

Photoniques

LA LUMIÈRE ET SES APPLICATIONS

N°139

ENTRETIENS

D. Kaplan
C. Fiorini-Debuisschert

FORMATION

Former aux technologies
photoniques

COMPRENDRE

Les fibres optiques
microstructurées

ACHETER

Une caméra
infrarouge

DOSSIER

OPTIQUE & ART

- L'imagerie métaspectrale intégrée appliquée au Beatus de Saint-Sever
- Exploration de La Joconde par imagerie multispectrale
- La microscopie optique avancée pour l'étude des objets patrimoniaux
- Le bleu sans pigment : entre physique et création artistique
- Le vitrail, un filtre optique : quand la chimie et la photonique fabriquent la couleur
- L'imagerie spectrale portable pour l'étude des œuvres picturales modernes

Performance Perfected

ENHANCED UV QE

50% at 300 nm

LOW READOUT NOISE AND HIGH SPEED

ULTRA QUIET SCAN

0.30 ELECTRONS RMS at 25 fps*

STANDARD SCAN

0.43 ELECTRONS RMS at 120 fps*

HIGH RESOLUTION

4096 × 2304 9.4 MEGAPIXELS



ORCA-Quest2

Photon Number Resolving qCMOS® Camera

HAMAMATSU
PHOTON IS OUR BUSINESS

*Frame rate value in full resolution
camera.hamamatsu.com



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

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),
Jérôme Néauport (CEA),
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 impriméeur

B.P. 10

87500 Saint-Yrieix la Perche

Dépôt légal : juin 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

Regards croisés

Cœuvres d'art et découvertes scientifiques naissent souvent d'une idée, d'une première lueur qui éveille ensuite le processus créatif. Pour prendre forme, cette idée demande à être éclairée et éprouvée. S'engage alors un patient travail d'élaboration, où la maîtrise technique, qu'elle soit artistique ou scientifique, lui donne corps. Le peintre maîtrise la composition et les couleurs, le musicien le rythme et les harmonies, le scientifique le raisonnement et l'expérimentation. En science comme en art, créativité et technique sont de précieuses alliées pour donner corps aux idées nouvelles.

Pendant longtemps, cette proximité entre arts et sciences était naturelle et nombre de grandes figures se sont pleinement investies dans les deux domaines. Mais avec l'accroissement des connaissances, les disciplines se sont peu à peu spécialisées et les parcours de formation se sont différenciés. Cette évolution a pu laisser penser que la créativité est l'apanage des artistes. Or la créativité est aussi un moteur puissant de la découverte scientifique. Les grandes avancées scientifiques ne naissent pas seulement de la maîtrise technique, mais de la capacité à aborder un problème autrement, à bâtir des ponts entre les concepts et à se questionner différemment.

Le dossier de ce numéro illustre cette interconnexion entre arts et sciences. Grâce aux technologies photoniques, la lumière ne permet plus seulement d'observer les œuvres, mais aussi d'en révéler l'histoire et les techniques. Elle dévoile les matériaux, les pigments et les savoir-faire, offrant ainsi un regard nouveau sur les procédés de réalisation. En retour, la photonique enrichit la palette des artistes de nouvelles couleurs, de nouveaux matériaux et rendus visuels, stimulant le processus de création.

À l'heure où les grands défis scientifiques appellent des approches toujours plus transverses, encourager le dialogue entre les disciplines est plus que jamais une nécessité. Car c'est de ce dialogue que naîtront les idées les plus originales pour répondre aux défis de demain. Telle est aussi l'ambition de Photoniques, votre revue, de favoriser le dialogue entre les disciplines, de proposer des contenus diversifiés et de stimuler la curiosité, convaincue que les idées les plus fécondes naissent à la croisée des regards et des savoirs.



Sommaire

www.photoniques.com

N° 139

12

ENTRETIENS :

Daniel Kaplan

Céline Fiorini-Debuisschert

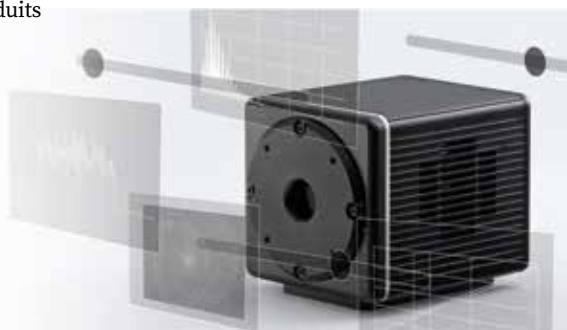


24

Exploration de *La Joconde*
par imagerie multispectrale

56

Nouveaux
produits



ACTUALITÉS

- 03 Éditorial et actualités de la SFO
- 05 Informations partenaires
- 11 Prix de la SFO
- 13 Témoignage d'entrepreneur : Daniel Kaplan
- 16 Entretien : Céline Fiorini-Debuisschert

DOSSIER : OPTIQUE ET ART

- 19 L'imagerie métaspectrale intégrée appliquée au Beatus de Saint-Sever
- 24 Exploration de *La Joconde* par imagerie multispectrale
- 29 La microscopie optique avancée pour l'étude des objets patrimoniaux
- 33 Le bleu sans pigment : entre physique et création artistique
- 37 Le vitrail, un filtre optique : quand la chimie et la photonique fabriquent la couleur
- 42 L'imagerie spectrale portable pour l'étude des œuvres picturales modernes

FORMATION

- 47 Former aux technologies photoniques : enjeux, mutations et nouvelles approches pédagogiques

COMPRENDRE

- 52 Les fibres micro-structurées

ACHETER

- 56 Une caméra infrarouge

PRODUITS

- 61 Nouveautés

Annonces

2b Lighting Technologies 25
 American Elements **IV° couv.**
 EDP Sciences 49
 EPIC 09

Hamamatsu **II° couv.**
 HTDS 27
 IDIL 45
 Micronora 41

OBS fiber 31
 Ophir 55
 Opton Laser **23, 53**
 Phasics 51

Spectrogon 15
 Trioptics 57
 WaveTel 31
 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

Optique Bourgogne Franche-Comté, miroir de la vitalité, de l'excellence et de la diversité de la communauté optique-photonique française

Le congrès Optique Bourgogne Franche-Comté s'est achevé le vendredi 10 juillet aussi formidablement qu'il a démarré le lundi précédent. Cette édition 2026 du congrès de la Société Française d'Optique s'est en effet avérée mémorable, grâce au travail remarquable d'un collectif dévoué s'appuyant sur le comité scientifique présidé par Daniel Brunner et Bertrand Kibler et sur le comité d'organisation local présidé par Guy Millot. Le soutien et la coordination de Florence Haddouche, Secrétaire Générale de la SFO, ont aussi été essentiels au succès de l'entreprise.

Avec plus de 730 inscrits, un nouveau record de participation a été établi dans la continuité de la lignée initiée à Grenoble en 2007. Le congrès a démarré en beauté par une conférence plénière d'Anne L'Huillier, prix Nobel de physique 2023, devant un amphithéâtre comble. Tout au long de la semaine, les participants ont découvert un programme incluant douze sessions plénières de très haut niveau, de nombreuses sessions spécialisées consacrées à la recherche et l'innovation, diverses sessions et ateliers dédiés à l'enseignement et la diffusion du savoir, mais également des initiatives par et pour les jeunes chercheuses et chercheurs, un évènement de théâtre forum dédié aux enjeux de la parité et une session historique passionnante. Les participants ont ainsi souvent dû faire des choix cornéliens entre les sessions et événements parallèles. Gageons qu'il s'est agi d'une saine frustration imposée par la remarquable richesse du programme reflétant l'excellence, la diversité, la force et la vitalité de notre communauté.

Véritable épicerie de l'optique-photonique française, le congrès a été un moment propice au partage, à l'émergence de nouvelles idées, à la création de collaborations et à l'ouverture vers d'autres thématiques. Il a également offert un espace d'échanges privilégié avec les acteurs industriels au travers de l'exposition, de rencontres, de démonstrations et d'échanges tout au long de la semaine. Les liens au sein de notre communauté se sont également renforcés autour de moments de convivialité et de gastronomie qui ont été très largement appréciés et partagés.

Un autre élément phare du congrès a été la remise des prix de la SFO qui ont célébré et récompensé des parcours ou des réalisations remarquables dans plusieurs dimensions liées aux missions de la SFO telles que la transmission des savoirs au travers du prix Lumières Arnulf Françon, l'innovation avec le prix Jean Jerphagnon, et la recherche à différents moments de la carrière avec les prix de thèse, le prix Fabry de Gramont, et le Grand Prix Léon Brillouin.

La barre est haute mais la dynamique est plus que jamais en place pour pérenniser ce niveau d'excellence dans deux ans. En attendant, nous vous donnons rendez-vous à Autrans pour les JNOG 2027.

Photoniquement vôtre

**Antoine Godard,
Philippe Grangier,
François Salin.**



■ Photonics & Artificial Intelligence École thématique

The Houches Physics School, France
04 – 09 avril 2027

70 participants attendus



■ JNOG, le grand colloque de la SFO

JNOG 2027 à Autrans
29 juin au 02 juillet 2027

200 participants attendus



La Société Française d'Optique remercie chaleureusement l'ensemble des congressistes, partenaires, sponsors, exposants, intervenants, bénévoles, membres des comités scientifiques et du comité local d'organisation, dont l'engagement a largement contribué au succès de cette 11^e édition d'OPTIQUE.

OPTIQUE BFC 2026 : un congrès au service des grandes missions de la SFO



Avec 730 participants, 12 conférences plénières, 276 communications orales et 230 posters, 48 exposants industriels et académiques, la 11^e édition d'OPTIQUE BFC 2026 confirme sa place de rendez-vous incontournable de la communauté française de l'optique et de la photonique. Au-delà de ces chiffres, cette édition illustre quatre évolutions majeures qui façonnent aujourd'hui l'identité du congrès.

Une nouvelle génération au cœur du congrès

Les jeunes chercheurs occupent désormais une place centrale grâce aux sessions posters, aux Prix de Thèse de la SFO, aux actions du Club Jeunes et aux nombreux échanges avec les chercheurs confirmés. Cette dynamique intergénérationnelle s'est également illustrée lors de la table ronde du Club Jeunes et du déjeuner des opticiennes, favorisant le partage d'expériences, le mentorat et la construction de nouveaux parcours scientifiques.

Une recherche et une industrie qui dialoguent davantage

L'exposition réunissant 48 exposants industriels et académiques, les Platinum Talks d'Exail et de Vescent, les ateliers pratiques et pédagogiques ainsi que les démonstrations ont renforcé les interactions entre recherche académique et industrie. Ces formats favorisent les échanges, stimulent les collaborations et accélèrent le transfert des innovations vers les applications.

Un congrès qui s'ouvre à la formation et à la transmission des savoirs

L'édition 2026 a renforcé l'ouverture du congrès vers le monde de l'enseignement avec l'accueil de plus de 60 enseignants, dans le cadre du projet LUMIFORM et de l'action « Venez au congrès ». Pendant trois jours, ils ont découvert les avancées de la recherche, les innovations industrielles et des ressources pédagogiques innovantes destinées à accompagner la formation, du BAC au BAC+3.

Parallèlement, les Tutoriels d'Horizon ont favorisé le décloisonnement entre les différentes spécialités de l'optique, tandis que les Rencontres Enseignement de l'Optique et Didactique (REOD), la session pédagogique et la session Histoire & Patrimoine ont renforcé les passerelles entre recherche, enseignement, culture scientifique et pédagogie.

Une société savante qui accompagne toutes les étapes d'une carrière

Les distinctions remises par la SFO illustrent la diversité de ses missions. Des Prix de Thèse au Grand Prix Léon Brillouin, en passant par les Prix Jean Jerphagnon, Fabry-de-Gramont et Lumières Arnulf-Françon, elles récompensent l'excellence scientifique, l'innovation et la transmission des savoirs. Le congrès a également distingué le meilleur poster de la session Nanophotonique, remis dans le cadre du partenariat avec le PEPR LUMA, soulignant la qualité des travaux présentés par les jeunes chercheurs.

OPTIQUE BFC 2026 confirme l'évolution du congrès vers un rendez-vous fédérateur où se rencontrent recherche, industrie, enseignement et diffusion des connaissances. Plus qu'un lieu de présentation des résultats scientifiques, le congrès devient un espace de transmission, de dialogue et de construction collective au service de l'ensemble de la communauté optique-photonique.

L'Europe veut-elle perdre la lumière ? Pourquoi la France doit peser dans le débat FP10

La photonique est l'une des rares deep tech où l'Europe excelle encore avec une croissance structurelle de 7 %. Mais la part de la Chine dans le marché mondial est passée de 10 % en 2005 à 32 % en 2022 (données Photonics21). Pendant ce temps, plus de 50 % des entreprises photoniques européennes dépendent de composants chinois.



La photonique sous-tend 20 % du PIB européen et structure les chaînes de valeur de la défense, de la santé, du spatial, de l'IA et du calcul quantique. Sans photonique européenne souveraine, les ambitions d'autonomie stratégique resteront lettre morte.

Photonics France, les associations nationales européennes, Photonics21 et

EPIC militent pour la création d'un programme autonome, équivalent du PPP actuel, de 2 milliards d'euros dans le futur Programme Cadre FP10. Ceci hors technologie PICs couverte par le Chips Act 2 qui lui ne couvre pas les autres technologies photoniques (lasers, optique de précision, imagerie, fibres, capteurs).

Photonics France agit très activement auprès du gouvernement et de la Communauté européenne pour la défense de nos intérêts. Le soutien des technologies photoniques est crucial pour préserver notre économie et notre souveraineté et inverser la tendance engagée avec la Chine. La fenêtre se ferme en 2026.

