à l'échelle de la centaine de nanomètres, la technique Laser-Induced Periodic Surface Structures (LIPSS) est privilégiée. Des nanostructures périodiques (ondulations ou stries) se forment spontanément sur un matériau sous irradiation laser (généralement femtoseconde ou picoseconde) à des fluences proches du seuil d'ablation. Ces ondulations résultent principalement d'un auto-arrangement du matériau suite à l'interaction des polaritons de plasmons de surface avec les impulsions laser (Figure 1.c et Figure 1.e).

Historiquement, les procédés de texturation de surface par laser ultracourt se limitaient à des objets ayant des dimensions de quelques centimètres carrés. Cette restriction était principalement due aux contraintes inhérentes aux systèmes optique utilisés :

- Le champ optique limité des scanners,

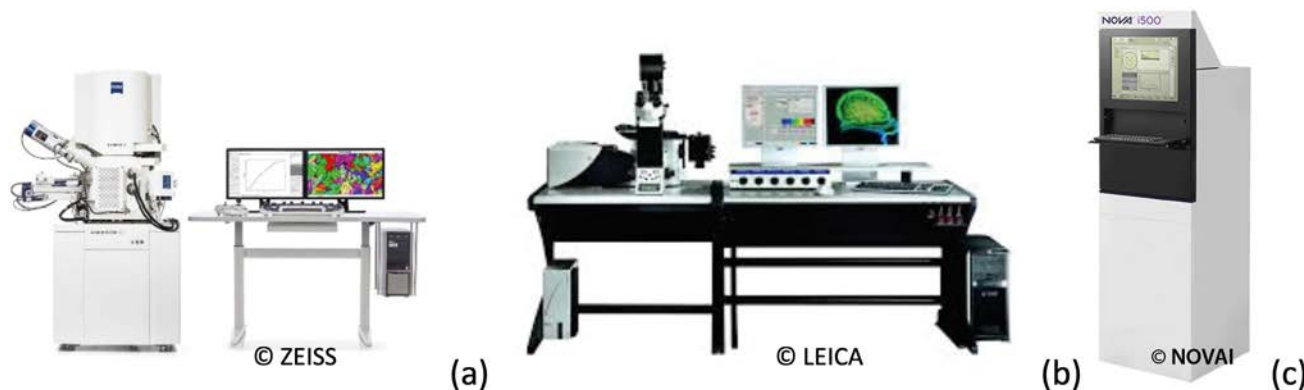
- La puissance moyenne des lasers à impulsions brèves < 10 W,
- La difficulté de synchroniser de manière précise le laser, le scanner et les platines de translation, afin d'assurer un traitement sans chevauchement et à haut débit (procédé laser plus communément appelé *Infinite Field Of View* ou IFoV).

Ces limitations posent un défi majeur pour l'industrialisation de ces procédés, notamment pour des applications nécessitant le traitement de surfaces de grandes dimensions. En effet, des secteurs tels que l'aéronautique, l'automobile ou l'énergie exigent des solutions capables de couvrir des surfaces de plusieurs mètres carrés, tout en garantissant une homogénéité et une reproductibilité des propriétés fonctionnelles.

Les progrès technologiques récents, illustrés par les travaux menés par ALPhANOV dans le cadre du projet européen *Newskin* [2], ont permis de surmonter ces obstacles (Figure 2). Cependant, cette avancée s'accompagne d'un besoin accru de caractérisation fine des matériaux traités, afin de :

- Valider l'homogénéité des motifs sur l'ensemble de la surface,
- Garantir les propriétés fonctionnelles (super-hydrophobie, réduction de la réflexion lumineuse, activité antimicrobienne, etc.) à l'échelle industrielle,
- Optimiser les paramètres de traitement pour assurer la reproductibilité et la fiabilité des procédés.

Figure 3. Figure 3 : Equipement usuel pour la métrologie optique des surfaces texturées par laser femtosecondes : (a) : Exemple MEB commercialisé par ZEISS, Microscope confocal de la société LEICA (b) et Scatterométrie optique développée par NOVAI (c).



TECHNOLOGIE	RÉSOLUTION LATÉRALE	RÉSOLUTION AXIALE	PRÉPARATION DE SURFACE / TYPE ÉCHANTILLON	VITESSE DE BALAYAGE	NATURE DE LA MESURE
MEB	0,5-5 nm	<0,1 nm	Lourde (vide, métallisation)	Quelques minutes	Directe (Électronique)
Scatterométrie	< 1 nm	<0,1 nm	Aucune mais limité à des structures périodiques	Élevée (> 1 kHz)	Indirecte (Diffusion et diffraction + analyse base de données)
OCT	1-2 μm	1-10 μm	Aucune	Élevée (> 1 kHz)	Directe (Interférométrie)
ix01 : CRM à réallocation de photons	~ 100 nm	~10 nm	Aucune	Élevée (> 1 kHz)	Directe (Optique, sans préparation)

Ainsi, le développement de méthodes de caractérisation adaptées aux grandes surfaces devient un enjeu clé pour l'industrialisation de ces technologies. Ces méthodes doivent permettre une analyse rapide, non destructive et précise, afin de répondre aux exigences des applications industrielles.

LA MÉTROLOGIE OPTIQUE, UNE NÉCESSITE POUR QUALIFIER LA FONCTIONNALISATION RÉALISÉE

Pour répondre aux défis de la caractérisation des surfaces texturées à grande échelle, différentes techniques de métrologie optique ont été

explorées, chacune présentant des compromis spécifiques en termes de résolution, champ de visualisation, vitesse et intégration dans les lignes de production (Figure 3).

La Microscopie Électronique à Balayage (MEB) demeure la référence absolue en termes de résolution latérale, capable d'atteindre l'échelle sub-nanométrique. Toutefois, ses contraintes intrinsèques — nécessité d'un vide poussé, préparation destructive des échantillons non-conducteurs et temps d'acquisition élevés pour de grands champs de vision — limitent son intégration dans les flux de production à haute cadence.

La Tomographie par Cohérence Optique (OCT) et l'imagerie confocale offrent des capacités remarquables d'analyse tridimensionnelle. Bien qu'elle soit extrêmement performante pour la métrologie axiale (profondeur), sa résolution latérale reste gouvernée par la limite de diffraction optique ~ 400 nm, ce qui la rend inadaptée à la caractérisation de motifs LIPSS précédemment décrits dont la taille et la périodicité des structures sont de quelques centaines de nm.

Pour aller au-delà de la limite de diffraction optique, la **scatterométrie (ou Optical Critical Dimension - OCD)** [4] s'est imposée comme un standard pour l'industrie de la micro-électronique et des semi-conducteurs. Contrairement à l'imagerie directe, la scatterométrie repose sur l'analyse (intensité et angle) de la lumière diffusée réfléchi par une surface structurée (réseau périodique). Si elle offre une précision sub-nanométrique et une vitesse exceptionnelle, elle reste une méthode indirecte : elle nécessite une modélisation mathématique complexe (bibliothèques de modèles) et est strictement limitée à des structures répétitives connues a priori. Si cette technique d'imagerie est couramment utilisée dans le contrôle qualité des wafers du semi-conducteur, il n'existe que très peu d'équipements facilement intégrables pour les applications de procédés laser. De plus, l'usage de cet équipement ne serait facilement intégrable que pour des surfaces planes et non pour des texturations de surfaces sur des objets 3D.

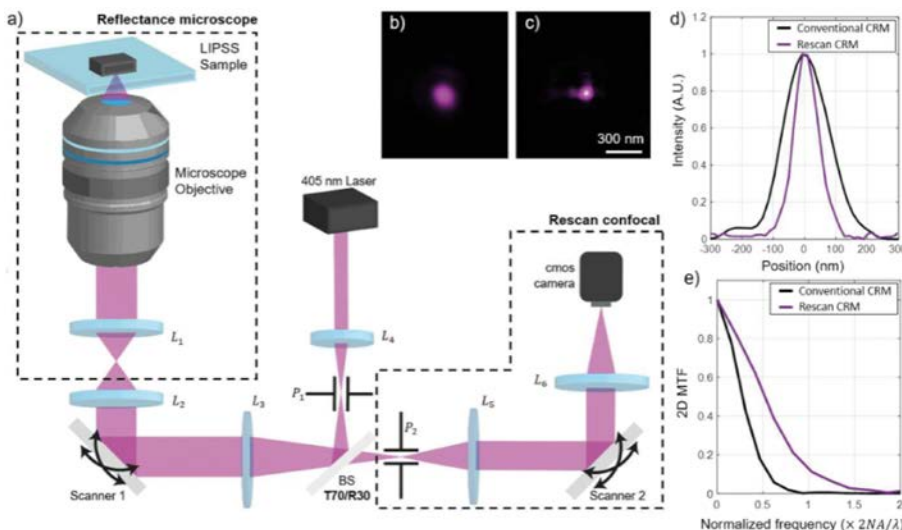


Figure 4. Schéma de principe de la technologie développée par lotamatrix sur microscopie confocale par réflectance (CRM) et à réallocation de photons [6]. (a) Dispositif expérimental et concept pour obtenir une super-résolution confocale sans marquage. (b) PSF (Point Spread Function) du dispositif de métrologie en version microscopie confocal en réflexion. (c) PSF du dispositif de métrologie en version microscopie confocal en réflexion avec réallocation des photons. (d) Distribution normalisée de la PSF dans les configurations b) et c). (e) Fonction de transfert de modulation du dispositif optique.