French Photonics Days 2026 : rendez-vous à Grenoble

Photonics France, SupOptique Alumni et Minalogic vous donnent rendez-vous les 9 et 10 novembre à Grenoble pour la 8^e édition des French Photonics Days, avec le soutien de la Région Auvergne-Rhône-Alpes, du CEA-Leti, d'OPTICA, de l'IESF et de la SFO.

Cet événement est organisé sur deux jours à la Maison MINATEC à Grenoble sur le thème : « Photonique et innovation : la lumière au cœur des technologies de demain ».

Conçu pour un public technique mais non spécialiste, l'événement a pour objectif de faire le point sur le développement de nouvelles technologies photoniques et leurs applications, découvrir les thèses en cours sur les thématiques évoquées en conférences, et visiter en exclusivité des entreprises et des plateformes technologiques de Grenoble.

Programme et inscription sur le site dédié à l'événement : <https://fpd2026.fr>.



Bienvenue à notre nouvel adhérent !



R&D Vision, groupe français spécialisé dans la conception, la fabrication, la qualification et l'industrialisation de solutions innovantes intégrant technologies optiques et Intelligence Artificielle. Leur expertise est mise au service de leurs clients pour analyser, concevoir et réaliser des systèmes d'imagerie sur-mesure et adaptés à chaque problématique et à chaque environnement.

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 :

■ **After Photonics**
15 septembre 2026 – Paris

■ **Rencontre avec nos adhérents**
17 septembre 2026 – Webinaire

■ **French Photonics Days**
9-10 novembre 2026 – Grenoble

■ **SPIE Photonics West**
2-4 février 2027 – San Francisco

■ **Global Industrie**
15-18 mars 2027 – Lyon

CONTACTER PHOTONICS FRANCE

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

Fusion nucléaire : l'énergie du futur s'invente en Nouvelle-Aquitaine



Un événement inédit consacré à la fusion nucléaire se prépare, à deux pas du CEA/Cesta et de l'emblématique Laser Mégajoule, sur le site du Barp près de Bordeaux.

Depuis plus de 20 ans, industriels, centres technologiques et laboratoires ont uni leurs expertises pour faire du Laser Mégajoule une réussite scientifique et technologique majeure. Aujourd'hui, il est temps de mettre en lumière celles et ceux qui ont construit cette aventure exceptionnelle... et qui dessinent déjà la suite.

Le pôle ALPHA-RLH et ses partenaires Amplitude et GenF, avec le soutien du CEA et de la Région Nouvelle-Aquitaine, vous donnent rendez-vous les 25 & 26 novembre 2026 à l'Institut Lasers et Plasmas, pour un événement dédié à l'innovation, aux savoir-faire et aux collaborations qui feront émerger les technologies de demain.

Acteurs historiques et nouvelles générations se réuniront pour partager une vision commune : accélérer l'avènement d'une énergie propre, durable et souveraine.

Programme et inscription à venir sur www.alpha-rlh.com

AGENDA

■ **EUROPHOTON**
21 au 25 septembre 2026 à Arcachon

■ **INPHO Venture Summit**
22 et 23 octobre 2026 à Bordeaux

■ **Fusion nucléaire : l'énergie du futur s'invente en Nouvelle-Aquitaine**
25 et 26 novembre 2026 au Barp

Tous les événements sur
www.alpha-rlh.com

Retour sur le Forum des adhérents 2026

Le Forum des adhérents du pôle s'est déroulé le 3 juin dans le superbe cadre de l'Institut Culturel Bernard Magrez à Bordeaux. Près de 250 participants - adhérents et partenaires - étaient présents à cet événement annuel incontournable. Plusieurs temps forts ont rythmé cette journée riche en échanges pour favoriser et renforcer les synergies entre les acteurs de l'écosystème du pôle :



- L'Assemblée Générale : bilan d'activité 2025 & perspectives 2026,
- Le discours d'Alain Rousset, Président de la Région Nouvelle-Aquitaine,
- L'intervention de l'Association Française des Pôles de Compétitivité sur l'implication active et stratégique du pôle dans l'AFPC & les perspectives de la phase 6 des pôles de compétitivité,
- Un focus sur le projet ASTEERICS, le centre de compétences français en micro-électronique,
- La présentation par Thales du projet TESSALIA d'installation d'une usine de semi-conducteurs au Barp près de Bordeaux, spécialisée en packaging, assemblage et test avancés de puces électroniques en mode SiP (System in Package),
- Un concours de pitches adhérents, remporté par la société FineHeart, qui conçoit des dispositifs médicaux basés sur des technologies innovantes dans le domaine cardiovasculaire,
- Un espace showroom qui a permis à 16 adhérents de présenter leur expertise et leurs technologies.

Un grand merci au Groupe ALTRAD/ENDEL/CERAP et à Edmund Optics, partenaires officiels du Forum, pour leur soutien et leur contribution à la réussite de cette journée.

PLI CONFÉRENCES 2026 : LIMOGES, CAPITALE ÉPHÉMÈRE DU LASER INDUSTRIEL



Les 1^{er} et 2 juillet 2026, la communauté laser s'est donné rendez-vous à Limoges pour la nouvelle édition des PLI Conférences, organisées par le Club Laser et Procédés en partenariat avec ALPHANOV. Le pôle ALPHA-RLH a eu le plaisir de soutenir cet événement.

Pendant deux jours, 160 participants venus de

9 pays ont pu suivre 38 conférences consacrées au micro-usinage, au soudage, à la fabrication additive ou encore à l'intelligence artificielle appliquée aux procédés laser - signe que le secteur avance vite, et sur tous les fronts à la fois.

Une table ronde sur les céramiques techniques, organisée avec CAILABS, et une session posters dédiée aux doctorants, en collaboration avec l'Institut Fresnel, ont notamment marqué les esprits.

30 exposants et 1 soirée networking dans le cadre enchanteur de la Chapelle Saint-Martin ont achevé de faire de cette édition un rendez-vous où se croisent, plus que jamais, chercheurs et industriels.

Prochaine étape : Rennes, en septembre 2027

Assemblée Générale de Photonics Bretagne : cap sur le spatial et nouvelle gouvernance



Placée sous le signe du spatial, l'Assemblée Générale annuelle de Photonics Bretagne a réuni fin juin son réseau à Perros-Guirec. Les 95 participants ont assisté à la présentation du bilan 2025 et ses ambitions stratégiques

futures, au renouvellement de la gouvernance, aux pitches de certains nouveaux adhérents, ainsi qu'à différentes conférences d'adhérents en lien avec la thématique spatiale.

Élection du nouveau Directoire

Temps forts de cette journée, les adhérents ont élu le nouveau Directoire composé de 12 administrateurs. **Nicéphore Nicolas (Exail) a été élu Président de Photonics Bretagne** pour un mandat de trois ans, succédant à Patrice Le Boudec (IDIL). Afin de refléter au mieux la réalité et le dynamisme de l'écosystème photonique en Bretagne, le nouveau Bureau s'organise désormais par ancrage géographique grâce à trois Vice-Présidents : Thierry Georges (Oxxius) pour Lannion, Mélinda Métivier (Arlumen) pour Brest et Samuel Poulain (Le Verre Fluoré) pour Rennes. Le Bureau compte également Patrice Le Boudec en tant que Trésorier (IDIL), Estelle Keraval en tant que Trésorière adjointe (Anticipa) et Damien Deubel en tant que Secrétaire (Kerdry/HEF Groupe). Ce nouveau directoire est également complété par Jean-François Morizur (Cailabs), David Vignal (Lumibird), Alain Terpent (Agence Bretagne Next), Pascal Besnard (ENSSAT), et Mehdi Alouini (Institut FOTON).

Bienvenue aux nouveaux adhérents

Accueillant au sein de son réseau 7 nouvelles structures, le cluster compte désormais 112 adhérents : Institut Photonique (pôle d'excellence en photonique dans le Grand-Est), A. Lanoux (distribution et installation de circuits de fibres optiques commerciaux, réseaux privés, bâtiments collectifs), Cobelty (conseil, standardisation, normalisation technologique, veille et propriété intellectuelle), RDT (bureau d'études implanté en Bretagne), ICON Photonics (interconnexions pour PIC), ScaleAmi (conseil et stratégie de développement de start-ups deeptech), et OptonLaser (distribution de produits laser et instrumentation Raman/MIR).

PHOTON2STARTUP DAYS : INSCRIVEZ-VOUS !



Vous êtes doctorant, post-doctorant, jeune ingénieur diplômé, ou étudiant en dernière année en photonique, quantique ou physique des matériaux (français ou étranger) ? Venez participer à cet événement unique de trois jours, entièrement en anglais, pour présenter votre thèse, découvrir les dernières avancées de la recherche en photonique, et prendre part

à un atelier de création fictive de startup qui vous permettra de révéler votre potentiel entrepreneurial ! Au programme également : conférences, entretiens individuels avec des chefs d'entreprise, réseautage, et visites d'entreprises et laboratoires locaux. Le tout dans une ambiance conviviale face à la mer (Bretagne). L'événement est gratuit : tous les frais sur place sont pris en charge (transport, repas, hébergement) et une bourse de voyage est possible dans la limite de 250€, sous conditions. Attention, le nombre de places est limité ! Inscrivez-vous vite ! + d'infos et inscription via le QR code.

Médaille de cristal du CNRS 2026 : Mathilde Gay à l'honneur



L'excellence en ingénierie de recherche en photonique est à nouveau récompensée. Mathilde Gay, ingénieure de recherche à l'Institut FOTON (CNRS / Université de Rennes / ENSSAT), est lauréate de la prestigieuse médaille de cristal du CNRS 2026.

Spécialiste reconnue des télécommunications optiques à très haut débit et de l'optique intégrée, elle assure la responsabilité de la plateforme expérimentale PERSYST à Lannion, aux côtés de Laurent Bramerie et Sébastien Lobo. Cette infrastructure de pointe constitue un levier majeur pour le test et la caractérisation de composants et systèmes optiques avancés, accompagnant aussi bien la recherche académique fondamentale que les projets d'innovation industrielle. En lui décernant cette médaille (remise officielle le 24 novembre à Rennes), le CNRS salue son expertise technique d'exception, sa maîtrise des enjeux scientifiques et son rôle moteur dans le rayonnement de la filière photonique française.

AGENDA

■ ECOC
20-24 septembre,
Malaga (Espagne)

■ Matching Mission
PhotonQBoost
8-9 octobre,
Stuttgart (Allemagne)

■ Photon2Startup Days
26-28 octobre, Lannion

En bref

Félicitations à Elsa Huby, diplômée de l'Institut d'Optique, lauréate du Grand Prix scientifique 2026 de la Fondation Charles Defforey - Institut de France. Ce prix récompense son projet FIRST (Fibred Imager for a Single Telescope), qui vise à repousser les limites de la résolution angulaire des télescopes grâce à des approches innovantes en astrophotonique.



AGENDA

■ La lumière dans tous ses états
4 et 5 octobre à Palaiseau

■ Journées portes ouvertes de l'Institut d'Optique d'Aquitaine
9 au 11 octobre à Talence

■ French Photonics Days
6 et 7 novembre

■ Forum de la Photonique
14 novembre au bâtiment 503 - Campus d'innovation (Orsay)

■ Gala SupOptique
15 novembre à Paris

■ Remise des diplômes de la promotion 2025
12 décembre à l'ENS Paris-Saclay

Tous les événements sur
www.alpha-rlh.com

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

Une doctorante du Laboratoire Charles Fabry récompensée pour une innovation en lasers de haute énergie

Lisa Lallemand, doctorante CIFRE au Laboratoire Charles Fabry (CNRS, Institut d'Optique, Université Paris-Saclay) et chez EFFILUX, a reçu le Prix Créativité lors du challenge Starthèse - Start'up Pitch-iD 2026 du Pôle universitaire d'innovation - Innovation Alliance Université Paris-Saclay. Son projet, AleD-X, propose une approche innovante du pompage des lasers de haute énergie grâce à des concentrateurs luminescents alimentés par des LED. Cette technologie, issue de travaux menés au laboratoire avec François Balembois, en collaboration avec Jean-Philippe Blanchot, François Sylla, Federico Canova et Alexandre Cottureau, ouvre la voie à des sources laser plus performantes et plus efficaces. Diplômée de l'Institut d'Optique et de l'Imperial College London, Lisa Lallemand participera à une learning expedition au MIT dans le cadre du parcours InnovAction de l'Université Évre Paris-Saclay.



© Christophe PEUS

LE LABORATOIRE HUBERT CURIEN CÉLÈBRE SES 50 ANS

Le Laboratoire Hubert Curien (Université Jean Monnet, CNRS, Institut d'Optique) a fêté le 9 juillet dernier ses 50 ans, marquant un demi-siècle de recherche, d'innovation et de collaborations scientifiques au service des grands enjeux de notre société.

Reconnu pour son expertise en optique, photonique, imagerie, surfaces, intelligence artificielle et cybersécurité, ce laboratoire de recherche mène des travaux fondamentaux aux applications variées, de l'industrie à la santé, en passant par l'énergie, la défense et l'environnement. Fort de près de 260 collaborateurs, le laboratoire s'appuie sur des plateformes technologiques de pointe et sur un réseau de partenariats académiques et industriels pour développer des technologies à fort impact et contribuer au rayonnement international de la recherche française.