Pour combler l'écart entre la flexibilité de l'optique et la résolution de l'électronique, les travaux de Pierre Bon (CNRS/XLIM) et José Alberto Aguilar Mora, tous deux fondateurs de la société IOTAMETRIX, ont développé une approche basée sur la réallocation de photons [4]. Cette méthode, dérivée de l'Image Scanning Microscopy (ISM), est optimisée pour fonctionner sans marquage et peut s'intégrer directement dans des lignes de production. Sa rapidité d'acquisition d'images la rend parfaitement adaptée aux procédés d'usinage laser compatible afin de vérifier la qualité des structures mais également comme outil de surveillance des dérives et d'optimisation du procédé pour une industrie 4.0.

IMAGERIE OPTIQUE NANOMÉTRIQUE À RÉALLOCATION DE PHOTONS.

L'imagerie optique à haute-résolution (au-delà des limites de diffraction) a connu des avancées majeures ces dernières années, notamment dans le domaine de la biophotonique, où des techniques comme la microscopie STED (Stimulated Emission Depletion), la PALM (Photoactivated Localization Microscopy) ou la STORM (Stochastic Optical Reconstruction Microscopy) ont permis d'atteindre des résolutions nanométriques. Ces méthodes reposent cependant sur l'utilisation de marqueurs fluorescents, nécessitant une modification chimique des échantillons et des étapes de post-traitement complexes. Dans le cadre de la caractérisation de

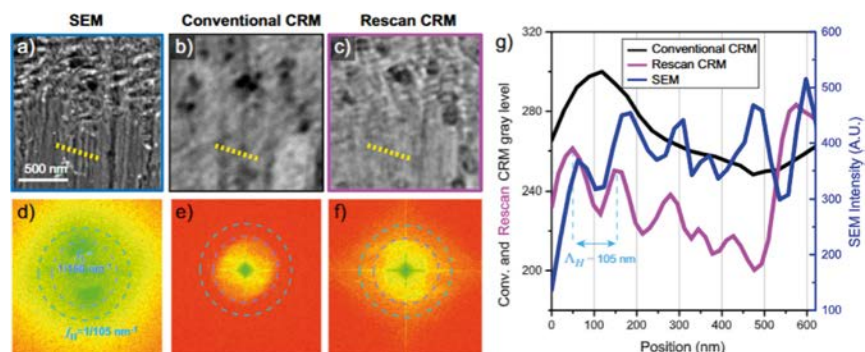
surfaces texturées par laser, une telle approche est inenvisageable, car elle altérerait les propriétés intrinsèques des matériaux traités. Il est donc impératif de développer des techniques d'imagerie sans marquage, capables de concilier :

- Une résolution spatiale latéral ~100 nm,
- Une vitesse d'acquisition élevée > kHz,
- Et une mise en œuvre simplifiée, compatible avec un environnement industriel.

Historiquement, les compromis technologiques ont segmenté le paysage de la métrologie optique : soit la résolution est sacrifiée au profit de la rapidité et de la flexibilité, soit la complexité opérationnelle limite l'intégrabilité en ligne.

Pour surmonter ces limitations, une approche prometteuse consiste à exploiter la réallocation de photons (Figure 4). Au lieu de simplement enregistrer l'intensité lumineuse détectée comme sur un microscope confocal standard, le système utilise une étape supplémentaire de « re-scan » : la lumière collectée est projetée sur un détecteur 2D (comme une caméra CCD), et chaque photon est réattribué spatialement en fonction de sa position de détection dans le plan du trou de filtrage spatial. Cette réallocation permet d'affiner la localisation des structures et d'améliorer la résolution latérale au-delà de la limite de diffraction. Ainsi dans le cas d'une source laser émettant à 405 nm, le système atteint typiquement une résolution latérale inférieure à 90 nm selon la configuration optique. Le dispositif est compatible avec des cadences de balayage élevées (jusqu'à 24 kHz en ●●●

Figure 5. Différence entre le standard MEB pour la caractérisation d'une texturation LIPSS, la microscopie confocale en réflectance et la technique avec réallocations des photons [6].



Modular wavefront sensing for optics testing



Wavefront and MTF for any optical system



Plug'n'play modules for every setup



Compact solutions from UV to LWIR



Figure 6. Dispositif d'imagerie à réallocation de photons ix01 développé par Iotametrix en collaboration avec ALPhANOV dans le cadre d'un projet de maturation soutenu par XLIM, Université de Limoges, l'incubateur AVRUL.

configuration laboratoire) [5], ce qui le rend utilisable pour un contrôle en temps réel et *in situ*, par exemple lors de la texturation laser de surfaces comparativement aux autres techniques décrites précédemment (Tableau 1).

Après avoir pu valider l'intérêt industriel de la technologie sur différentes texturations de surface de type LIPSS (Figure 5) et avoir comparé les obtenues par rapport à l'imagerie conventionnelle MEB, ALPhANOV et l'ensemble de l'équipe Iotametrix, à travers une phase de co-maturation ont réalisé le premier démonstrateur ix01, totalement intégrable dans un environnement industriel (Figure 6).

VERS UNE NANOFABRICATION PAR LASER INTELLIGENTE

De nombreux travaux ont émergés ces dernières années sur l'utilisation de l'intelligence artificielle

pour optimiser et prédire les paramètres d'ablation laser, transformant ainsi la texturation de surface en un procédé plus précis et plus agile. Cependant, ces approches nécessitent des bases de données

structurées et riches, idéalement alimentées par des images haute résolution ou des données analytiques issues d'équipements intégrables en ligne, sans perturber les cadences industrielles [7]. Dans ce contexte, les avancées en métrologie optique haute résolution, comme celles développées par IotaMetrix, se révèlent être un levier clé : elles permettent non seulement une caractérisation fine et en temps réel des nanostructures, mais aussi une intégration facilitée dans les lignes de production, répondant ainsi aux exigences de l'industrie 4.0.

Au-delà d'une simple caractérisation intrinsèque, cette synergie entre imagerie optique ultraprécise et l'intelligence artificielle prédictive ouvre la voie à une nanofabrication intelligente. En combinant des données optiques fiables avec des algorithmes d'apprentissage, il devient possible d'envisager une personnalisation massive des surfaces fonctionnelles (hydrophobes, antibactériennes, optiques, etc.), tout en réduisant significativement les rebuts grâce à un contrôle qualité auto-adaptatif.

À terme, cette convergence technologique pourrait démocratiser l'accès à des surfaces sur mesure, tout en renforçant la compétitivité des filières industrielles dans des secteurs stratégiques comme l'aéronautique, le biomédical ou l'énergie. ●

RÉFÉRENCES

- [1] F. Fraggelakis, G. Mincuzzi, J. Lopez, I. Manek-Hönniger, R. Kling, *Appl. Surf. Sci.* **470** (2018)
- [2] A. Sikora, M. Faucon, L. Gemini, R. Kling, G. Mincuzzi, *Appl. Surf. Sci.* **591**, 153230 (2022)
- [3] Nikon Global Product Database, Riblet surface technology overview, available at <https://ngpd.nikon.com/en/riblet/overview/>
- [4] M. Madsen, P.-E. Hansen, *Surf. Topogr.: Metrol. Prop.* **4**, 023003 (2016)
- [5] D. Ta, A. Aguilar, P. Bon, *Opt. Express* **31**, 36420 (2023)
- [6] J. Aguilar Mora, A. Abou Khalil, D. Pallarés Aldeiturriaga, X. Sedao, C. Mauclair, P. Bon, *Sci. Rep.* **13** (2023)
- [7] E. Mottay, W. M. Barkat, E. Barjou, A. Bertrand, G. Mincuzzi, "Machine learning assisted optimization of surface roughness on silicon," *Proc. SPIE PC13351, Laser-based Micro- and Nanoprocessing XIX*, PC1335111 (2025).

À LANNION, LE BTS PHOTONIQUE AU CŒUR D'UN ÉCOSYSTÈME PHOTONIQUE EN PLEIN ESSOR !

David LE ROY¹, Gaël DESCAT¹, David MECHIN², Lionel HEMON³

¹ Campus des métiers, Bretagne, France

² Photonics Bretagne, Lannion, France

³ Lycée Félix Le Dantec, Lannion, France

*david.le-roy@ac-rennes.fr



© Lionel_Baillon

Au cœur d'un territoire marqué par une longue tradition d'innovation, Lannion s'impose comme un pôle majeur de la photonique française. Le BTS Photonique du lycée Félix Le Dantec y forme des techniciens très recherchés par les entreprises d'un secteur en plein essor.

<https://doi.org/10.1051/photon/202613645>

LA LUMIÈRE, MOTEUR DES TECHNOLOGIES DU XXI^e SIÈCLE

La photonique, sciences et technologies de la lumière, est devenue un moteur essentiel de l'innovation. Des réseaux internet très haut débit aux lasers médicaux, des capteurs industriels aux systèmes d'imagerie utilisés dans le spatial ou la défense, elle façonne notre quotidien et ouvre la voie aux technologies de demain.

Portée par une croissance soutenue, la filière française doit néanmoins relever un défi majeur : le manque de techniciens qualifiés, capables de concevoir, régler et maintenir des systèmes optiques de plus en plus complexes. Les entreprises, nombreuses en Bretagne, peinent à recruter les compétences nécessaires pour innover et rester compétitives.

Dans ce contexte, la formation devient un enjeu stratégique. Parmi les parcours structurants, le BTS Photonique occupe

une place centrale : en deux ans, il forme des techniciens polyvalents, rigoureux et immédiatement opérationnels.