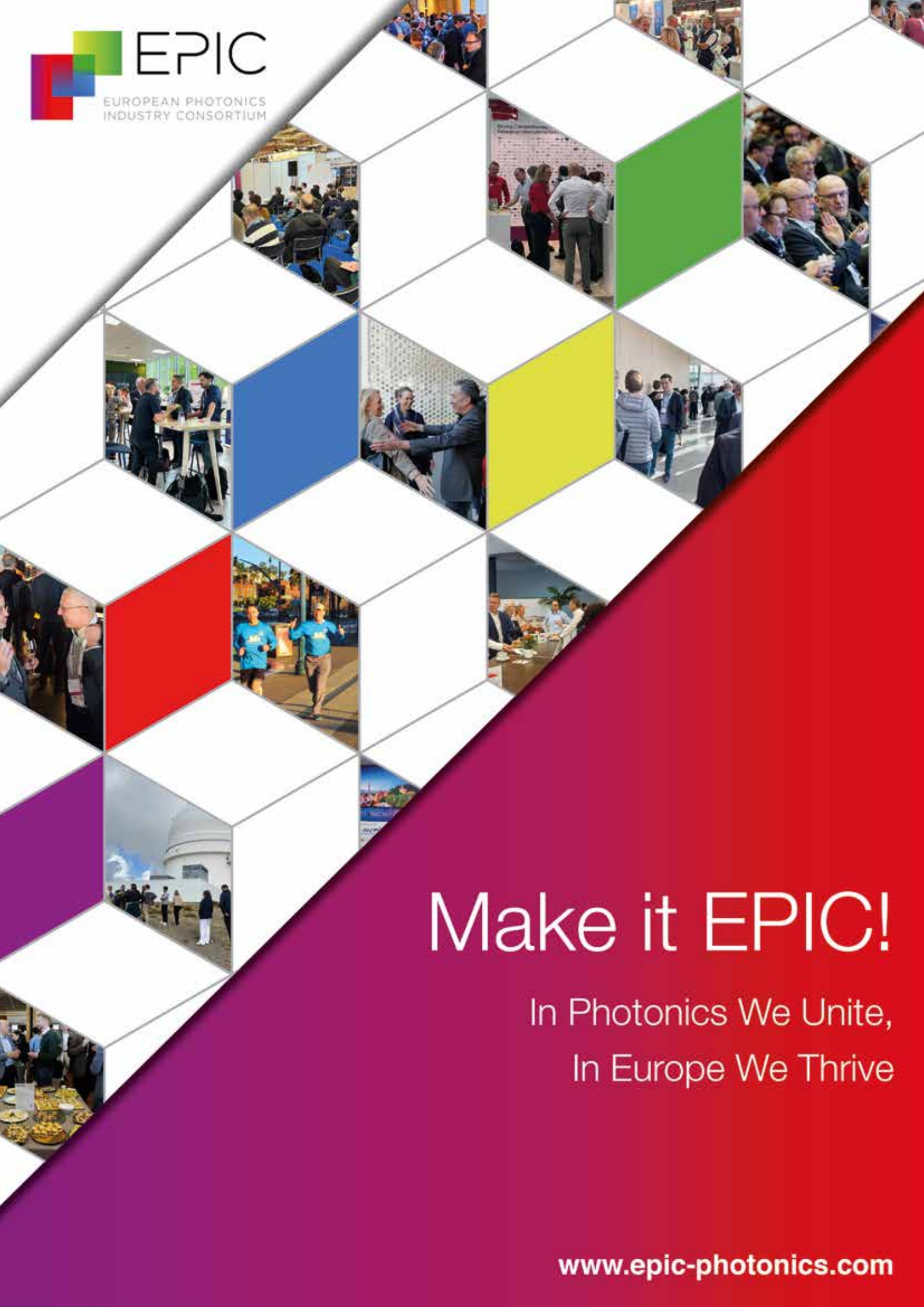
Félicitations à l'ensemble des équipes qui font vivre ce laboratoire depuis 50 ans et qui continuent, chaque jour, à faire avancer la recherche et l'innovation !

Un nouveau TP inspiré d'une expérience historique de la physique quantique

À partir de la rentrée 2026, le Laboratoire d'Enseignement Expérimental (LEnSE) accueillera un nouveau TP (travail pratique) : « Interférences de photons uniques - l'expérience GRA ».

Ce TP est une adaptation pédagogique de l'expérience fondatrice réalisée en 1986 par Philippe Grangier, Gérard Roger et Alain Aspect, qui a marqué l'histoire de l'optique quantique en mettant en évidence le comportement des photons uniques. À travers un unique dispositif expérimental, les élèves-ingénieurs observent à la fois le comportement ondulatoire de la lumière, grâce aux interférences, et sa nature corpusculaire, à travers la détection de photons uniques.

Ce banc expérimental a été développé par cinq élèves-ingénieurs de deuxième année dans le cadre d'un de leurs projets. Ils ont eu l'honneur de le présenter à Philippe Grangier et Alain Aspect qui ont visité avec grand plaisir cette nouvelle plateforme pédagogique !



Make it EPIC!

In Photonics We Unite,
In Europe We Thrive

Actualités

Ilhem Elgargouri, en postdoctorat à l'UTT au sein du laboratoire L2n - CNRS-UMR 7076 dans le cadre d'un projet en collaboration avec Sorbonne Paris, LISI automotive et Plasmatreat, a remporté le prix de la meilleure présentation à l'occasion de la 6^e conférence internationale « Materials Science, Engineering and Technology » à Singapour du 5 au 7 mai 2026. Sa présentation était intitulée « Green Engineering of Functional Thin Films for Sustainable Nanotechnology »

Conférence META-26, Dublin, 14-17 juillet 2026

<https://metaconferences.org/META26/index.php/META>

Workshop du laboratoire LN2, IRL CNRS basée à Sherbrooke, 7-9 juillet 2026

<https://www.usherbrooke.ca/ln2/actualites/nouvelles/details/57262>

La phase de recrutement des étudiants master se termine : plus de 25 nouveaux étudiants originaires de nombreux pays intégreront NANO-PHOT en septembre 2026.

Microscopie optique à l'École – GDR Imabio



La microscopie optique, des animaux aux végétaux en passant par les cristaux, aux plus jeunes.

Il a pour objectif de fournir des supports techniques et pédagogiques aux enseignants dans le cadre de leurs projets éducatifs.

Coordonnée par Marie-Noëlle Soler (Institut Curie) et Frédéric Bolze (Université de Strasbourg), cette action permet la mise à disposition de kits à destination des écoles primaires. Dans le cadre d'un projet pédagogique élaboré par les professeur-e-s des écoles, le prêt d'un des kits est planifié selon leur disponibilité, sur une période pouvant aller jusqu'à un trimestre. Pour toute conception d'atelier, l'enseignant qui utilise le kit bénéficie d'une assistance pédagogique et technique afin d'utiliser au mieux le matériel fourni.

Chaque kit contient, en plus d'un lot de petit matériel, des échantillons (règnes animal et végétal et autres supports « communs »), 10 loupes binoculaires et un microscope. Des fiches descriptives sont proposées pour apporter des informations pratiques aux professeurs des écoles. Un fil conducteur est fourni pour aider au déroulement des différents ateliers.

Pour toute demande d'information, contacter Marie-Noëlle Soler (marie-noelle.soler@curie.fr) ou Frédéric Bolze (frederic.bolze@unistra.fr).

AGENDA

■ **Conférence NFO18**
31 août-3 septembre 2026,
Brno
<https://nfo18.org/>

■ **Journées de la matière condensée**
26-30 octobre 2026,
Toulouse
<https://jmc2026.sciencesconf.org/>

■ **Rentrée master UTT**
7 septembre 2026

CONTACT

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

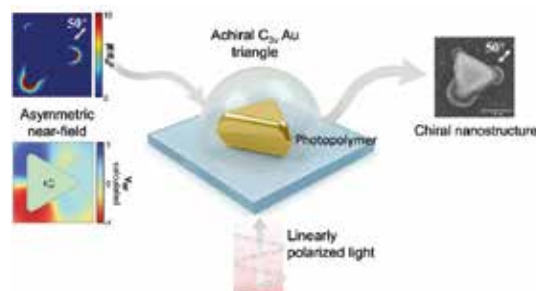
NOUVEAUX PARADIGMES EN CHIRALITÉ OPTIQUE

La chiralité joue un rôle crucial dans les interactions entre la lumière et la matière. Alors que la plupart des recherches se sont concentrées sur l'interaction entre les structures chirales et la lumière chirale, la nanophotonique ouvre de nouvelles voies et paradigmes !

Dans le cadre de la thèse de Minyu

CHEN, doctorante de la graduate school NANO-PHOT, sur des nanostructures plasmoniques achirales (nanotriangles d'or à symétrie C_{3v}) excitées par la lumière polarisée linéairement, des chercheurs du laboratoire L2n (CNRS UMR 7076) ont étudié la chiralité du champ optique proche. La rupture de symétrie miroir du champ a été quantifiée par rapport aux trois plans miroirs du nanotriangle. Les cartes d'asymétrie en champ proche dérivées des simulations et de l'imagerie en champ proche permettent une meilleure compréhension de la redistribution des points chauds chiraux. L'étude repose sur une méthode de polymérisation à deux photons, assistée par plasmons, comme enregistreur de champ proche qui convertit le champ plasmonique en topographie 3D polymère permanente.

Plus d'informations sur : <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsnano.5c22237>



Grand Prix Léon Brillouin et inauguration des prix de thèse de la SFO

C'est lors du congrès Optique BFC 2026 que s'est déroulée la cérémonie de remise du Grand Prix Léon Brillouin de la Société Française d'Optique. Les lauréats sont Guy Millot et Benoît Boulanger, deux figures majeures de l'optique non-linéaire et de la communauté optique française. Le congrès fut également l'occasion de célébrer et de remettre les premiers Prix de thèse de la SFO.



Une distinction qui ne surprend personne, tant leurs contributions à l'optique non-linéaire ont marqué la discipline. Les présentations de ces 2 chercheurs d'exception ont permis à l'auditoire de découvrir l'étendue et la portée de leurs travaux et de leur carrière scientifique. Si ce prix couronne des recherches remarquables en optique non linéaire, il distingue aussi un engagement sans faille envers la communauté scientifique. Car au-delà de leurs découvertes, c'est également l'héritage scientifique et humain apporté par les 2 lauréats qui a séduit le jury.

Guy Millot : des solitons aux peignes de fréquences

Guy Millot s'est rapidement imposé comme une référence internationale en optique non linéaire. Son parcours, marqué par une thèse en 1986, un post-doctorat au MIT, puis son arrivée à l'Université de Bourgogne en 1988, l'a conduit à fonder, en 2012, le département d'optique

du laboratoire ICB, avant d'être nommé directeur adjoint du laboratoire.

Après des travaux pionniers en spectroscopie laser, Guy Millot se tourne vers les solitons dans les fibres optiques et les phénomènes d'instabilité de modulation associés. Il découvre de nouvelles structures non linéaires, telles que les similaritons Raman et les ondes scélérates, et met en évidence un phénomène original d'attraction de polarisation de la lumière. Il est l'un des pionniers de l'étude des dynamiques non linéaires dans les fibres optiques multimodes. Ses travaux conduisent notamment à la découverte de l'instabilité paramétrique géométrique et révèlent un mécanisme spectaculaire d'auto-organisation de la lumière, ouvrant un vaste champ de recherche sur les instabilités spatio-temporelles dans les systèmes optiques complexes. Il se tourne ensuite vers un nouveau défi scientifique en introduisant le concept de peignes de fréquence électro-optiques et de spectroscopie à deux peignes électro-optiques. Ces

approches, désormais largement utilisées en métrologie et en spectroscopie de haute précision, ont notamment permis de nouvelles applications pour la mesure de rapports isotopiques.

Au fil de sa carrière, il a constitué une équipe de recherche de renommée internationale. Son parcours illustre une aptitude rare à ouvrir de nouveaux champs de recherche, devenus des références en optique non linéaire moderne.

Guy Millot a été récompensé par la médaille d'argent du CNRS en 2004. Il a été nommé à deux reprises à l'Institut ●●●



Universitaire de France, élu Fellow des sociétés européenne (EOS) et américaine d'optique (Optica) et a reçu le prix de la Fondation iXcore. Soulignons également son engagement déterminant pour la communauté scientifique. Et qui pourrait oublier son rôle décisif dans l'organisation du congrès Optique 2021 à Dijon ? Un congrès marquant et mémorable, rendu d'autant plus remarquable par les défis imposés par la crise sanitaire.

Benoît Boulanger : des cristaux non linéaires aux technologies quantiques

Benoît Boulanger, reconnu internationalement pour ses travaux en optique non linéaire cristalline, a marqué son domaine par des contributions majeures, tant théoriques qu'expérimentales, à l'interface entre physique des matériaux et photonique, abordant aussi bien la croissance des cristaux que leur caractérisation, leur modélisation ou leur intégration dans des dispositifs innovants. Après une thèse de doctorat à l'Université de Nancy soutenue en 1989, il est chargé de recherche au CNRS à Nancy, puis à Stanford (1993-1994) et à Dijon, avant d'être nommé Professeur à l'Université Grenoble Alpes en 2000. Il y dirigera le Laboratoire de Spectrométrie Physique,



puis co-fondera l'Institut Néel en 2007 dont il deviendra directeur adjoint. Parmi ses réalisations les plus marquantes, on retient ses recherches sur les cristaux de KTP, qui ont conduit à la création de la société Cristal Laser en 1990. Il a apporté des contributions majeures sur le phénomène de gray-tracking, le formalisme du tenseur champ, ou encore la méthode de la sphère pour analyser les propriétés optiques des cristaux. Le jury a également souligné ses contributions au développement de dispositifs exploitant le quasi-accord de phase angulaire et les cristaux cylindriques avec transfert de technologie vers la société américaine JDS Uniphase. Plus récemment, il se distingue en optique non linéaire quantique avec des travaux pionniers sur la génération et la modélisation des triplets de photons.

Ses travaux ont déjà été récompensés par la médaille de bronze du CNRS en 1993, le prix de la Fondation iXcore en 2009 et le prix Roberval en 2016. Il est Fellow des sociétés européennes (EOS) et américaines (OPTICA) d'optique. Ce qui frappe également dans le parcours de Benoît Boulanger, c'est son engagement pour animer et structurer la communauté scientifique. Organisateur d'écoles, d'ateliers, de conférences nationales et internationales, il a aussi fondé le réseau Cristaux massifs et dispositifs pour l'optique du CNRS. Et n'oublions pas son rôle à la SFO : il a été co-président du tout premier congrès Optique, à Grenoble en 2007, et a été président de la SFO.

Excellence scientifique et transmission du savoir

En récompensant Guy Millot et Benoît Boulanger, la SFO ne salue pas seulement deux chercheurs d'exception. Elle met aussi en lumière deux scientifiques qui ont construit des équipes, formé des générations de doctorants, et fait rayonner l'optique française bien au-delà des frontières. Car c'est peut-être là que se trouve la vraie force de leur travail, savoir allier excellence scientifique et transmission du savoir. ●

LANCEMENT DES PRIX DE THÈSE DE LA SFO : UN COUP DE PROJECTEUR SUR LES JEUNES TALENTS

Nouveauté majeure lors du congrès de Dijon : l'inauguration des Prix de thèse de la SFO. La SFO avait à cœur de lancer ce prix de thèse afin de pouvoir récompenser chaque année les meilleurs travaux de doctorat en optique et photonique, et mettre en avant la jeune génération. Parmi ces 5 prix, un est réservé aux thèses menées en collaboration avec l'industrie.

Le succès fut au rendez-vous de cette première édition puisque le jury, coordonné par le club Horizons de l'Optique, a examiné pas moins de 32 candidatures. Un succès retentissant pour cette première édition qui prouve, s'il en était besoin, tout le dynamisme de la communauté de l'optique française.





Témoignage d'entrepreneur : Daniel Kaplan

Co-fondateur avec Pierre Tournois de Fastlite, entreprise spécialisée dans le contrôle et la mesure d'impulsions ultracourtes.

<https://doi.org/10.1051/photon/202613913>

COMMENT VOUS ÊTES-VOUS INTÉRESSÉ AUX SCIENCES ET QUEL A ÉTÉ VOTRE PARCOURS ?

Comme beaucoup de scientifiques de ma génération, tout a commencé très tôt et de manière très concrète. Adolescent, je bricolais des postes de radio dans la salle de bain familiale. J'avais une quinzaine d'années, et déjà ce goût très fort pour l'expérimentation, pour le fait de comprendre en faisant. Ce rapport direct à la matière, à l'électronique et à l'instrumentation a été fondateur. J'ai ensuite intégré l'École polytechnique, puis je suis entré au CNRS dans la foulée, comme c'était assez courant à l'époque, ce qui m'a permis de m'engager très tôt dans la recherche. J'y ai réalisé une thèse d'État, soutenue en 1969 sous la direction de Ionel Solomon, sur la résonance magnétique électronique dans les semiconducteurs. C'était une période extrêmement formatrice : nous développons nous-mêmes nos dispositifs expérimentaux, notre électronique, notre instrumentation. Cette culture du « faire » a profondément structuré ma manière de travailler.

Après ma thèse, je suis parti en post-doctorat chez IBM, à Yorktown Heights, où j'ai travaillé sur le silicium amorphe et sa caractérisation par résonance magnétique. J'y ai découvert un environnement de recherche industrielle très avancé, avec des moyens considérables.

À mon retour, j'ai rejoint au laboratoire central de Thomson-CSF à Corbeville, une équipe de physiciens qui venait d'être créée par Albert Zylbersztein, avec l'ambition de développer une recherche relativement fondamentale au sein d'un grand groupe industriel, en interaction avec le monde académique. À l'origine, je ne suis donc pas opticien, mais physicien de la résonance magnétique et des semi-conducteurs.

L'optique est entrée plus tard, progressivement, au fil des projets.

COMMENT S'EST DÉROULÉE LA SUITE DE VOTRE CARRIÈRE ?

Un tournant important a été ma rencontre avec Pierre Tournois. Au début des années 1980, il m'a proposé de rejoindre la Compagnie Générale de Radiologie comme directeur scientifique. J'y ai passé cinq années particulièrement riches au moment où se développaient les grandes technologies d'imagerie médicale : scanner, IRM, radiologie numérique. Même si mon expertise en résonance magnétique a joué un rôle, mes responsabilités couvraient l'ensemble des activités scientifiques. Cela impliquait d'avoir une vision globale de l'imagerie, dans toute sa diversité physique.

Après le rachat par General Electric, je suis revenu chez Thomson-CSF pour diriger le laboratoire central de Corbeville. Ensuite ayant atteint le niveau maximal de responsabilités opérationnelles pour un scientifique dans un grand groupe, j'ai choisi de m'orienter vers une activité plus libre, à l'interface entre industriels et laboratoires publics. Je pilotais des projets de recherche, souvent en co-direction avec des équipes académiques. C'est dans ce contexte que j'ai commencé à travailler à l'Université du Michigan, dans l'environnement de Gérard Mourou, inventeur de l'amplification laser CPA (Chirped Pulse Amplification), sur les lasers ultrarapides et leurs applications, notamment pour des systèmes radar. C'est là que l'optique est devenue centrale dans mon parcours.

COMMENT AVEZ-VOUS CRÉÉ FASTLITE ?

Fastlite est née d'une amitié scientifique avec Pierre Tournois, mais son histoire

commence en réalité quelques années plus tôt. Pierre fréquentait également le laboratoire de G. Mourou, car il était passionné des problèmes de compression d'impulsion. On pourrait dire que l'origine de Fastlite remonte aux années 60 avec l'interféromètre de Gires-Tournois (GTI, premier dispositif de compression laser, inventé un an après le premier laser solide). En cette fin des années 1990, nous explorions déjà tous les deux la possibilité de développer une activité de petite entreprise technologique autour des lasers ultrarapides. Un premier projet avait été lancé au sein de Medox, une société créée dans l'environnement de Gérard Mourou et spécialisée notamment dans des composants destinés aux premiers systèmes CPA. Avec Pierre Tournois, nous y avons investi personnellement pour développer un nouveau produit : une caméra à balayage de fente ultra-rapide. Le principe consistait à synchroniser le balayage par un photoconducteur avec des impulsions ultracourtes afin d'atteindre des résolutions temporelles extrêmes. C'était une instrumentation très spécialisée, mais parfaitement cohérente avec les compétences de Medox et notre culture scientifique et instrumentale. Lorsque Medox a finalement été reprise par Thomson-CSF et que ce projet n'a pas été poursuivi, nous avons récupéré une partie de notre investissement. Nous nous sommes alors posé une question très simple : remplacer cet argent ou créer notre propre entreprise ? La décision a été immédiate. Nous avons créé Fastlite en 1999.

VOUS CRÉEZ DONC FASTLITE APRÈS UNE LONGUE CARRIÈRE

Exactement, c'est ce qui rend cette création un peu particulière : j'avais alors près ● ● ●

de soixante ans et Pierre Tournais quelques années de plus. Cela nous donnait une liberté considérable : nous avions l'expérience, un réseau scientifique solide et surtout une indépendance financière qui nous permettait d'entreprendre sans pression extérieure ni levée de fonds. Contrairement à beaucoup de jeunes entrepreneurs, nous n'avions pas à arbitrer entre recherche scientifique et besoin de croissance immédiate. Nous pouvions avancer à notre rythme, réinvestir directement dans le développement des produits et prendre des décisions essentiellement guidées par la pertinence scientifique et technologique. Avec le recul, je pense que cette indépendance a joué un rôle majeur dans les premières années de Fastlite.

DANS QUELLES CONDITIONS AVEZ-VOUS COMMENCÉ VOS ACTIVITÉS ?

Les débuts ont été très modestes : quelques bureaux préfabriqués sur le parking du campus de l'École polytechnique, une petite équipe composée principalement de docteurs ès-sciences (dont T. Oksenhendler, N. Forget et R. Herzog) et une organisation extrêmement légère. Chacun faisait un peu tout : recherche, électronique, logiciel, essais chez les clients, installation des systèmes et même activité commerciale. Il faudra quelques années avant que Fastlite se dote d'un directeur opérationnel (Pascal Tournais) et d'un responsable commercial (H. Jousselin).

COMMENT AVEZ-VOUS DÉVELOPPÉ VOTRE PRODUIT PHARE BASÉ SUR LES MODULATEURS ACOUSTO-OPTIQUES ?

En parallèle du développement des caméras, Pierre Tournais travaillait depuis longtemps sur un problème fondamental des systèmes CPA : comment contrôler finement l'étalement et la recompression d'impulsions ultracourtes sur de très grandes dynamiques temporelles. À l'époque, les solutions programmables existaient déjà mais reposaient essentiellement sur des architectures optiques volumineuses : des lignes dites 4F intégrant des éléments de contrôle de phase, souvent des cristaux liquides. Ces systèmes occupaient facilement près d'un mètre de longueur optique. L'idée de Pierre a été radicalement différente : remplacer cette architecture entière

par un composant programmable où tout le contrôle est réalisé directement dans un cristal acousto-optique de quelques centimètres. Le concept est simple lorsqu'on le comprend : pendant la durée extrêmement courte de l'impulsion laser, l'onde acoustique peut être considérée comme figée. Elle agit alors comme un réseau programmable transférant la phase spectrale de l'onde acoustique à l'impulsion optique. Mais cette idée était nouvelle pour la communauté des opticiens habitués à utiliser ces dispositifs comme des modulateurs d'intensité, des déflecteurs ou des filtres d'amplitude spectrale. Il y a eu initialement beaucoup de scepticisme.

COMMENT AVEZ-VOUS DÉVELOPPÉ ET TESTÉ LES PREMIERS PROTOTYPES ?

Les premières démonstrations ont été réalisées, dans le laboratoire de Corbeville, avec des moyens relativement simples : un cristal, un générateur d'ondes arbitraires et quelques instruments de laboratoire. Les essais menés notamment avec des équipes à Vienne ont rapidement montré que le potentiel dépassait largement celui des caméras. Nous avons alors pris une décision radicale : quelques mois seulement après la création de Fastlite, nous avons réorienté complètement l'entreprise vers ce nouveau produit, nommé Dazzler.

COMMENT AVEZ-VOUS CONÇU PUIS COMMERCIALISÉ CETTE TECHNOLOGIE ?

Le développement initial a été étonnamment rapide (quelque mois). À la fin des années 1990, l'électronique pouvait être conçue avec relativement peu de moyens : le cœur de l'innovation reposait davantage sur le logiciel, le firmware et surtout sur la physique du système. Une fois les principes correctement établis, le fonctionnement devenait très robuste. Nous avons commencé avec un produit essentiellement unique, décliné ensuite selon quelques variantes de cristaux et de performances.

QUEL ÉTAIT ALORS L'ENVIRONNEMENT SCIENTIFIQUE ?

Le contexte du marché nous a été extrêmement favorable. Dans les premières années après l'invention du CPA, les laboratoires construisaient encore eux-mêmes leurs

lasers femtosecondes. Chaque doctorant développait souvent sa propre instrumentation. Mais ce modèle est rapidement devenu trop lent pour rester compétitif scientifiquement. Au tournant des années 2000, des laboratoires ont commencé à trouver avantageux d'acheter lasers et instruments associés, plutôt que les construire. Nous sommes arrivés exactement à ce moment-là.

LE SUCCÈS COMMERCIAL A-T-IL ÉTÉ IMMÉDIAT ?

Les premières ventes ont eu lieu très rapidement, d'abord en France puis immédiatement à l'international. Malgré l'importance de la communauté française, notre marché ne pouvait être que mondial. Très vite, nos ventes se sont réparties approximativement de manière égale entre l'Amérique du Nord, l'Europe et l'Asie. Pendant les cinq premières années, Fastlite a connu une croissance de l'ordre de 30 % par an, entièrement autofinancée. Ce succès tenait aussi au fait que nous vendions un outil dont tout le monde percevait le potentiel, mais dont les usages restaient encore à inventer. Nous découvrons souvent les applications en même temps que nos clients. Tout cela a nécessité des coûts de recherche importants, mais la valeur apportée était telle que l'entreprise est arrivée à les couvrir avec ses ventes.

COMMENT L'ENTREPRISE A-T-ELLE ÉVOLUÉ PAR LA SUITE ?

Après le succès du Dazzler, nous nous sommes intéressés à une autre question essentielle : mesurer correctement les impulsions ultracourtes. Nous installions en quelques dizaines de minutes notre Dazzler dans un laboratoire, mais il était très rare qu'un système de mesure pour constater les performances puisse être mis en œuvre en un temps comparable. Nous avons alors développé un nouvel instrument : le Wizzler. Il s'agissait d'un système de mesure compact, robuste et pratiquement sans alignement, reposant sur un effet non linéaire du 3^e ordre pour générer une impulsion référence. Pour moi, c'est probablement le premier système complet de mesure temporelle d'impulsions entièrement inventé dans une entreprise privée avant d'être breveté et industrialisé. Par ailleurs nous arrivions au moment où

le marché historique du façonnage d'impulsions commençait progressivement à se stabiliser. Nous avons alors cherché comment prolonger cette expertise vers d'autres architectures. L'évolution naturelle a été la conception d'amplificateurs paramétriques de puissance (OPCPA). Ce domaine exploitait directement des compétences que nous avions développées depuis des années : contrôle temporel des impulsions, synchronisation, gestion spectrale et compréhension fine des architectures ultrarapides. Nous avons commencé à investir nos propres ressources dans cette direction et à participer à plusieurs grands projets européens autour des lasers ultrarapides de forte puissance. Cette activité représentait un changement d'échelle : on passait d'un composant relativement compact à des systèmes beaucoup plus intégrés, où chaque sous-ensemble influence directement les performances globales. Cette évolution nous a progressivement conduits vers une réflexion plus large sur l'organisation industrielle nécessaire pour poursuivre ce développement.