Des établissements pionniers, comme le lycée Félix Le Dantec à Lannion, ont ouvert la voie à cette spécialité, rapidement rejoints par d'autres lycées et centres de formation en France. Aujourd'hui, Lannion s'impose comme un site emblématique, portée par une histoire singulière qui en a fait l'un des berceaux français des télécommunications et de la photonique.

UNE FILIÈRE SOUS TENSION : CE QUE DISENT LES INDUSTRIELS

Sur le terrain, les entreprises constatent chaque jour l'importance de disposer de techniciens formés en photonique.

« Les besoins explosent dans la photonique. Chez Oxixius, nous concevons des lasers utilisés dans des instruments de pointe, comme la microscopie de super-résolution ou les interféromètres

analysant les défauts nanométriques sur des surfaces de wafers de semi-conducteurs. Afin de soutenir notre développement, nous recrutons des experts à différents niveaux : opérateurs, techniciens et jeunes ingénieurs. Parmi eux, les diplômés du BTS Photonique jouent un rôle clé : ils apportent des bases solides en optique et en manipulation de systèmes complexes, facilitant ensuite la montée en compétences en interne. Pour une entreprise comme la nôtre, c'est une formation qui fait réellement la différence », souligne Thierry Georges, président et fondateur d'Oxixius.

LES RACINES DU BTS PHOTONIQUE : UN CADRE NATIONAL STRUCTURANT

Pour répondre aux besoins croissants de l'industrie, la France s'appuie depuis la fin des années 1950 sur le Brevet de Technicien Supérieur (BTS), conçu ●●●

pour former des techniciens immédiatement opérationnels. Ces formations, fortement professionnalisantes, permettent aux diplômés de s'adapter rapidement aux évolutions technologiques.

Dans le domaine de l'optique, l'essor des lasers, de l'optoélectronique et des réseaux à fibre optique a très tôt créé un besoin de techniciens spécialisés. Dès 1989, plusieurs lycées pionniers ouvrent le BTS Génie Optique avec deux options :

- **Photonique** : centrée sur les technologies laser, la fibre optique et les composants optoélectroniques ;
- **Instrumentale** : orientée vers les systèmes optiques classiques, l'instrumentation et la métrologie scientifique.

Ces formations posent les bases de la filière photonique française et préparent la création du BTS Systèmes Photoniques dans les années 2010, puis du récent BTS Photonique : Technologies et Sciences de la Lumière, actualisé pour répondre aux besoins industriels contemporains.

LANNION, BERCEAU FRANÇAIS DES TÉLÉCOMS ET DE LA PHOTONIQUE

L'histoire de Lannion est intimement liée à la lumière. La première télétransmission française d'images en 1962 y annonce l'ère des communications modernes. Quelques années plus tard, les chercheurs lannionnais participent au développement des premières fibres optiques françaises, ouvrant la voie au très haut débit et à Internet.

Cet héritage a façonné un écosystème unique réunissant :

- Des laboratoires d'excellence comme l'institut FOTON (CNRS),
- Un tissu dense de PME et ETI spécialisées (lasers, fibres, imagerie),
- De grands groupes héritiers des télécoms,
- Photonics Bretagne, acteur central de structuration,
- Le Campus des métiers et des qualifications d'excellence, catalyseur des formations du Bac Pro au doctorat.

Lannion est ainsi devenu un véritable hub français de la photonique, où formation, recherche et industrie interagissent au quotidien.

AU CŒUR DE L'ACTION : LE BTS PHOTONIQUE DU LYCÉE F. LE DANTEC

Une pédagogie centrée sur la pratique

Le BTS Photonique : Technologies et Sciences de la Lumière du lycée Félix Le Dantec s'est imposé comme l'une des références nationales. Les étudiants apprennent en expérimentant : manipulation de lasers, fibres optiques, détecteurs, bancs optiques, instruments de haute précision... dans des laboratoires calibrés sur les besoins de l'industrie.

Les travaux pratiques reproduisent des situations professionnelles variées :

- Alignement de systèmes optiques,
- Montage d'interféromètres,
- Caractérisation de sources laser,
- Mesures photométriques,
- Intégration de dispositifs pour les télécoms ou le biomédical.

Une formation complète et exigeante

Le programme s'articule autour de quatre blocs de compétences :

- Conception durable de systèmes photoniques,
- Prototypage et industrialisation,
- Contrôle et métrologie,
- Assistance technique et maintenance.

Les étudiants acquièrent une maîtrise solide des fondamentaux : formation des images, lasers, radiométrie, colorimétrie, transmissions par fibre, optoélectronique, mécanique, électronique et métrologie.

Une formation connectée à l'industrie

À Lannion, la proximité avec les entreprises garantit des stages de grande qualité, souvent précurseurs d'embauches. Le taux d'insertion dépasse régulièrement 90 %. Certains diplômés poursuivent en écoles d'ingénieurs comme l'ENS-SAT, mais beaucoup rejoignent directement l'industrie.

L'ouverture du BAC Pro Photonique en 2024 et les stages de 3^e en photonique proposés par le Campus des métiers et Photonics Bretagne renforcent progressivement le vivier de talents.

À Lannion, la photonique est à la fois une identité forte et un moteur d'avenir.

Dans le paysage national, Lannion fait figure de laboratoire vivant. Ici, un élève peut découvrir la photonique dès la 4^e, poursuivre en Bac Pro, en BTS, en BUT, devenir ingénieur à l'ENSAT ou doctorant, le tout au sein d'un écosystème cohérent et complet.

Adossée à un tissu industriel dynamique, à des laboratoires reconnus et à de solides partenariats, Lannion offre bien plus qu'une formation : un environnement où la lumière devient compétence, innovation et carrière. En Bretagne, au cœur du Trégor, la photonique n'est pas seulement un champ scientifique : c'est une identité, une opportunité et un avenir lumineux, avec le BTS Photonique comme maillon essentiel de cet écosystème en pleine dynamique. ●

| Découverte de la polarisation de la lumière et observation des effets des lames biréfringentes.

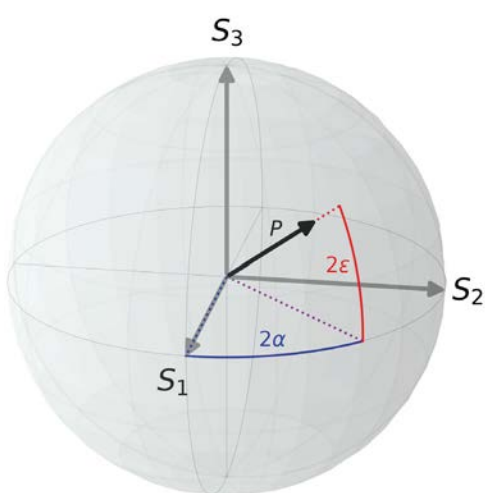


LA SPHÈRE DE POINCARÉ

Matthieu BOFFETY* et Romaric JOURNET

Université Paris-Saclay, Institut d'Optique Graduate School, CNRS, Laboratoire Charles Fabry, 91127 Palaiseau, France

*matthieu.boffety@institutoptique.fr



Propriété fondamentale de la lumière, la polarisation fait intervenir une théorie mathématique riche liée à son caractère multidimensionnel. Néanmoins, cette caractéristique pose aussi le défi de sa représentation géométrique. Introduite à la fin du XIX^e siècle, la sphère de Poincaré est un outil qui répond à cette problématique. Elle permet de représenter géométriquement un état de polarisation quelconque ainsi que l'effet d'un milieu sur l'état de la lumière qui le traverse. Cet article revient sur sa construction et son utilisation pratique.

<https://doi.org/10.1051/photon/2026313647>

Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

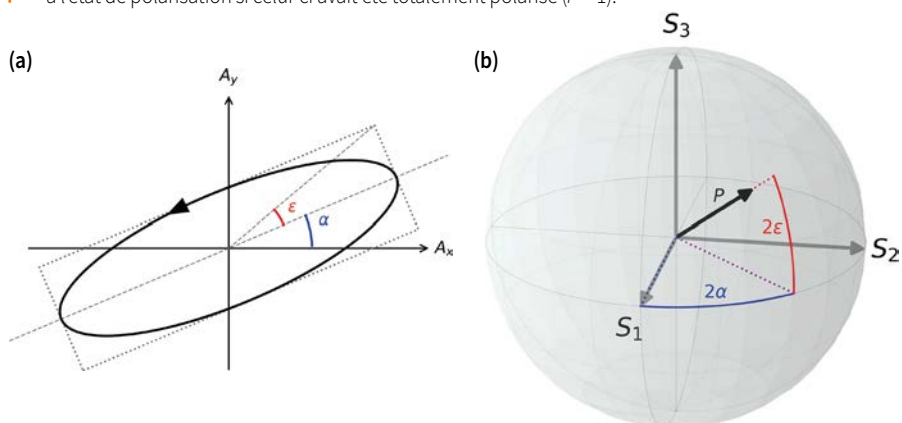
POLARISATION DE LA LUMIÈRE ET PARAMÈTRES DE STOKES

La polarisation de la lumière est définie comme la trajectoire du champ électrique E de l'onde électromagnétique dans le plan transverse au vecteur d'onde [1]. Pour un rayonnement monochromatique, dont les amplitudes et les phases restent constantes, la résolution de l'équation de propagation pour le champ amène à un système d'équations paramétriques correspondant à une trajectoire elliptique qui peut se réécrire pour retrouver l'équation de « l'ellipse de polarisation ». Cette ellipse est classiquement paramétrée par deux angles : α son azimut, c'est-à-dire l'angle que fait son grand axe avec l'horizontale, et ϵ , son ellipticité, l'arc-tangente entre le petit axe et le grand axe (cf. Figure 1a). Cependant, les amplitudes et les phases sont généralement inaccessibles à la mesure directe. Dans la pratique, il est plus utile de se ramener