COMMENT AVEZ-VOUS COMPRIS QUE L'ACTIVITÉ OPCPA NÉCESSITAIT UN CHANGEMENT DE MODÈLE ?

Contrairement au Dazzler, un système OPCPA n'est pas un composant autonome : ses performances dépendent étroitement

du laser de pompe qui l'alimente. Or nous ne fabriquons pas ces lasers. Nous achetions les sources de pompe puis intégrions l'ensemble dans nos systèmes, mais au final le client considérait naturellement Fastlite comme responsable des performances globales. Cette situation devenait difficile à maintenir à mesure que les architectures se complexifiaient. Chaque combinaison d'OPCPA et de laser de pompe demandait des développements spécifiques, des optimisations particulières et un support technique croissant. Nous avions sous-estimé au départ le niveau d'intégration nécessaire entre ces briques technologiques. Nous avons alors progressivement réalisé que l'avenir industriel de cette activité passait probablement par une intégration plus verticale, réunissant dans une même structure la maîtrise du laser de pompe et celle de l'amplification paramétrique.

EST-CE DANS CE CONTEXTE QUE LE RAPPROCHEMENT AVEC AMPLITUDE S'EST RÉALISÉ ?

Ce rapprochement n'a pas été une décision soudaine : nous avons déjà des relations anciennes avec eux, héritées en partie de l'écosystème Thomson et du développement historique des lasers ultrarapides en France. Plusieurs discussions avaient eu lieu au fil des années,

mais elles sont devenues beaucoup plus concrètes lorsque les besoins technologiques ont convergé. Pour Amplitude, intégrer Fastlite permettait d'accélérer le développement de son offre dans les amplificateurs paramétriques ultrarapides. Pour Fastlite, cela permettait d'inscrire les technologies développées depuis plus de vingt ans dans un ensemble capable de maîtriser toute la chaîne laser. L'intégration s'est finalement faite assez naturellement. Aujourd'hui encore, les activités historiques de Fastlite continuent d'exister, tandis que les développements autour des systèmes paramétriques trouvent une nouvelle échelle au sein d'un acteur industriel plus large.

AVEC LE RECUL, QUEL REGARD PORTEZ-VOUS SUR CETTE AVENTURE ENTREPRENEURIALE ?

Je crois qu'une activité scientifique et une aventure entrepreneuriale sont compatibles à tout âge. On imagine souvent que l'entrepreneuriat est réservé aux jeunes chercheurs, mais mon expérience est plutôt l'inverse. En fin de carrière, on dispose de l'expérience, d'un réseau, d'une stabilité personnelle et surtout d'une liberté qui facilite la prise de risques. Finalement, je pense qu'il n'y a peut-être pas de meilleur âge pour créer une entreprise qu'au moment où l'on n'a plus rien à prouver. ●

— 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
- Télècom
- 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



Entretien avec Céline Fiorini-Debuisschert

Directrice de recherche au CEA, spécialiste de nanophotonique et d'optique non linéaire, co-coordinatrice du PEPR LUMA et directrice adjointe de l'Institut IRAMIS du CEA.

<https://doi.org/10.1051/photon/202613916>

COMMENT VOUS ÊTES-VOUS ORIENTÉE VERS DES ÉTUDES SCIENTIFIQUES ?

Je viens d'une famille qui n'était pas du tout scientifique, et d'un tout petit village de province. Les sciences, je ne les ai donc pas vraiment héritées à la maison : je les ai découvertes à l'école, au fil des cours, et progressivement j'y ai pris goût. À l'époque, quand on s'en sortait bien, on suivait assez naturellement une filière scientifique. J'ai donc choisi maths-physique, sans avoir de projet extrêmement précis. Mon idée initiale était plutôt d'aller vers la recherche médicale. C'était une sorte de rêve de petite fille : travailler sur des sujets utiles, proches du vivant et de la santé, et contribuer à mieux comprendre certaines pathologies ou certains mécanismes biologiques. Mais lorsque j'ai commencé à me renseigner auprès des services d'orientation, on m'a expliqué que le parcours était long, complexe, avec beaucoup d'incertitudes, et qu'il valait mieux viser une formation plus large pour garder davantage de possibilités ouvertes. C'est ainsi que je me suis retrouvée en classe préparatoire, puis, au moment des concours, avec le choix de quelques écoles, dont SupOptique (IOGS aujourd'hui).

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

En classe préparatoire, j'avais beaucoup apprécié les cours d'électromagnétisme. Mais je ne mettais pas encore vraiment le mot « optique » dessus. L'image que l'on a de l'optique au lycée ou en prépa est souvent assez restreinte, très liée à l'optique géométrique : les lentilles, les rayons, les instruments simples. En réalité, l'étendue

du domaine, et plus largement de la photonique, je l'ai véritablement découverte à SupOptique. Les cours montraient à quel point la lumière intervient dans des domaines extrêmement variés : lasers, matériaux, capteurs, télécommunications, imagerie... C'est un domaine qui permet à la fois de faire de la physique très fondamentale et de développer des dispositifs très concrets. Cette double dimension m'a beaucoup plu. En troisième année, j'ai choisi une option orientée recherche en optique non linéaire. Je me souviens notamment de cours d'optique ultra-rapide (dont un de François Salin !) ou d'optique non linéaire dans les matériaux organiques (par J. Zyss et I. Ledoux) qui m'avaient beaucoup intéressée, et qui ont contribué à mes choix par la suite.

DANS QUELS GROUPES AVEZ-VOUS RÉALISÉ VOS PROJETS ET STAGES ?

Nous avons déjà une première immersion dans la recherche en travaillant deux jours par semaine dans un laboratoire sur un projet scientifique. C'est à ce moment-là que j'ai pris contact avec l'équipe de Fabrice Charra et Jean-Michel Nunzi du CEA Saclay dans laquelle je réaliserai ensuite ma thèse, autour des interférences bifréquence en milieu moléculaire. Mais j'avais aussi envie d'une expérience à l'étranger. J'avais identifié une proposition de stage chez Gérard Mourou, aux États-Unis sur un sujet très différent, en lien avec l'élargissement et la compression d'impulsions. Le sujet m'intéressait beaucoup et l'idée d'un séjour à l'étranger me plaisait vraiment, mais celui-ci n'a finalement pu être concrétisé faute de financement. J'ai donc dû rebondir et je me suis retrouvée en contact avec Claude Rouyer, dans un autre

centre CEA. J'ai finalement réalisé mon stage de fin d'études avec lui, orienté vers les lasers de puissance. Ce changement de direction m'a permis de découvrir un autre univers scientifique, avec des problématiques très éloignées de celles que j'avais explorées jusque-là.

DANS QUEL CADRE SE DÉROULAIT CE STAGE ?

Le stage se déroulait au CEA, sur le site de Limeil-Valenton, qui a depuis été fermé. Une partie des activités et des équipes ont ensuite migré vers d'autres sites (Bordeaux et Bruyère le Chatel), notamment dans le cadre des infrastructures liées au Laser Mégajoule. Je travaillais à l'époque sur le laser Phébus. Mon stage portait sur des problématiques liées à la chaîne CPA, c'est-à-dire l'étirement des impulsions, leur amplification, puis leur compression, et les aberrations optiques temporelles associées à ces différentes étapes. Il a donné lieu à ma première publication !

COMMENT AVEZ-VOUS CHOISI LE SUJET DE VOTRE THÈSE ?

Ce stage aurait pu déboucher sur une thèse dans le domaine des lasers de puissance. Il y avait aussi, en arrière-plan, la montée en puissance des grands projets laser, notamment autour du Laser Mégajoule. On sentait déjà qu'une dynamique importante se mettait en place. Mais j'avais également une autre possibilité de thèse, au CEA à Saclay, sur un sujet plus proche de l'optique non linéaire et des matériaux organiques. J'ai donc dû choisir entre deux trajectoires : rester dans le domaine des lasers de puissance et des grandes chaînes laser, ou m'orienter vers des recherches plus fondamentales sur les matériaux et les phénomènes non

linéaires. Finalement, j'ai choisi cette seconde voie, qui était dans la prolongation de mon projet de fin d'études et correspondait davantage à ce qui m'avait attirée à la fin de mes études d'ingénieur.

QUEL ÉTAIT LE SUJET DE VOTRE THÈSE ?

Ma thèse portait sur l'optique non linéaire, en particulier sur le mélange d'ondes et la génération de somme de fréquences. À l'époque, l'une des problématiques était de produire des lasers bleus à partir de lasers rouges grâce à des dispositifs de doublage de fréquence. Les lasers bleus n'étaient pas encore disponibles et il y avait une forte activité dans ce domaine. Dans les matériaux organiques, une approche classique consistait à disperser des molécules dans un polymère puis à les orienter par « poling » électrique. On chauffe le polymère au-delà d'une certaine température, on applique un champ électrique, les dipôles moléculaires s'orientent et on obtient un matériau non centrosymétrique capable de générer une réponse du second ordre. Mon sujet consistait à explorer une approche entièrement optique. L'idée reposait sur une interférence bifréquence entre un faisceau fondamental et son faisceau doublé. À l'échelle moléculaire, cela permet d'induire des excitations par un photon ou par deux photons, et l'interférence entre ces processus introduit un terme croisé qui favorise certaines orientations de dipôles. Cela conduit à une orientation induite par la lumière elle-même, qui peut d'ailleurs aussi être appliquée au cas de molécules non dipolaires !. En jouant sur la polarisation et le déphasage des champs à fréquence fondamentale/double, on peut entièrement contrôler les géométries d'orientation des molécules et on montre que cette technique permet une organisation en profondeur des molécules, jusqu'à une limite liée notamment à l'absorption du matériau. Cette structuration photoinduite et modulée de l'orientation dans la profondeur du matériau mène par ailleurs à un accord de phase intrinsèque du matériau pour le doublage de fréquence. C'était un sujet à la fois très fondamental dans ses mécanismes et très motivant par les perspectives applicatives qu'il portait.

DANS QUEL CONTEXTE SCIENTIFIQUE S'INSCRIVAIENT CES RECHERCHES ?

Ces travaux s'inscrivaient dans une série d'observations qui avaient marqué la communauté scientifique. On avait observé de la génération de seconde harmonique dans des fibres de silice après injection d'un laser infrarouge relativement puissant. C'est d'une certaine façon un exemple de sérénité en science : on injecte le laser (1064 nm), on laisse tourner l'expérience, et en revenant de la cantine on découvre qu'il y a du vert (532 nm) qui sort de la fibre. Il faut alors comprendre ce qui s'est passé, construire des hypothèses, proposer des mécanismes, discuter le rôle des défauts, des couplages et des phénomènes d'organisation induite. Au CEA, l'idée, proposée initialement par F. Charra/J.M. Nunzi était de se dire que si un matériau comme la silice, peu non linéaire au départ, pouvait manifester ce type d'effets, alors des molécules possédant intrinsèquement une hyperpolarisabilité plus forte devraient permettre des réponses encore plus efficaces, à condition de savoir les orienter. C'est cette intuition qui a nourri le sujet de ma thèse.

QUEL A ÉTÉ VOTRE PARCOURS APRÈS LA THÈSE ?

J'ai soutenu ma thèse en juin 1995 et j'ai été recrutée quasiment dans la foulée dans le même laboratoire, au CEA. Le laboratoire était rattaché à ce qui est aujourd'hui la Direction de la Recherche Technologique, donc dans un environnement plutôt orienté vers la recherche appliquée, même si mon groupe conservait une forte composante fondamentale. C'était une période où l'on pouvait encore être recruté très rapidement après la thèse, sans passer nécessairement par un post-doctorat. J'ai donc enchaîné très directement avec mes premières responsabilités de chercheuse.

QUELS ONT ÉTÉ VOS PREMIERS PROJETS DE RECHERCHE ?

J'ai travaillé sur plusieurs thématiques qui étaient alors très actives : les débuts des diodes électroluminescentes organiques, le photovoltaïque organique et des projets de capteurs chimiques. Pour ces derniers, j'ai été amenée à monter une petite équipe en recrutant en particulier une collègue

chimiste afin de développer des matériaux spécifiques tandis que je travaillais à la mise en place de systèmes originaux de transduction optique, *i.e.* une lecture optique pertinente de la présence de molécules cibles.. Nous nous sommes particulièrement intéressés à des polymères « à empreinte moléculaire » capables de reconnaître sélectivement certaines molécules. L'enjeu était d'aboutir à des capteurs à la fois extrêmement sélectifs et extrêmement sensibles. Cette période, riche en nouveaux développements, m'a permis d'élargir mon spectre scientifique, tout en restant à l'interface entre matériaux, optique et applications.

VOUS DÉCIDEZ ENSUITE DE REVENIR VERS DES RECHERCHES PLUS FONDAMENTALES.

Oui. Je suis restée un peu moins de dix ans dans cet environnement de recherche appliquée avant de rejoindre la Direction de la Recherche Fondamentale du CEA. C'était un choix scientifique, mais aussi personnel. Cela a coïncidé avec une période de congé maternité qui m'a donné l'occasion de prendre du recul et de réfléchir à l'évolution de mes activités. J'avais envie de revenir vers des questions plus fondamentales, avec une plus grande liberté d'exploration scientifique. Ce changement a marqué une nouvelle phase de mon parcours.

COMMENT ÊTES-VOUS ARRIVÉE AUX THÉMATIQUES DE CHAMP PROCHE OPTIQUE ?

Le point de départ était un verrou expérimental : dans les techniques de champ proche optique, le rapport signal-bruit est souvent limité. À cette époque, différentes propositions avaient été faites pour contourner ce problème *via* le développement de « sondes actives », consistant par exemple à ancrer un nano-objet fluorescent à l'extrémité d'une pointe pour améliorer la détection en isolant le signal *via* un filtrage spectral. Dans le laboratoire que j'ai rejoint, il y avait une forte activité autour de la microscopie STM (Scanning Tunneling Microscopy). L'idée a été d'exploiter le champ électrique très localisé dans une jonction STM pour organiser des molécules dipolaires et créer localement une nano-source optique *via* un doublage de fréquence. Le projet nécessitait ● ● ●

de coupler une excitation laser titane-saphir à un STM développé au laboratoire, avec un cahier des charges complexes car ce qui est optimal pour la stabilité STM ne l'est pas forcément pour la collecte optique et vice versa, le compromis n'était pas nécessairement évident ! Après avoir testé différentes configurations expérimentales, nous avons abouti à un montage basé sur un microscope inversé associé à une pointe métallique pilotée par un système piézoélectrique.

VOUS AVEZ ENSUITE TRAVAILLÉ SUR LA PLASMONIQUE ET LA NANOPHOTONIQUE.

Oui. Je me suis intéressée notamment à la fluorescence à deux photons pour des applications d'imagerie en profondeur, avec des collaborations, par exemple, avec l'équipe de M.P. Teulade-Fichou de l'Institut Curie. Cela m'a progressivement conduite à travailler à la fois avec des biologistes et des chimistes pour la synthèse de nanoparticules métalliques, l'objectif étant d'exalter la fluorescence de marqueurs *via* leur couplage à des objets plasmoniques colloïdaux, voire d'utiliser directement leur propriétés d'émission comme dans le cas de nanobâtonnets d'or. Ces objets présentent des propriétés remarquables : la luminescence à deux photons peut être très intense grâce aux exaltations locales de champ associées aux résonances plasmoniques longitudinales et transverses. Ce sont des objets très simples en apparence, mais extrêmement riches physiquement, et cette période a été pour moi très stimulante, parce qu'elle m'a permis de passer progressivement de la microscopie en champ proche à la plasmonique, tout en gardant un fil conducteur autour des interactions lumière-matière à l'échelle nanométrique.

COMMENT VOTRE IMPLICATION DANS LES STRUCTURES DE RECHERCHE S'EST-ELLE DÉVELOPPÉE ?

À partir de 2014, j'ai progressivement partagé mon temps entre la recherche et l'animation scientifique, à la fois au CEA et dans le cadre de l'université Paris Saclay. J'ai notamment été impliquée dans la coordination du Labex NanoSaclay puis dans

la création de l'Institut des NanoSciences, PSiNano. L'idée était de promouvoir la dynamique interdisciplinaire entre physiciens, chimistes et biologistes. Beaucoup de projets intéressants naissent à ces interfaces, mais ils demandent aussi du temps, de l'organisation et une capacité à faire dialoguer des communautés qui n'ont pas toujours les mêmes méthodes ni les mêmes langages. C'est ce qui m'a progressivement amenée à prendre davantage de responsabilités dans la structuration de ces communautés scientifiques.

COMMENT ET POURQUOI AVEZ-VOUS CRÉÉ L'INSTITUT DES NANOSCIENCES ?

L'Institut des nanosciences a été créé en 2022. Avec Ariel Levenson qui en était l'investigateur, nous avons travaillé à renforcer les interactions entre disciplines *via* une logique d'invention collective : pas seulement un biologiste qui vient interroger un physicien ou un chimiste autour d'une question ponctuelle, ou l'inverse, mais de véritables temps de réflexion où tout le monde est à égalité et où l'on cherche à faire émerger des idées nouvelles, parfois plus disruptives. Ce n'est pas facile, parce que cela prend du temps, cela demande d'accepter de sortir de sa zone de confort, mais c'est très stimulant. Nous avons monté un comité dédié avec des représentants de différentes composantes : nanoélectronique, nanophotonique, nanochimie, nanomagnétisme, nanobio... L'un des enjeux était aussi d'associer les autres structures de Paris Saclay, Graduate Schools et autre Instituts, notamment l'Institut Pascal et l'Institut des Sciences de la Lumière piloté par Jean-Jacques Greffet, avec qui nous avons donc travaillé en concertation, par exemple sur la nanophotonique, pour articuler les initiatives et éviter les redondances.

QUELLES SONT AUJOURD'HUI VOS PRINCIPALES RESPONSABILITÉS ?

J'ai été nommée adjointe scientifique à l'Institut IRAMIS du CEA en 2023, puis directrice adjointe en 2025. Parallèlement, j'ai pris en 2024 la co-direction du PEPR LUMA, co-coordonné par le CNRS et le CEA, et consacré aux interactions lumière-matière. C'est une thématique dans laquelle

je me reconnais, parce qu'elle associe justement les diverses dimensions qui ont traversé mon parcours : l'interdisciplinarité, les matériaux, les nanosciences, la photonique, mais aussi le lien avec des enjeux sociétaux plus larges : santé, énergie ... Je connaissais par ailleurs parfaitement Rémi Métivier, co-directeur CNRS, pour avoir précédemment collaboré avec lui sur différents projets scientifiques !

POUEZ-VOUS DÉCRIRE LES GRANDES LIGNES DE CE PEPR ?

Le programme LUMA vise à structurer la recherche française autour des interactions lumière-matière. Il s'organise autour de quatre grands axes : lumière chirale, énergie, matériaux et santé. Il y a une grande diversité de sujets, mais un fil conducteur très fort : utiliser la lumière comme outil d'analyse, de contrôle ou de transformation, au croisement de plusieurs disciplines. Un aspect important du programme est aussi le développement de plateformes expérimentales ouvertes à l'ensemble de la communauté scientifique. Ces plateformes permettent à des chercheurs d'accéder à des équipements avancés, par exemple en spectroscopie ultrarapide ou pour l'étude dite « operando » de processus photochimiques. Elles sont pensées comme des lieux de mutualisation et d'ouverture, y compris pour des équipes qui ne sont pas directement financées par des projets LUMA.

COMMENT VOYEZ-VOUS L'ÉVOLUTION DE CES PROGRAMMES DANS LES PROCHAINES ANNÉES ?

Le programme a maintenant trois ans. Les premières années ont surtout été consacrées à la mise en place des projets et des plateformes. Aujourd'hui, on commence à voir les usages se développer, avec des équipes qui s'approprient progressivement ces outils et commencent à travailler davantage hors de leur laboratoire d'origine. L'enjeu sera de pérenniser ces infrastructures et de structurer la suite. Il est probable que les programmes futurs s'organisent autour d'axes plus ciblés hérités des thématiques actuelles. Nous souhaitons également renforcer les liens européens et développer des interactions avec le monde industriel, notamment *via* la création d'un club industriel. ●

DES SIGNATURES PHOTONIQUES À LA PALETTE DES ENLUMINEURS : L'IMAGERIE MÉTASPECTRALE INTÉGRÉE APPLIQUÉE AU BEATUS DE SAINT-SEVER

T. CALLIGARO^{1,2,*}, C. DENOËL³, R. MOREAU^{1,2}, L. PICHON^{1,2}

¹ Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France - C2RMF, Palais du Louvre, Paris

² Laboratoire de développement instrumental et de méthodologies innovantes pour les Biens Culturels - Lab-BC, CNRS-UAR3506, Paris

³ Bibliothèque nationale de France, BnF, Paris

*thomas.calligaro@culture.gouv.fr



Les méthodes photoniques occupent une place centrale dans les sciences du patrimoine. Fondées sur l'interaction rayonnement-matière, elles permettent de caractériser efficacement les matériaux constitutifs des œuvres sans prélèvement ni dommage, et d'accéder à des informations cruciales pour leur compréhension, leur conservation et leur restauration. Parmi ces méthodes, la cartographie de fluorescence de rayons X (MA-XRF) et l'imagerie hyperspectrale de réflectance et de luminescence dans un domaine étendu (UV-VIS-NIR-SWIR) fournissent des informations complémentaires sur la composition et les propriétés des matériaux.

<https://doi.org/10.1051/photon/202613919>

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.

L'évolution récente des techniques d'imagerie spectrales s'accompagne d'une augmentation considérable de la quantité d'informations à gérer. Les progrès ne résident plus

seulement dans les performances de chaque modalité, mais dans la possibilité de les acquérir simultanément et de les interpréter conjointement. Cette approche nécessite une instrumentation adaptée, capable d'enregistrer des données spatialisées

avec différentes modalités et de produire des jeux de données directement exploitables.

La plateforme MITHRA développée au C2RMF permet l'acquisition intégrée de cartographies élémentaires (MA-XRF), d'imagerie hyperspectrale ●●●

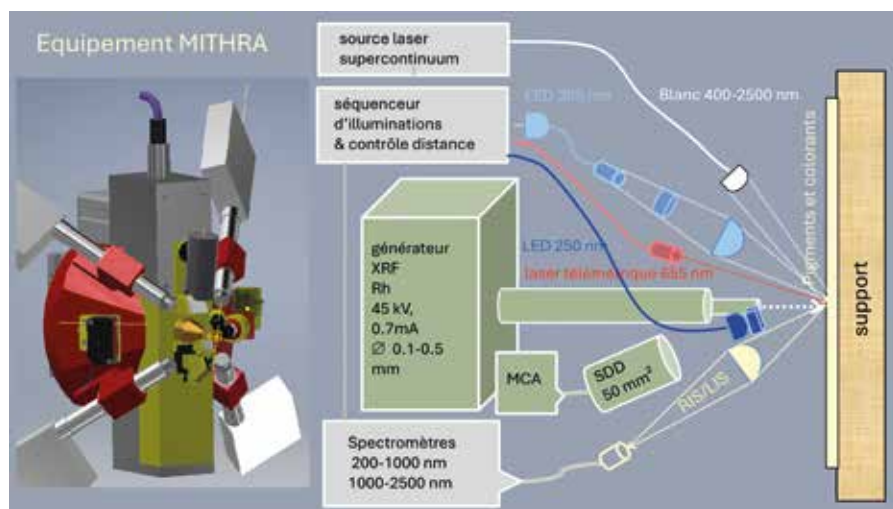


Figure 1. Principe de l'imagerie métaspectrale intégrée dans l'équipement MITHRA. Les trois modalités (MA-XRF, HSI et IL) fournissent des caractéristiques complémentaires des matériaux.

(HSI) et d'imagerie de luminescence (IL) directement alignées à la source. Les données sont ensuite fusionnées dans un cube de données multimodales, dont l'analyse par des méthodes d'apprentissage non supervisées permet d'exploiter conjointement les signatures photoniques des matériaux.

L'étude des enluminures du manuscrit du Beatus de Saint-Sever conservé à la Bibliothèque Nationale de France permet d'illustrer cette approche. Ce célèbre manuscrit du XI^e siècle présente une palette de couleurs exceptionnellement riche, en particulier dans les tonalités de bleus. En mettant en évidence la diversité des pigments et colorants employés souvent en associations, l'analyse multimodale permet une nouvelle lecture de la palette mise en œuvre par les enlumineurs.

LES SIGNATURES PHOTONIQUES DES MATÉRIAUX

Les matériaux qui constituent une œuvre interagissent avec le rayonnement selon des mécanismes physiques propres à leur composition et à leur structure. Ces interactions produisent des signatures photoniques complémentaires.

La fluorescence de rayons X (XRF) permet d'identifier certains éléments

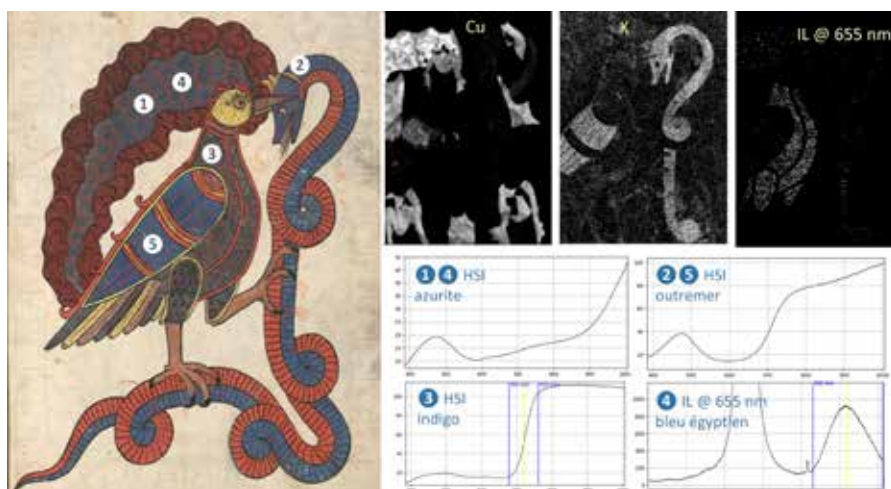
chimiques constitutifs de la matière picturale. La cartographie MA-XRF identifie et localise leur répartition au sein de l'œuvre, par exemple le cuivre, le fer, le plomb ou l'arsenic présents dans de nombreux pigments. Cette modalité est particulièrement efficace

pour identifier les pigments minéraux. Elle délivre des valeurs compositionnelles quantitatives, et permet d'estimer l'épaisseur des couches picturales. En revanche, elle ne renseigne ni sur l'environnement chimique des éléments, ni sur les éléments légers, constitutifs notamment des colorants organiques.

Les spectres de réflectance sont souvent caractéristiques des pigments et colorants. L'imagerie hyperspectrale de réflectance (HSI) dans le domaine visible et proche infrarouge (VNIR) permet de distinguer des pigments contenant les mêmes éléments chimiques au sein de composés différents, d'identifier certains colorants organiques et de mettre en évidence des variations liées aux mélanges ou résultant de l'altération.