à des grandeurs observables. De plus, cette description ne vaut que pour des états totalement polarisés, c'est-à-dire pour lesquels la trajectoire du champ est déterministe, or dans le cas général, l'état de polarisation accessible à

la mesure se caractérise par une polarisation partielle due à des effets de moyennage (spatial, spectral, angulaire, temporel, etc.) liés au système d'acquisition. La description de cet état via l'ellipse de polarisation ●●●

Figure 1. (a) Ellipse de polarisation paramétrée par son azimut α et son ellipticité ϵ . La flèche noire représente le sens de rotation du vecteur champ au cours du temps. Ici, la polarisation est dite « gauche » (sens de rotation anti-horaire). (b) Représentation d'un état de polarisation, de degré de polarisation P , sur la sphère de Poincaré. Les angles (α, ϵ) correspondent aux angles de l'ellipse de polarisation associée à l'état de polarisation si celui-ci avait été totalement polarisé ($P = 1$).



n'est donc plus possible. On préfère alors utiliser le formalisme de Stokes qui, pour décrire un état de polarisation, s'appuie sur les 4 paramètres introduits en 1852 par Georges Gabriel Stokes 40 ans avant que Jules Henri Poincaré ne développe sa représentation sphérique des états de polarisation [2]. Ces paramètres sont des grandeurs réelles accessibles via des mesures d'intensité simples :

$$\begin{cases} S_0 = I_{0^\circ} + I_{90^\circ} \\ S_1 = I_{0^\circ} - I_{90^\circ} \\ S_2 = I_{45^\circ} - I_{-45^\circ} \\ S_3 = I_{\text{Gauche}} - I_{\text{Droite}} \end{cases} \quad (3)$$

où le terme S_0 correspond à l'intensité totale de l'onde et les autres termes décrivent les caractéristiques polarimétriques de l'onde (linéaire à 0°

ou 90° pour S_1 , linéaire à $\pm 45^\circ$ pour S_2 et circulaire gauche ou droite pour S_3) [3]. De plus, le formalisme de Stokes permet l'introduction du degré de polarisation P :

$$P = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0}, \text{ avec } 0 \leq P \leq 1$$

qui décrit à quel point la lumière est polarisée. Un degré de polarisation de 1 indique un état purement polarisé décrit par l'ellipse de polarisation. Un degré de polarisation de 0 correspond à une lumière totalement dépolariée pour laquelle la trajectoire du champ électrique est complètement aléatoire. On peut alors montrer [3] que, pour une lumière de degré de polarisation P , les paramètres de Stokes s'expriment sous la forme :

$$\begin{cases} S_1 = S_0 P \cos 2\alpha \cos 2\varepsilon \\ S_2 = S_0 P \sin 2\alpha \cos 2\varepsilon \\ S_3 = S_0 P \sin 2\varepsilon \end{cases}$$

où α et ε sont l'azimut et l'ellipticité de l'ellipse de polarisation associée à l'état de la lumière si celle-ci devait avoir un degré de polarisation égal 1. Ces trois paramètres permettent alors de définir le vecteur $\mathbf{v} = [S_1/S_0, S_2/S_0, S_3/S_0]$, de norme P , appelé vecteur de Stokes réduit, correspondant aux coordonnées sphériques de l'état de polarisation dans un espace qui n'est autre que celui de la sphère de Poincaré (cf. Figure 1b).

REPRÉSENTER UN ÉTAT DE POLARISATION SUR LA SPHÈRE DE POINCARÉ

La sphère de Poincaré constitue alors un outil pratique et naturel pour

CONSTRUCTION HISTORIQUE DE POINCARÉ

L'introduction par Poincaré de la représentation des états de polarisation sur une sphère qui porte aujourd'hui son nom s'est semble-t-il faite de façon indépendante des travaux de Stokes. En effet, si aujourd'hui la sphère de Poincaré est largement associée aux paramètres de Stokes, Poincaré ne semblait pas connaître les travaux de son prédécesseur [2] et sa construction s'appuyait sur des arguments géométriques simples à partir d'une représentation dans le plan complexe du champ électromagnétique.

L'idée consiste à représenter dans le plan complexe le ratio des amplitudes complexes du champ électrique [1]: $A_x/A_y = u + iv$, qui est indépendant de l'intensité totale et de la phase globale de l'onde. Dans ce plan représenté en Figure A l'axe $v = 0$, en rouge, correspond à l'ensemble des polarisations linéaires ; en effet, pour une polarisation linéaire il n'y a pas de déphasage entre les directions de polarisation suivant x et y donnant une partie imaginaire nulle pour le ratio A_x/A_y . En particulier, l'origine du repère correspond à une polarisation linéaire verticale ($A_x = 0$), alors que la polarisation linéaire horizontale ($A_y = 0$) se trouve « à l'infini ». L'axe $u = 0$ en bleu, représente quant à lui l'ensemble des polarisations elliptiques d'azimut nul, c'est-à-dire dont les axes propres sont alignés avec les axes x et y de référence [1].

À partir de ce plan, la sphère de Poincaré se construit en faisant une projection stéréographique du plan sur une sphère de diamètre 1. On considère la sphère tangente au plan en l'origine O , comme sur la Figure A, on associe à un point M du plan le point d'intersection entre la sphère et le segment $H'M$, noté M' . La droite $v = 0$ des polarisations linéaires est ainsi envoyée sur l'équateur, et les deux polarisations circulaires (c_g et c_d) sont envoyées aux pôles.

Enfin, la polarisation horizontale qui se trouvait « à l'infini » est ramenée sur le point H' .

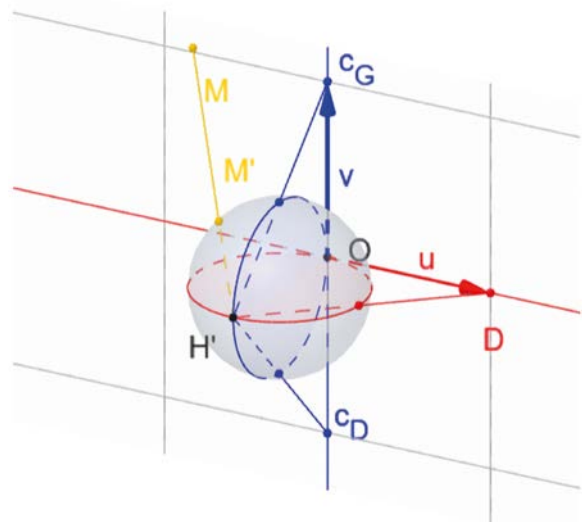


Figure A : Construction de la sphère de Poincaré à partir du plan complexe (u, v). Les polarisations linéaires sont représentées par la droite rouge dont le projeté sur la sphère est l'équateur. L'origine O correspond à une polarisation verticale, le point D = (1, 0) à une polarisation diagonale à 45° et H' est la projection de la polarisation horizontale. La droite bleue représente les polarisations elliptiques d'azimut nul, les points remarquables $c_g = (0, 1)$ et $c_d = (0, -1)$ correspondent aux polarisations circulaires gauche et droite. Le point M correspond à une polarisation générique de projetée M' .

UTILISATION DE LA SPHÈRE DE POINCARÉ EN PHYSIQUE QUANTIQUE : LA SPHÈRE DE BLOCH

Au-delà de son usage pour représenter les états de polarisation de la lumière, une construction analogue à la sphère de Poincaré est également utilisée pour représenter l'état de systèmes quantiques « à deux niveaux ». Dans ce contexte, elle est plus couramment connue sous le nom de *sphère de Bloch*, en l'honneur de Félix Bloch.

Un système quantique à deux niveaux peut être décrit par des vecteurs complexes normés de dimension deux qui représentent la superposition entre deux états quantiques orthogonaux. Ceci peut être rapproché d'une version normalisée du vecteur de Jones, autre formalisme classique utilisé en polarisation [1] et reposant sur l'utilisation des amplitudes complexes A_x et A_y du champ. On peut donner comme exemples de tels systèmes, les états de polarisations verticale et horizontale pour un photon, les états fondamental et excité d'un atome, ou encore les états spin « up » et « down » d'un électron. Dans le contexte du calcul quantique, ces différents systèmes sont des exemples de « bit quantique », on note alors traditionnellement les états de base $|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ et $|1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$, par analogie avec les deux états possibles d'un bit classique. Un état générique $|\psi\rangle$ peut alors s'écrire à une phase globale près :

$$|\psi\rangle = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) |0\rangle + e^{i\phi} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) |1\rangle, \theta \in [0, \pi], \phi \in [0, 2\pi] \quad (1)$$

en analogie totale avec le formalisme de Jones. On peut donc représenter sur une sphère les états quantiques possibles d'un bit quantique, ainsi que les opérations qu'on peut faire sur cet objet.

Comme pour l'état de polarisation, l'intérieur de la sphère de Bloch a une interprétation en termes d'états imparfaitement connus, on parle de mélanges statistiques pour l'intérieur de la sphère et d'états purs pour les états à la surface de la

sphère de Bloch. On peut visualiser ces mélanges comme « l'état moyen » produit par une expérience qui génère aléatoirement des états purs bien choisis. Par exemple, l'état au centre de la sphère peut être vu comme résultant de la production d'un état $|0\rangle$ ou $|1\rangle$ avec probabilité 1/2. On peut représenter un état quelconque par un vecteur analogue au vecteur de Stokes réduit qu'on appelle *vecteur de Bloch* \vec{V} . Les composantes de ce vecteur s'obtiennent en mesurant la valeur moyenne de la projection de l'état suivant les trois directions particulières $|X\rangle / |-X\rangle$, $|Y\rangle / |-Y\rangle$ et $|Z\rangle / |-Z\rangle$, de la même façon que le vecteur de Stokes est construit en mesurant l'intensité (et donc une moyenne) pour des polarisations verticale/horizontale, linéaire à 45° / linéaire à 135° et circulaires gauche/droite. La norme carrée du vecteur de Bloch s'appelle la *pureté* avec une interprétation similaire à celle du degré de polarisation pour le cas du vecteur de Stokes, plus elle est proche de 1 et plus l'état est pur.

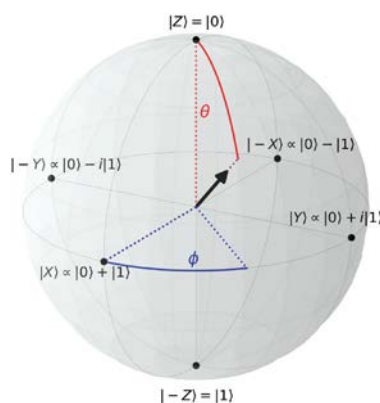


Figure B : Représentation de la sphère de Bloch avec un vecteur de Bloch générique. Les paires de points antipodaux représentent les issues possibles des mesures suivant les axes X , Y et Z .

représenter géométriquement un état de polarisation quelconque à partir de 3 paramètres : le degré de polarisation P , l'azimut α – appelé aussi angle de polarisation – et l'ellipticité ε .

Ainsi, les états associés à une lumière totalement polarisée ($P=1$) se trouvent à la surface de la sphère de rayon 1. Une lumière totalement dépolarisée sera représentée par un point au centre de la sphère ($P=0$) et tout état partiellement polarisé par un point à l'intérieur de la sphère (vecteur de norme P).

L'équateur ($\varepsilon = 0$) correspond au domaine des états linéaires ($S_3 = 0$). Les états circulaires ($S_1 = S_2 = 0$) se trouvent sur les pôles ($\varepsilon = \pm \frac{\pi}{4}$). Le reste de la sphère représente les états elliptiques.

Compte-tenu des conventions choisies ici, l'hémisphère nord ($\varepsilon > 0$) est le domaine des états « gauches » (le champ électrique tourne dans le sens trigonométrique quand la lumière se propage vers l'observateur) et l'hémisphère sud ($\varepsilon < 0$) le domaine des états « droits » (le champ électrique tourne dans le sens horaire quand la lumière se propage vers l'observateur).

Il est aussi intéressant de noter le facteur 2 qui existe entre les angles dans le plan de l'ellipse de polarisation et sur la sphère de Poincaré. Ainsi, un état de polarisation linéaire orienté d'un angle α par rapport à l'horizontale se situera sur l'équateur à un angle 2α par rapport à l'axe OS_1 . De

manière analogue, deux états orthogonaux sont représentés par deux points diamétralement opposés (antipodaux) sur la sphère de Poincaré.

MODIFICATION D'UN ÉTAT DE POLARISATION

Dès 1892, Henri Poincaré s'appuyait sur la sphère pour expliquer des effets tels que le pouvoir rotatoire ou la biréfringence de lames cristallines. Néanmoins, la représentation vectorielle des paramètres de Stokes au travers du vecteur de Stokes réduit introduit à la première section permet de définir un cadre algébrique phénoménologique plus général pour modéliser la modification d'un état de polarisation [1]. ●●●

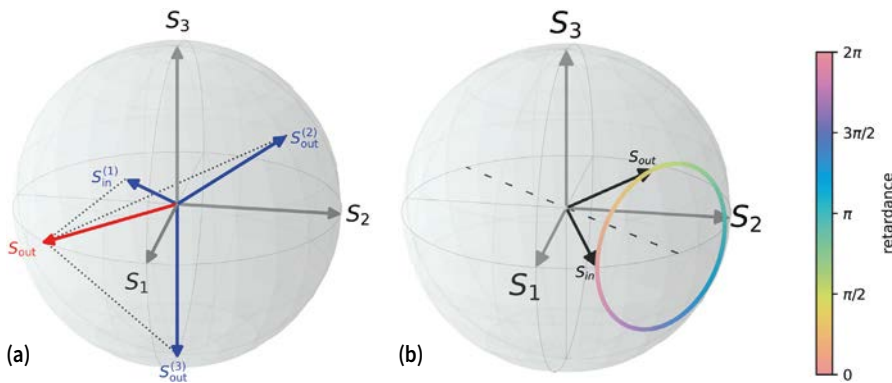


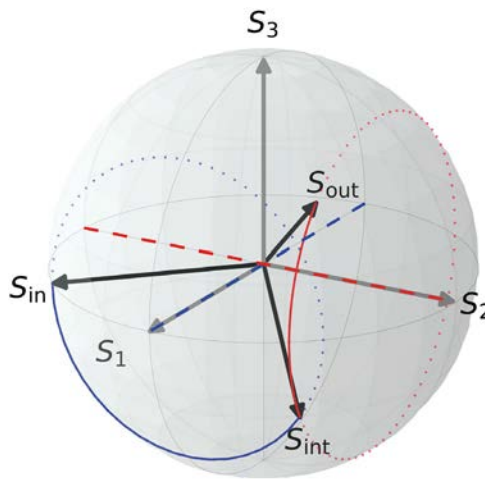
Figure 2. (a) Effet d'un polariseur linéaire sur un état de polarisation : quel que soit l'état incident (en bleu) l'état en sortie se trouve sur la surface de la sphère et aligné avec l'état propre du polariseur (en rouge). (b) Effet d'un retardateur variable linéaire sur un état incident S_{in} . L'axe en tiret relie les deux états propres du retardateur sur la sphère de Poincaré. L'effet du retardateur correspond à une rotation autour de cet axe d'un angle égal au déphasage du retardateur. Les couleurs du cercle donnent la position du vecteur S_{out} en fonction du déphasage (ou retardance) du retardateur.

Ce cadre a été introduit par Hans Mueller dans un cours au MIT en 1946 [4] et permet de modéliser cette modification de l'état de polarisation comme une transformation géométrique dans l'espace de la sphère de Poincaré. Deux exemples de composants sont particulièrement intéressants pour illustrer l'utilité de la sphère de Poincaré dans ce cas.

Tout d'abord, les polariseurs idéaux, qui réalisent une transformation correspondant à une projection sur leur état propre (leur « axe » pour les polariseurs linéaires). Quel que soit l'état d'entrée, l'état de la lumière en sortie d'un tel composant est totalement polarisé et est représenté par un point à la surface de la sphère de Poincaré correspondant à l'état propre du polariseur (cf. Figure 2a).

Autre type de composants, les retardateurs, comme les lames de phase par exemple, qui introduisent un déphasage entre deux états propres. On montre que cette fonction optique correspond à réaliser une rotation sur la sphère de Poincaré d'un angle donné par le déphasage (ou retardance) de la lame autour de l'axe qui relie les deux états propres du composant sur la sphère (cf. Figure 2b). Ces considérations servent de fondement à la modélisation et à la réalisation de systèmes permettant de générer n'importe quel état totalement

Figure 3. Génération d'un état de polarisation quelconque à partir d'un état polarisé linéairement (S_{in}) et de deux composants à retard variable. La lumière passe ensuite à travers un premier retardateur dont les axes sont à $22,5^\circ$ de l'état linéaire et entraîne une rotation du point S_{in} vers le point S_{int} . La lumière passe ensuite à travers un second retardateur dont les axes sont à 45° du précédent et qui entraîne une rotation du point S_{int} vers le point S_{out} , état final généré par le système.



polarisé (appelés généralement *polarization state generator* ou PSG). En effet, deux paramètres angulaires permettant de décrire complètement la sphère (α et ϵ), il suffit de concevoir un système ayant deux degrés de liberté autorisant deux rotations indépendantes sur la sphère. Ainsi, la majorité des PSG sont constitués d'une source associée à un polariseur (généralement linéaire, état initial sur l'équateur de la sphère) et combinée avec deux déphaseurs mobiles (généralement des lames de phase rotatives, déphasage fixe mais axes variables) ou deux éléments à retard variable (comme des cristaux liquides, déphasages variables mais axes fixes orientés à 45° les uns des autres) [2]. Cette combinaison permet de partir d'un point sur l'équateur de la sphère et d'arriver à n'importe quel point de la sphère par l'enchaînement de deux rotations d'axes perpendiculaires l'un à l'autre (Figure 3).