Dans le domaine de l'infrarouge de courte longueur d'onde (SWIR), l'imagerie de réflectance délivre une information moléculaire, avec des bandes d'absorption correspondant aux harmoniques de modes de vibrations fondamentaux, comme celles de la liaison OH.

Figure 2. À gauche, feuillet 13r du Beatus de Saint-Sever avec les zones 12345 comportant des tons bleus. En haut à droite, cartographies du cuivre (azurite) et du potassium (outremer) obtenues par XRF et de la bande de luminescence à 920 nm (bleu égyptien). En bas à droite, les spectres de réflectance et de luminescence des zones.



¹ R. Moreau, T. Calligaro, L. Pichon, B. Moignard, S. Hermon, I. Reiche, A multimodal scanner coupling XRF, UV-Vis-NIR photoluminescence and Vis-NIR-SWIR reflectance imaging spectroscopy for cultural heritage studies, X-Ray Spectrom. **53**, 271 (2024). <https://doi.org/10.1002/xrs.3364>

Enfin, l'imagerie de luminescence (IL) apporte une information supplémentaire. Certains pigments et colorants émettent une luminescence caractéristique sous excitation UV ou visible (VIL). C'est notamment le cas du bleu égyptien, dont la fluorescence intense dans le proche infrarouge permet de détecter quelques grains seulement, dispersés et mélangés à d'autres pigments. Cette modalité révèle ainsi des informations qui restent inaccessibles à la fluorescence de rayons X ou à la réflectance spectrale seules.

ACQUISITION MÉTASPECTRALE INTÉGRÉE ET TRAITEMENT AUTOMATISÉ

L'acquisition simultanée de plusieurs modalités spectrales est l'une des originalités de la plateforme MITHRA¹ développée au C2RMF pour l'étude non invasive des œuvres patrimoniales. Cet équipement transportable associe la cartographie MA-XRF avec un faisceau de rayons X produit par un générateur de 50 kV, focalisé par polycapillaire avec les imageries hyperspectrale de réflectance (HSI) de 200 à 2500 nm et de luminescence (IL) à 250, 365 et 655 nm (Figure 2). La surface de l'œuvre est parcourue par la tête de mesure selon un balayage raster, enregistrant au vol ces modalités toutes les 100 millisecondes, à l'aide de spectromètres fibrés et d'optiques confocales. La résolution spatiale peut atteindre 100 µm.

Cette acquisition multimodale présente plusieurs avantages. Elle évite les opérations de recalage généralement nécessaires lorsque les données proviennent d'instruments indépendants en assurant un parfait alignement des différentes modalités, indispensable pour l'analyse conjointe des signatures photoniques. Enfin, le temps d'acquisition des différentes modalités est réduit, minimisant l'immobilisation des œuvres patrimoniales et évitant les manipulations entre les acquisitions.

Les spectres des différentes modalités sont fusionnés dans un cube de données qui constitue le point de départ du traitement. Chaque pixel n'est

plus décrit par un seul spectre, mais par l'ensemble des spectres XRF, optiques et vibrationnels.

L'exploitation du cube de données multimodal s'appuie sur des méthodes d'apprentissage non supervisé. Dans un premier temps, la grande dimensionnalité du datacube (512 canaux XRF, 4 × 1044 canaux HSI et IL, 256 canaux SWIR) est réduite en composantes principales par l'algorithme UMAP (*Uniform Manifold Approximation and Projection*)². Projetés dans les deux premières composantes, les points de mesure se répartissent en fonction de leur réponse méta-spectrale, indépendamment de leur localisation spatiale. Ce diagramme constitue en quelque sorte une palette analytique des pigments et des colorants présents dans l'œuvre. Le couplage de cette palette avec les données méta-spectrales spatialisées permet un aller-retour entre composition et localisation. Quelle est la réponse méta-spectrale d'un détail particulier de l'œuvre ? Contient-elle plusieurs signatures de matières picturales ? Retrouve-t-on ce mélange ailleurs dans l'œuvre, et où ?

Dans un deuxième temps, les points de mesure présentant des signatures photoniques similaires sont regroupés en classes à l'aide de l'algorithme HDBSCAN (*Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise*)³. L'identification stricto sensu des pigments les plus représentés constitue la dernière étape ; elle repose sur l'interprétation physico-chimique de ces classes.

En résumé, la démarche proposée ne consiste plus à considérer les images spectrales séparément, mais à exploiter un espace de données unique dans lequel chaque matériau pictural est décrit simultanément par l'ensemble de ses signatures photoniques. Cette approche facilite la mise en évidence de matériaux minoritaires, mais aussi celle d'associations de pigments qui seraient difficilement identifiables à partir d'une seule modalité.

LA PALETTE DES BLEUS DU BEATUS

La méthode a été appliquée au célèbre manuscrit enluminé de l'apocalypse « *Beatus* de Saint-Sever, Latin ●●●

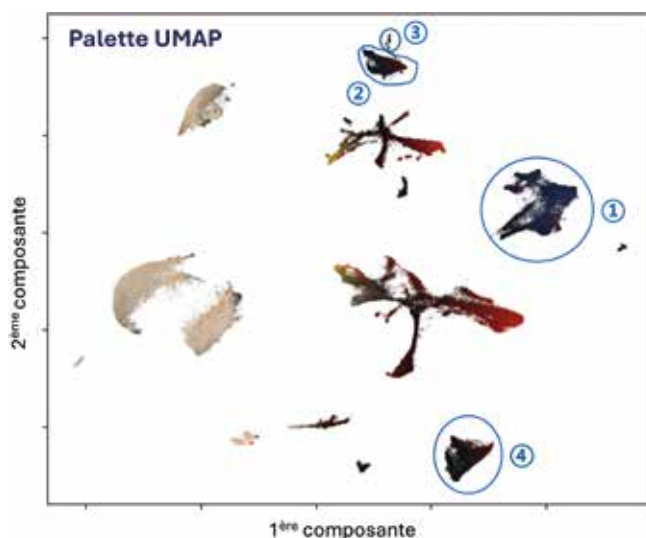


Figure 3. Fusion et exploitation des données multimodales. La projection UMAP de l'ensemble des points de données sur les deux premières composantes, colorés à partir des valeurs HSI, permet d'identifier quatre zones de bleus notées ①②③④.

² R. M. Vermeulen, K. Smith, K. Eremin, G. Rayner, M. Walton, Application of Uniform Manifold Approximation and Projection (UMAP) in spectral imaging of artworks, *Spectrochim. Acta A* **252**, 119547 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.119547>.

³ B. Ghogh, A. Ghodsi, F. Karray & M. Crowley (2021), Uniform Manifold Approximation and Projection (UMAP) and its Variants: Tutorial and Survey. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2109.02508>.

8878 » conservé à la Bibliothèque Nationale de France⁴. Cette recherche a été menée dans le cadre de l'Equipex+ ESPADON « En Sciences du Patrimoine, l'Analyse Dynamique des Objets Anciens et Numériques », dont un des objectifs est le développement d'instruments et d'architectures de données pour construire l'Objet Patrimonial Augmenté. Parmi les douze feuillets étudiés par imagerie métaspectrale, celui du feuillet 13r démontre clairement le bénéfice de cette approche. Représentant l'Oiseau vainqueur du Serpent, cette enluminure comporte plusieurs nuances de bleu sur le plumage, le corps et la queue de l'oiseau, ainsi que sur le corps du serpent (Figure 2) résultant de l'emploi de plusieurs pigments et colorants bleus.

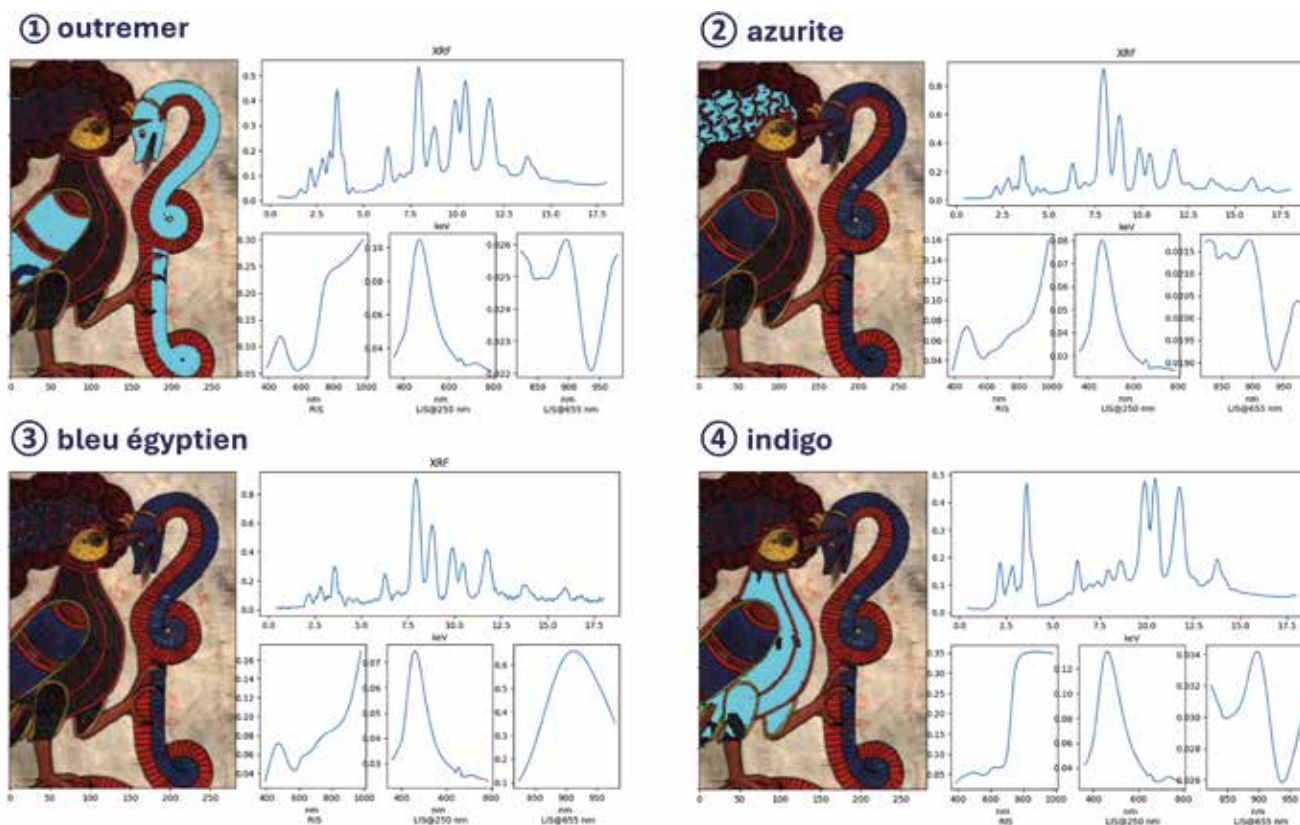
L'examen des différentes modalités des zones ①②③④⑤, prises une à une, informe sur ces matériaux présents. La forte hétérogénéité de la distribution du cuivre obtenue par MA-XRF suggère l'emploi de

plusieurs pigments cuprifères, mais cette information ne suffit pas pour une identification sans ambiguïté. L'imagerie hyperspectrale met en évidence des différences de réponse optique entre ces zones, tandis que l'imagerie de luminescence identifie des régions contenant du bleu égyptien, grâce à sa bande de luminescence caractéristique vers 920 nm. Les principaux matériaux identifiés sont l'azurite, carbonate de cuivre de formule $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$, le bleu égyptien, silicate de cuivre artificiel de formule $\text{CaO} \cdot \text{CuO} \cdot 4\text{SiO}_2$, le bleu outremer extrait du lapis-lazuli dont la phase minérale bleue est la lazurite $(\text{Na,Ca})_8(\text{AlSiO}_4)_6(\text{SO}_4, \text{S}, \text{Cl}, \text{OH})_2$ et enfin l'indigo, colorant végétal tiré de l'indigotier. L'exploitation manuelle de ces modalités permet ainsi de discriminer des matériaux qui

resteraient difficilement identifiables par une seule technique.

L'exploitation automatisée du cube de données multimodal par l'algorithme UMAP permet d'aller plus vite et plus loin. La palette analytique obtenue par réduction dimensionnelle permet de distinguer de nombreux pigments et colorants (Figure 3), visuellement identifiables par leur couleur extraite de leur spectre de réflectance. Quatre zones de bleu notées ①②③④ sont identifiées dans le diagramme UMAP. Leur sélection permet de localiser instantanément où cette combinaison de pigments et de colorants a été employée, indiquée en bleu turquoise (Figure 4) et de les identifier en examinant les spectres. Il est donc possible de voir si certaines associations ont été employées ailleurs dans le feuillet, ou dans l'ensemble des feuillets étudiés.

Figure 4. L'exploitation automatique de la palette des bleus du folio 13r permet de localiser immédiatement les zones ①②③④. La localisation de chaque zone est indiquée en bleu turquoise, et les spectres de chaque modalité permettent d'identifier la nature des pigments qu'elles comportent.



⁴ C. Denoël, Le laboratoire de l'œuvre, dans *Le Beatus de Saint-Sever*, édition Citadelle & Mazenod / Bibliothèque nationale de France, 2022.

La présence du bleu égyptien est un résultat inattendu de cette étude. Si l'emploi de ce pigment connu depuis l'Antiquité décline à partir du haut Moyen Âge, son identification dans le *Beatus* de Saint-Sever atteste d'un emploi parmi les plus tardifs. En tous cas, sa luminescence caractéristique joue un rôle essentiel dans la discrimination des mélanges pigmentaires, où quelques grains seulement suffisent à produire une signature détectable.