CONCLUSION

Outil formel développé il y a plus de 130 ans, la sphère de Poincaré est aujourd'hui largement utilisée dans la littérature scientifique pour représenter les états de polarisation ou les effets d'un milieu sur ces états. L'algèbre qui y est associée fait l'objet d'une recherche riche et active. Par exemple, des résultats importants sur la conception de systèmes sont obtenus en étudiant comment les états propres de ces systèmes discrétisent la surface de la sphère de Poincaré. Ces résultats permettent ainsi la mise en place d'un cadre théorique permettant d'étudier l'optimalité d'un système d'acquisition en fonction de l'application et des contraintes expérimentales. ●

RÉFÉRENCES

[1] J. Fade, M. Boffety et V. Devlaminck, *Photoniques* **109**, 57 (2021)
 [2] W. Swindell, *Polarized Light*, Dowden, Hutchinson & Ross (1975)
 [3] D. H. Goldstein, *Polarized light*, Marcel Dekker (2003)
 [4] N. G. Parke, *J. Math. Phys.* **28** (1949)

LA PRÉCISION COMMENCE À LA BASE : CHOISIR LA BONNE TABLE OPTIQUE

Guofeng SUN¹, Dalila AIT AMIR^{2,*}

¹ Senior Product Marketing Manager Newport Products

² Senior Sales Manager Newport Products, France

*Dalila.AitAmir@mks.com



<https://doi.org/10.1051/photon/202613651>

Les tables optiques servent de support commun pour des ensembles opto-mécaniques complets. Ces plateformes, conçues avec une précision extrême, offrent une surface stable et isolée des vibrations pour réaliser des expériences optiques sensibles et maintenir un alignement précis, garantissant ainsi la performance fiable des composants optiques tels que les lasers, miroirs et lentilles. Dans cet article, nous examinons les paramètres clés à prendre en compte lors du choix d'une table optique pour des applications photoniques avancées exigeant une stabilité exceptionnelle et une isolation vibratoire optimale.

Dans le domaine de la photonique, même les plus légères vibrations peuvent perturber la propagation des faisceaux laser, compromettant à la fois la précision expérimentale et l'efficacité de fabrication. Pour préserver l'intégrité des systèmes optiques, il est essentiel d'isoler le trajet optique des perturbations environnementales susceptibles de provoquer des désalignements. Les tables optiques constituent la base pour concevoir des configurations optiques stables et extrêmement précises. Au cours de la dernière décennie, le développement rapide des

technologies quantiques a intensifié la demande de tables optiques haute performance pour des applications scientifiques de pointe. Étant donné la sensibilité extrême des configurations photoniques modernes et les efforts considérables investis dans leur conception, les tables optiques doivent répondre aux normes les plus élevées en matière de précision et de stabilité mécanique.

DÉFINITIONS ET PRINCIPES DE CONCEPTION

Un système de table optique désigne un ensemble d'isolation vibratoire comprenant un plateau et support (voir Figure 2). L'objectif principal d'un système de table optique est de minimiser les mouvements relatifs

entre les composants sensibles à la position sur la surface de travail de la table. Le support isolateur de vibrations est conçu pour filtrer les vibrations provenant du sol avant qu'elles n'atteignent le plateau et ne perturbent le trajet du faisceau optique. La structure en nid d'abeilles de la table optique est conçue pour résister rigidement à toute déformation causée par des charges mobiles ou par des vibrations traversant le système d'isolation.

Selon l'application, plusieurs aspects critiques doivent être pris en compte lors du choix d'une table optique :

- **Amortissement et isolation des vibrations** – Capacité à isoler l'installation expérimentale de toute perturbation.

- **Propriétés des matériaux** – Choix approprié des matériaux pour garantir la stabilité mécanique et la compatibilité.
- **Personnalisation et flexibilité** – Configurations sur mesure, options de modification et accessoires pour répondre aux exigences expérimentales spécifiques et aux contraintes d'espace.

PLATEAU OPTIQUE ET AMORTISSEMENT

Le plateau optique est une plateforme rigide destinée à supporter des équipements sensibles aux vibrations. L'objectif est de créer un corps parfaitement rigide – un concept théorique idéal – où la distance entre deux points quelconques reste constante dans le temps. En d'autres termes, la taille et la forme du corps ne changent pas sous l'effet des forces induites par les vibrations, les charges statiques ou les variations de température. Lorsque tous les éléments sont assemblés pour former un corps rigide idéal, ils ne se déplacent pas les uns par rapport aux autres et les performances du système ne sont pas altérées.

La caractéristique vibratoire la plus critique d'une table optique est sa fréquence de résonance. Comme la table est conçue pour une rigidité maximale, elle se comporte comme un corps rigide tant que ses fréquences de résonance ne sont pas excitées. Une table optique typique présente une ou deux résonances principales et plusieurs résonances secondaires. C'est pourquoi un amortissement est nécessaire pour réduire les amplitudes de résonance et minimiser la déformation du système lorsque des vibrations ambiantes excitent ces fréquences. Trois types de méthodes d'amortissement sont disponibles pour les tables optiques : large bande, bande étroite et actif/hybride.

- **Amortissement large bande** : absorbe et dissipe l'énergie vibratoire sur une large gamme de fréquences. Il est largement utilisé dans les tables antivibratoires en raison de son coût abordable et de

son adéquation aux applications ne nécessitant pas des performances d'amortissement élevées.

- **Amortissement à bande étroite avec absorbeur dynamique (Tuned Mass Damper – TMD)** : consiste en une masse, un ressort et un amortisseur fixés à une structure pour réduire sa réponse dynamique. Il est réglé sur une fréquence structurelle particulière de sorte que, lorsque la résonance de la table est excitée, l'amortisseur résonne en opposition de phase avec le mouvement de la structure. L'énergie vibratoire est alors dissipée par la force d'inertie de l'amortisseur agissant sur la structure. Les TMD sont la méthode passive la plus efficace, car ils concentrent l'amortissement là où il est nécessaire, aux fréquences des modes de résonance dominants. Contrairement à l'amortissement large bande qui absorbe une quantité modérée d'énergie vibratoire sur une large plage, les TMD ciblent les

résonances et sont donc beaucoup plus efficaces.

- **Amortissement actif** : détecte les vibrations en temps réel et envoie des signaux aux actionneurs pour contrebalancer et annuler les vibrations. Il traite efficacement les résonances des tables optiques en intégrant une paire de capteurs et d'actionneurs dans la conception de la table et utilise un contrôleur externe pour coordonner le traitement du signal, permettant une réponse rapide et précise. Il présente un temps de stabilisation beaucoup plus court qu'un système passif et réduit toutes les résonances de la table dans toute la bande active.
- **Amortissement hybride** : combine les avantages de l'amortissement actif et des amortisseurs dynamiques accordés. Le système actif peut réduire davantage les vibrations sur la base solide créée par des amortisseurs accordés avec précision, offrant des tables optiques et des systèmes avec des pics de résonance minimaux. L'amortissement hybride est la technique la plus avancée pour les tables optiques et convient aux applications les plus exigeantes. Les fournisseurs de haute qualité proposent souvent

Figure 1. Nouveau laboratoire laser à l'Institut Max Planck d'Optique Quantique en Allemagne, équipé de tables optiques et d'un système de stabilisation de la température. ©MPQ/Aidelsburger.



la possibilité de mettre à niveau les tables optiques ultérieurement, ce qui garantit une flexibilité pour des besoins expérimentaux évolutifs. Cette capacité permet aux laboratoires de commencer avec une solution économique et d'améliorer les performances sans remplacer l'ensemble de l'installation.

Pour évaluer les caractéristiques de rigidité dynamique d'une table optique, les fabricants fournissent généralement **la courbe de compliance de la table**. Elle montre la réponse dynamique du plateau en espace libre soumis à une force externe, c'est-à-dire qu'elle indique comment la surface se déforme en réponse à une vibration. Les courbes de compliance sont des courbes de fonction de transfert qui montrent la réponse en position d'un point de la surface de la table à une force variable dans le temps appliquée au même point. Elles indiquent la plage de fréquences sur laquelle la table optique se comporte comme un corps essentiellement rigide. La courbe fournit également la fréquence des modes de résonance principaux et une indication de leurs amplitudes relatives, ce qui donne des informations sur l'amortissement intégré à la structure.

CONTRÔLE ET ISOLATION DES VIBRATIONS

En plus des méthodes d'amortissement du plateau, les supports de table optique peuvent filtrer les vibrations avant que le bruit mécanique n'atteigne la surface de travail. Bien que des pieds rigides sans contrôle supplémentaire des vibrations puissent suffire pour des applications non critiques, des pieds isolants autonomes, sont le meilleur choix pour les configurations sensibles aux vibrations. En général, l'isolation vibratoire des supports de table peut être réalisée par isolation passive ou active. Les systèmes d'isolation active utilisent des composants piézoélectriques ou électrodynamiques, tandis que les options passives incluent des ressorts, des patins en caoutchouc, des chambres à air gonflées ou des pieds pneumatiques remise à niveau automatique. Chaque méthode offre différents niveaux de performance,

de capacité et, naturellement, de coût. L'isolation active peut coûter jusqu'à dix fois plus cher que l'isolation pneumatique. Un tel investissement n'est généralement justifié que pour des applications sensibles aux vibrations sub-Hz, comme la microscopie à force atomique. Le type d'isolateur le plus courant en photonique est le système pneumatique, car il offre une remise à niveau automatique et minimise l'effet des variations de masse sur l'isolation.

La performance de l'isolateur est définie principalement par sa fréquence propre et ses caractéristiques d'amortissement :

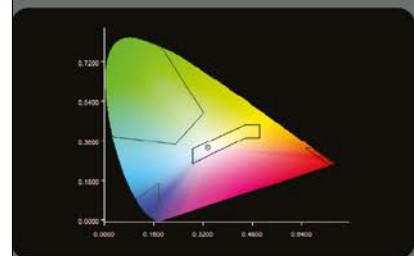
- **Fréquence propre (mode naturel, résonance)** – L'isolateur pneumatique est essentiellement un oscillateur harmonique simple qui utilise la « chute rapide » à des fréquences élevées pour agir comme un filtre mécanique passe-bas. En dessous de la fréquence propre de l'oscillateur harmonique, l'isolateur est essentiellement rigide et la vibration est transmise directement à la plateforme. À la fréquence propre, la vibration est amplifiée. L'objectif principal est donc d'abaisser la fréquence propre, car cela améliore l'isolation aux basses fréquences et la bande passante globale d'isolation.
- **Amortissement** – Un autre objectif essentiel est d'amortir l'amplitude de l'oscillateur harmonique à la résonance. Cela réduit l'amplification des vibrations à basse fréquence et améliore la stabilité du système. Malheureusement, il existe un compromis entre la fréquence propre et l'amortissement : lorsque l'amortissement augmente, la fréquence propre de l'isolateur se déplace légèrement vers le haut et l'isolation à haute fréquence diminue.

Un autre facteur différenciateur important pour l'isolation pneumatique est la manière de filtrer les « bruits » horizontaux. Chez certains fabricants, les isolateurs pneumatiques ne couvrent que l'isolation dans la direction verticale, tandis que l'isolation horizontale est obtenue par des systèmes de filtres mécaniques avec une surface de roulement ou de pivot pour filtrer les vibrations. Les isolateurs avancés proposés par MKS intègrent des ●●●



Specbos 2511 portable Luxmètre - Spectroradiomètre UV-VIS-NIR Haute Précision

- Gammes spectrales :
380-780 nm (VIS)
380-1050 nm (NIR)
200-1050 nm (UV-VIS-NIR)
- Bande passante :
4 nm / 2 nm (HiRes)
- Modes :
Radiance, Éclairement, Couleur,
Flux total, Intensité
- Interfaces :
USB, Bluetooth, LAN/PoE
- Options :
HiRes, Focus, Flicker, Trigger
- Applications :
Mesures LEDs, Lampes, Voyants
automobile et aéronautique,
Éclairage urbain, Mesures de
dangerosité photobiologique



SCIENTEC C'EST AUSSI,
de la formation, du SAV, de la calibration
et la distribution de :

Luxmètres - Photomètres
Chromamètres - Spectroradiomètres
Vidéo-Colorimètres - Photogoniomètres
Sources de Référence...

Contact us for more information
Phone: +33 (0) 164532700
Email: info@scientec.fr

SCIENTEC
www.scientec.fr



Precision Tuned Damping

Patented precision tunable dampers improve damping efficiency by 10x



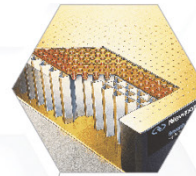
Individually Sealed Mounting Holes

Prevent spilling and protect the core



Vertically Bonded Honeycomb Core

Together with integrated damping layers provide robust broadband damping



Stiff Working Surface

400 Series stainless steel



Optical Table Supports

Isolated or rigid options

Highly Damped Side Panel

Eliminate vibrations from the side



Figure 2. Une table optique combine un plateau et un système de support ©MKS Inc.

systèmes pendulaires trifilaires sans friction pour l'isolation des vibrations horizontales. Comme le système fonctionne par flexion, il n'offre aucune résistance frictionnelle au mouvement et peut isoler des vibrations mécaniques de très faible amplitude.

Pour comparer la « qualité » d'isolation d'une table optique, les fabricants fournissent généralement une courbe de transmissibilité. Elle montre les propriétés de filtrage mécanique du pied isolant et donne une indication de la quantité de vibration du sol qui sera transmise au plateau. Il s'agit d'une mesure relative exprimée comme un rapport entre la vibration en deux points : l'un sur le dessus de l'isolateur et l'autre sur le sol. Ces courbes donnent également une indication de l'amortissement présent dans la conception.

QUELLE EST LA SENSIBILITÉ DE L'APPLICATION ?

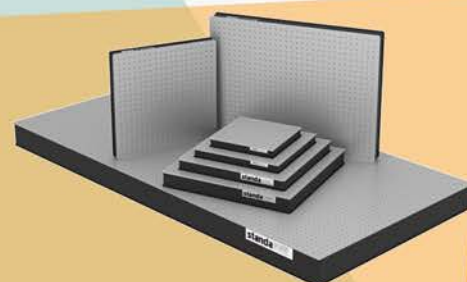
La question suivante est : quelles exigences l'application spécifique impose-t-elle ? C'est une question que les utilisateurs doivent clarifier

à l'avance avant de sélectionner une table optique appropriée. Les deux aspects les plus critiques à considérer lors de l'achat d'une table optique sont l'application principale et l'environnement du laboratoire. Les exigences pour les travaux pratiques d'étudiants sont bien moins contraignantes que celles des laboratoires de physique quantique, où les chercheurs passent des années à construire leurs montages et à aligner des faisceaux laser avec une précision micrométrique — ou que celles des biologistes cherchant à obtenir une image nette des réseaux neuronaux grâce à l'imagerie biphotonique.

Première étape : analyser et quantifier les sources potentielles de bruit. Pour les applications très exigeantes, la réduction nécessaire des vibrations doit idéalement être

déterminée par une analyse des mesures de l'environnement et des éléments présents dans l'application. Cela inclut une étude vibratoire du site à l'aide d'accéléromètres sismiques à faible bruit et éventuellement une analyse vibratoire sans contact utilisant des vibromètres laser Doppler. Ce dernier procédé est coûteux et long, réservé aux applications les plus précises et exigeantes telles que la fabrication de wafers semi-conducteurs, l'interférométrie et l'holographie. En général, ces applications nécessitent au minimum un système d'isolation pneumatique et une table optique fortement amortie. Dans des cas extrêmes, un système d'isolation active ou une table à amortissement actif peut être requis, selon que la source de vibration provient du sol ou de la surface de la table, et en fonction de l'ampleur de ces perturbations.

TABLES OPTIQUE & ACCESSOIRES



- ▲ Table Optique, breadboard Nid d'abeille,
- ▲ Isolation Rigide, pneumatique ou active
- ▲ En stock ou sur-mesure
- ▲ Planéité +/- 0.1mm/m²
- ▲ Déflexion de 4µm (100kg de charge)
- ▲ Amagnétisme en option
- ▲ Fabriquées en Europe
- ▲ Options & add-ons : étagère laser, étagère indépendante pour instrument, repose-bras, roulettes, hotte à flux laminaire ...



Support pour table Optique pneumatique ou rigide

Cependant, pour la plupart des applications, l'évaluation du rapport coût-bénéfice de la réalisation de telles études approfondies peut indiquer qu'elles ne sont pas nécessaires. Les fournisseurs de haute qualité offrent souvent la possibilité de mettre à niveau les tables optiques ultérieurement, ce qui garantit une flexibilité pour des besoins expérimentaux évolutifs. Cette capacité permet aux laboratoires de commencer avec une solution économique et d'améliorer les performances sans remplacer l'ensemble de l'installation.

Les « courbes génériques de critères vibratoires » sont couramment utilisées comme guide pour les clients choisissant des solutions d'isolation vibratoire. Ces courbes de critères génériques ont été développées à partir de données provenant de systèmes individuels et de mesures effectuées dans des installations avant et après la résolution des problèmes de vibrations. Elles ont été largement utilisées par les principaux consultants en vibrations, par exemple dans l'industrie de la fabrication de semi-conducteurs, depuis près de 20 ans, et ont été étendues et affinées à mesure que l'industrie est passée à des largeurs de ligne plus étroites. Ces courbes tiennent compte du fait que les équipements utilisés pour les tâches les plus exigeantes (comme la fabrication de semi-conducteurs avec des géométries de dispositifs plus petites) sont plus rigides et mieux isolés. Il est toutefois important de noter que ces critères ne sont fournis qu'à titre indicatif.

Une fois les sources potentielles de vibrations et de bruit identifiées, l'étape suivante consiste à évaluer les exigences spécifiques du système afin de déterminer si une isolation vibratoire est nécessaire, et dans quelle mesure. Une conception bien pensée, qui minimise les sources de bruit et maintient un espace de travail propre et organisé, peut améliorer considérablement la fiabilité expérimentale et conduire à des

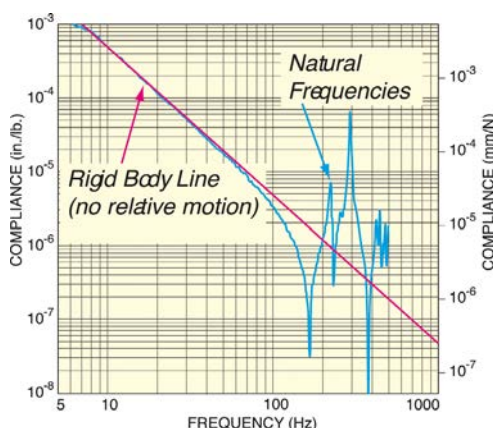


Figure 3. Exemple de courbe de compliance d'une table optique MKS Newport ©MKS, Inc.

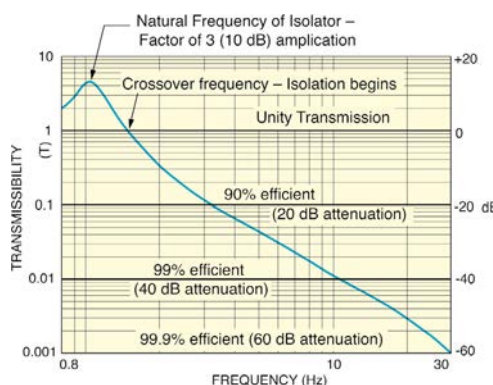
résultats réussis, y compris de nouvelles découvertes.

PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX

La stabilité du trajet du faisceau est une exigence essentielle pour de nombreuses expériences et procédés optiques. En plus de l'amortissement et du contrôle des vibrations, les tables optiques doivent également offrir une planéité de surface élevée et une stabilité thermique. Idéalement, le plateau doit être fabriqué en une seule pièce, conformément aux normes de production les plus strictes, afin de garantir une planéité optimale.

Les tables optiques modernes utilisent généralement une peau supérieure en acier inoxydable, ●●●

Figure 4. Exemple de courbe de transmissibilité ©MKS Inc.



combinée à d'autres matériaux tels que le nid d'abeilles en acier et l'époxy, car l'acier inoxydable offre une surface de travail rigide, stable et résistante à la corrosion. Cette construction crée une structure très rigide mais légère, qui minimise les vibrations et maintient la planéité, ce qui est crucial pour les expériences optiques sensibles. Certains fabricants, comme MKS, incluent d'autres caractéristiques intéressantes, telles que des trous non corrosifs et scellés individuellement pour empêcher la poussière et les liquides de pénétrer dans le cœur de la table, ainsi que des panneaux latéraux en bois composite à amortissement élevé pour éliminer les vibrations provenant des côtés. Pour les applications exigeant le plus haut degré de stabilité thermique, des matériaux tels que le Super Invar et d'autres alliages avancés sont utilisés. Le Super Invar est un alliage spécial connu pour son taux d'expansion thermique exceptionnellement faible. Cela lui permet de conserver sa forme et ses dimensions même en cas de fluctuations extrêmes de température, ce qui en fait un matériau essentiel pour les instruments de précision et les équipements scientifiques. Les applications sensibles au magnétisme doivent être installées sur une structure non magnétique fabriquée en acier inoxydable 316. Ces plateaux de table optique présentent le même amortissement large bande, tandis que les peaux supérieure et inférieure ainsi que le cœur en nid d'abeilles sont fabriqués en acier inoxydable de la série 316, pratiquement non magnétique. Pour atteindre une planéité maximale, certains fournisseurs proposent des plateformes en granit, des composites granit-époxy ou des composites granit-nid d'abeilles. Cependant, le granit n'est généralement pas le premier choix pour les plateaux, car sa masse ne contribue pas de manière significative à la rigidité structurelle. À la place, la structure en nid d'abeilles offre une masse réduite, une rigidité accrue

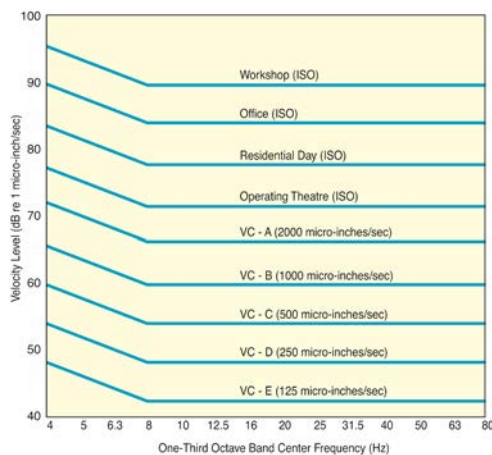


Figure 5. Le tableau générique des critères vibratoires est basé sur les recherches de Colin G. Gordon et Eric E. Ungar dans les années 1980 et a été publié pour la première fois dans un article de la SPIE en 1992 [1].

et des performances supérieures en matière de contrôle des vibrations.

PERSONNALISATION ET FLEXIBILITÉ

Lors de l'évaluation des options pour les tables optiques, il est important de considérer non seulement les configurations standard, mais aussi la flexibilité d'adapter les produits existants afin de répondre aux besoins spécifiques de l'application. Les fabricants expérimentés proposent souvent une large gamme d'options de personnalisation pour accompagner cette démarche. Par exemple, si votre configuration implique une charge importante et

entraîne un centre de gravité élevé, il peut devenir difficile d'obtenir une flottaison stable — en particulier dans les systèmes isolés des vibrations. Dans ce cas, des ajustements de conception tels que l'abaissement de la hauteur de montage ou la redistribution de la masse peuvent être nécessaires pour maintenir la stabilité et les performances du système. Lorsque de grands plateaux ne peuvent pas être déplacés dans l'installation en une seule pièce, des systèmes doubleurs sont disponibles, reliés par des interfaces de jonction uniques conçues pour maintenir la rigidité et la solidité entre les sections individuelles de la table.

CONCLUSION

Choisir le bon emplacement pour votre laboratoire et réduire les bruits environnementaux constitue une première étape importante. Cependant, dans de nombreux cas, ces choix sont limités. La bonne nouvelle est qu'il existe des options très efficaces pour l'amortissement et le contrôle des vibrations, permettant de réaliser des applications très sensibles sur des tables optiques, même dans des laboratoires situés à proximité de voies ferrées. Consulter un fournisseur expérimenté garantit que votre table optique et votre système d'isolation sont adaptés à vos exigences spécifiques, afin d'offrir des performances maximales et une fiabilité à long terme. ●

RÉFÉRENCES

[1] Gordon, C. G. (1992). Generic criteria for vibration-sensitive equipment. In *Vibration Control in Microelectronics, Optics, and Metrology* (Proc. SPIE Vol. 1619, pp. 71–85). Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. <https://doi.org/10.1117/12.56826>

<https://www.newport.com/g/metric-table-top-finder>

<https://www.newport.com/n/compliance-and-transmissibility-curves>

<https://www.newport.com/n/optics-based-research-the-need-for-vibration-isolated-rigid-support-structures>

https://www.newport.com/medias/sys_master/images/images/h0e/h4a/8797226041374/Optical-Table-Basics.pdf

Analyseur de faisceau basé sur des boîtes quantiques colloïdales



L'analyseur de faisceau Ophir® SP301Q CQD (MKS Instruments) est basé sur une technologie de boîtes quantiques colloïdales offrant des perfor-

mances comparables à l'InGaAs, sans restriction ITAR et à coût réduit. Couvrant une large plage spectrale de 400 à 1700 nm, il est particulièrement adapté aux applications SWIR, notamment à 1550 nm. Il permet une caractérisation précise de la forme, de la taille et de la puissance des faisceaux laser, y compris à forte puissance.

<https://www.ophiropt.com/en/>

EXPANSEUR DE FAISCEAUX

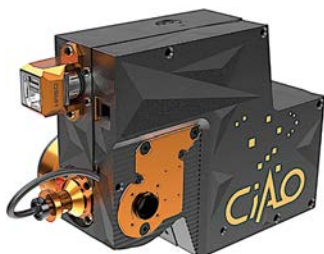


Les expandeurs de faisceau variables Gemma TECHSPEC® d'Edmund Optics offrent un réglage continu du grossissement grâce à une conception Varimag, sans changement d'optique, facilitant

l'optimisation et l'alignement du faisceau. Conçus pour supporter des puissances laser élevées, ils garantissent une excellente qualité de front d'onde et une grande simplicité d'utilisation.

https://www.edmundoptics.fr/f/gemma-variable-beam-expander/39918/?utm_source=press_release&utm_medium=print&utm_campaign=mp_4329_gemma_26&utm_content=productfamily_fr&utm_term=marketplace

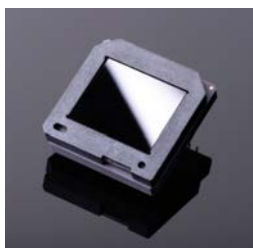
Optique adaptative pour l'imagerie haute resolution en astronomie



CIAO d'Imagine Optic est un module d'optique adaptative prêt à l'emploi qui s'intègre directement à l'oculaire des télescopes, sans modification du trajet optique. Facile à installer et à calibrer, il permet de fermer la boucle d'optique adaptative en un clic pour corriger les aberrations ou stabiliser le pointage. Il est particulièrement adapté à l'imagerie haute résolution, à l'interférométrie, à la spectroscopie et aux applications de surveillance spatiale.

<https://www.imagine-optic.com/products/ciao-adaptive-optics-system-for-telescope-and-space-applications/>

MICROBOLOMÈTRES ULTRA-COMPACTS



LYNRED lance YOCTO, une nouvelle gamme de microbolomètres non refroidis ultra-compacts au pas pixel de 8,5 µm. Le capteur YOCTO1024 au format XGA offre une forte hausse de résolution et des perfor-

mances DRI accrues, tout en réduisant fortement l'encombrement, pour les applications de loisirs, de défense et de surveillance.

www.lynred.com

Laser Femtoseconde 50W



Le laser Femtolux de EKSPLA est désormais disponible en version 50 W, aux côtés des modèles 3 W et 30

W. Il combine hautes performances femtosecondes, grande flexibilité d'utilisation et une technologie de refroidissement sec garantissant un fonctionnement sans maintenance.

<https://www.optonlaser.com/fr/laser/laser-femtoseconde-industriel-ekspla-zero-maintenance>



58 Ce Cerium	59 Pr Praseodymium	60 Nd Neodymium	61 Pm Promethium	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	71 Lu Lutetium
90 Th Thorium	91 Pa Protactinium	92 U Uranium	93 Np Neptunium	94 Pu Plutonium	95 Am Americium	96 Cm Curium	97 Bk Berkelium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Mendelevium	102 No Nobelium	103 Lr Lawrencium

Now Invent.™

THE NEXT GENERATION OF OPTICAL MATERIALS MANUFACTURERS

Bulk & lab scale manufacturers of over 35,000 certified high purity compounds, metals, and nanoparticles, including a wide range of glass and crystalline materials and precursors for optical, laser, lighting, and electronics applications, engineered to meet the most rigorous quality standards.



American Elements Opens a World of Possibilities...Now Invent!
www.americanelements.com