Plus généralement, cette étude montre qu'avec cette approche multimodale, la palette ne doit plus être comprise comme une collection de pigments, mais comme un ensemble structuré de matières picturales dont l'organisation devient accessible grâce à l'analyse multimodale. Les mélanges observés résultent des signatures des matériaux employés, permettant d'appréhender les pratiques propres à un atelier ou à un enlumineur.

CONCLUSION

L'étude du *Beatus* de Saint-Sever illustre l'apport à l'analyse des œuvres patrimoniales de l'imagerie métaspectrale résultant de la combinaison de plusieurs imageries de différentes modalités. Le couplage de la cartographie XRF avec de l'imagerie hyperspectrale de réflectance et de luminescence procure une description beaucoup plus complète des matériaux que chacune des modalités prises isolément. Leur fusion dans un cube de données multimodal, traité à l'aide de méthodes d'apprentissage non

supervisé, permet d'exploiter conjointement les signatures photoniques des matériaux.

L'étude du feuillet 13r de l'oiseau et du serpent a révélé une palette de bleus d'une grande richesse, associant plusieurs pigments. En exploitant conjointement plusieurs signatures photoniques, elle met en évidence des mélanges pigmentaires difficilement identifiables par une analyse unimodale. La détection du bleu égyptien, probablement dans l'un de ses emplois les plus tardifs dans un manuscrit occidental, illustre la sensibilité de cette approche à des matériaux présents en très faible quantité. À travers la palette des matières picturales, elle permet d'entrevoir les choix et pratiques des enlumineurs.

Au-delà de ce cas d'étude, cette méthodologie ouvre de nouvelles perspectives pour les sciences du patrimoine. L'imagerie multimodale dépasse l'identification des matériaux colorés ; elle permet de caractériser leur organisation au sein de l'œuvre. La palette virtuelle produite par le traitement des données multimodales apparaît comme un nouvel objet d'étude, qui simplifie la comparaison entre œuvres patrimoniales, périodes ou ateliers.

Cette recherche a été menée dans le cadre de l'Equipex+ ESPADON « En Sciences du Patrimoine, l'Analyse Dynamique des Objets Anciens et Numériques », programme France 2030 (2021–2028), financé par l'État et géré par l'Agence Nationale de la Recherche, réf. ANR-21-ESRE-0050. ●

RÉFÉRENCES

- [1] R. Moreau, T. Calligaro, L. Pichon, B. Moignard, S. Hermon, I. Reiche, *X-Ray Spectrometry* **53**, 271 (2024). DOI : 10.1002/xrs.3364
- [2] M. Vermeulen, K. Smith, K. Eremin, G. Rayner, M. Walton, *Spectrochimica Acta A* **252**, 119547, 1 (2021). DOI : 10.1016/j.saa.2021.119547
- [3] R. J. G. B. Campello, D. Moulavi, J. Sander, Density-Based Clustering Based on Hierarchical Density Estimates, in *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining*, Lecture Notes in Computer Science, vol. 7819, Springer, Berlin, Heidelberg, 160 (2013). DOI : 10.1007/978-3-642-37456-2_14
- [4] C. Denoël, « Le laboratoire de l'œuvre », dans « Le Beatus de Saint-Sever », Citadelle & Mazenod / Bibliothèque nationale de France, Paris (2022)



SOLUTIONS POUR LA FUSION

LIGNES LASERS



COMPOSANTS POUR LASERS HAUTES ÉNERGIES

- ▲ Optiques grandes dimensions, haute LDT
- ▲ Traitement hydrophobe très haute LDT pour cristaux ou fenêtre
- ▲ Monture optomécanique
- ▲ Isolateurs grandes ouvertures (70mm)
- ▲ Modules d'amplification laser

ÉLECTRONIQUE POUR LASER

- ▲ UniPS : unité d'alimentation et de contrôle pour laser pompé par diodes
- ▲ UniLDD : driver de diode laser forte puissance et ultra-stable avec TEC interne

CYCLE TRITIUM



NOTUS SPECTROMÈTRE RAMAN POUR LA MESURE DU TRITIUM



www.optonlaser.com

EXPLORATION DE LA JOCONDE PAR IMAGERIE MULTISPECTRALE

Pascal COTTE¹, Lionel SIMONOT², Mathieu HÉBERT³

¹ Lumière Technology – Joint laboratory university of Bologna

² Institut Lumière Matière, Université Claude Bernard Lyon 1

³ Laboratoire Hubert Curien, Université Jean Monnet Saint-Etienne, et Institut d'Optique Graduate School

*pascal@cotte.com



La numérisation multispectrale de *La Joconde* réalisée au Louvre a permis d'acquérir un ensemble d'images de très haute résolution spatiale dans différentes bandes spectrales du visible et du proche infrarouge. Ces données ouvrent la voie à une analyse fine des matériaux picturaux, des glacis et des structures sous-jacentes.

<https://doi.org/10.1051/photon/202613924>

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.

L'analyse scientifique des œuvres peintes est précieuse pour les historiens de l'art afin de comprendre leur genèse et leur fabrication, et pour les restaurateurs afin d'évaluer leur état et guider leurs actes de restauration. Parmi les multiples outils d'analyse existants, ceux comme la spectroscopie permettant une observation non-invasive et non-destructive sont privilégiés pour des raisons évidentes d'intégrité physique de l'œuvre. Les techniques d'imagerie sont encore plus appréciées car elles offrent une observation spectroscopique en chaque point. Plusieurs gammes de longueur d'onde peuvent être exploitées : infrarouge, visible, UV, rayons X. Nous présentons ici une caméra multispectrale couvrant le visible et le proche infrarouge, dont les caractéristiques ont été

optimisées pour les œuvres peintes, et ont apporté des connaissances inédites sur la conception de *La Joconde*, chef d'œuvre de Léonard de Vinci, et vedette du Musée du Louvre.

UNE CAMÉRA MULTISPECTRALE À TRÈS HAUTE RÉOLUTION SPATIALE

Le système d'imagerie spectrale conçu par Pascal Cotte, fondateur de Lumière Technology, associe un capteur linéaire de 12 000 pixels et un ensemble de 13 filtres spectraux dans le domaine du visible et de l'infrarouge, entre 400 et 1000 nm. Un dispositif d'éclairage latéral projette une bande lumineuse verticale qui balaie le tableau horizontalement – ce qui permet un bon éclaircissement tout en limitant l'exposition – avec un angle d'incidence supérieur à 45° pour limiter les réflexions spéculaires parasites vers la caméra qui observe

l'œuvre frontalement. Une calibration basée sur l'acquisition d'une surface blanche homogène dans les mêmes conditions, ainsi qu'une reconstruction spectrale à partir des 13 bandes, permet d'obtenir en chaque point de l'œuvre une réflectance bien résolue spectralement. Une attention particulière a été portée à la stabilité photométrique du système dans son ensemble, avec une forte dynamique (79,3 dB) et un très bas niveau de bruit.

ANALYSE PIGMENTAIRE

Le système fournit donc, pour chaque point de la surface picturale, une mesure de la réflectance spectrale. En plus de permettre une simulation de l'apparence colorée sous un éclairage spectral au choix (voir exemples figures 1 et 3), elle permet aussi d'entreprendre une analyse pigmentaire en exploitant des signatures spectrales de pigments. Ces signatures résultent de

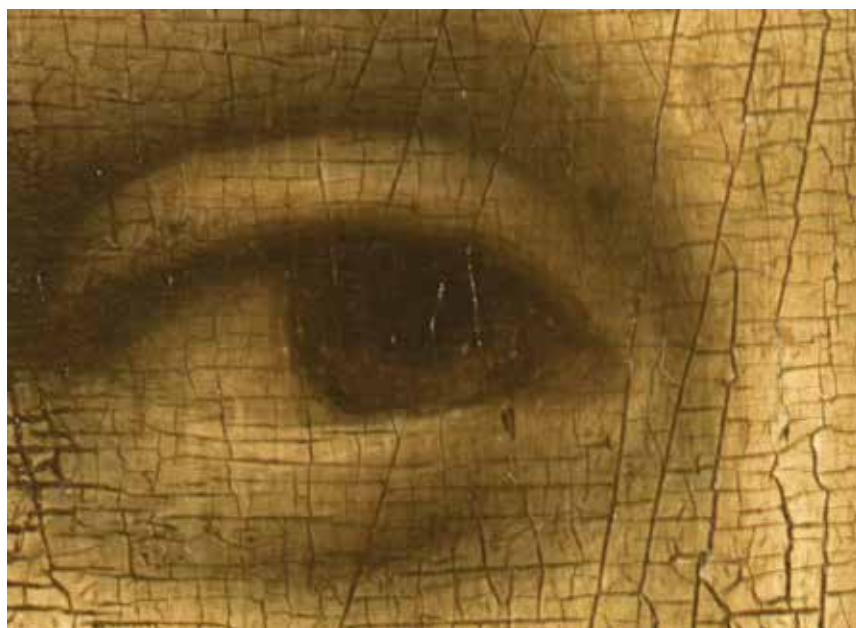
la combinaison complexe de plusieurs facteurs tels que la nature des pigments, leurs proportions dans les mélanges, l'épaisseur des couches ainsi que la présence de glaci et de vernis. En traitant les signatures mesurées avec des modèles optiques de diffusion et d'absorption (modèles de transfert radiatif, ou inspirés de la théorie de Kubelka-Munk), on parvient à interpréter les variations spectrales en termes de composition matérielle comme la contribution relative de certains pigments ou familles de pigments. Cette analyse, croisée avec d'autres méthodes (imageries infrarouge ou à rayons X), ne conduit pas nécessairement à une identification univoque, mais elle permet de distinguer des zones homogènes, de détecter des mélanges et de mettre en évidence des différences de composition invisibles à l'œil. La figure 2 propose une cartographie de mélanges pigmentaires identifiés sur *La Joconde*.

DÉVERNISSAGE VIRTUEL DE LA JOCONDE

L'image spectrale permet aussi de simuler l'apparence de l'œuvre sous un état de vernis différent, par exemple moins absorbant, ou « allégé », c'est-à-dire partiellement retiré comme cela se pratique dans un atelier de restauration. Le jaunissement

du vernis ancien modifie en effet la réponse spectrale et altère la perception des couleurs. Cette approche repose sur une méthode indirecte fondée sur l'utilisation d'une pseudo-inverse au sens de Moore-Penrose, classiquement utilisée en traitement du signal et des images pour résoudre des systèmes linéaires sous-déterminés. Le principe consiste à établir une relation entre les mesures multispectrales effectuées sur des pigments vernis et des mesures de référence réalisées sur ces mêmes pigments sans vernis. Deux ensembles de données sont utilisés : d'une part, des mesures spectrophotométriques fines de pigments non vernis, constituant une base de référence ; d'autre part, les réponses multispectrales de ces pigments après application d'un vernis, acquises avec la caméra. À partir de ces données, une transformation est calculée permettant de projeter les mesures de la caméra dans un espace spectral équivalent à celui de peintures non vernies. Appliquée pixel par pixel à l'image multispectrale de *La Joconde*, cette transformation permet d'estimer une image spectrale de ce que serait l'œuvre si le vernis et le liant huileux entre les pigments étaient incolores. Le résultat de ce « dévernissage virtuel » (voir figure 3) ne constitue pas une ● ● ●

Figure 1. Reconstruction en couleur sous lumière du jour d'un détail de l'œil droit de *La Joconde* à 1523 dpi (pixel de 16,6µm). © P. Cotte.



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



Figure 2. Mélanges de pigments identifiés par zone d'intérêt. © P. Cotte.

restitution historique exacte, car on ne peut savoir si les vernis et liant d'origine étaient parfaitement incolores, mais il offre une représentation cohérente et physiquement plausible des intentions de l'artiste en matière de couleur, en rectifiant certaines dérives chromatiques induites par le vernis vieilli – par exemple la teinte verdâtre dans le ciel – et permet surtout de faciliter l'identification des pigments utilisés.

MODÉLISATION DES GLACIS – LE SFUMATO DE LA JOCONDE

Le *sfumato*, rendu célèbre par Léonard de Vinci, constitue l'un des aspects les plus remarquables de *La Joconde*. Il repose sur la superposition de glacis extrêmement fins, permettant d'obtenir des transitions progressives et quasi imperceptibles entre les zones d'ombre et de lumière, sans contours nets. Les glacis, constitués de couches transparentes ou semi-transparentes riches en liant, modifient profondément la réponse spectrale de la peinture. Leur effet est double : ils filtrent spectralement la lumière réfléchie par les couches sous-jacentes et introduisent des phénomènes de diffusion et d'absorption dépendant de leur épaisseur. La modélisation de ces couches repose sur

l'équation de transfert radiatif (ETR) dont la résolution par la méthode de la fonction auxiliaire permet de calculer le flux diffus sortant d'une couche de glacis en tenant compte des conditions aux limites aux interfaces air-vernis et glacis-couche picturale. Dans le cas de *La Joconde*,

ce calcul est réalisé dans une géométrie identique à celle des acquisitions multispectrales (éclairage à 57,5° proche de l'angle de Brewster, et collection à 0°). Cette modélisation permet de relier directement les variations spectrales mesurées aux propriétés optiques des glacis. Elle a ainsi permis de démontrer que le *sfumato* résulte de couches translucides extrêmement fines, dont les effets cumulés d'absorption et de diffusion contrôlent les transitions tonales caractéristiques de l'œuvre (Elias and Cotte, 2008).

AU-DELÀ DU VISIBLE : LA MÉTHODE L.A.M.

Les images spectrales étant très peu bruitées, il est possible de détecter d'infimes variations spectrales à certains endroits, révélatrices de traces de matières en sous-couches. La méthode L.A.M. (*Layer Amplifier Method*) est une approche différentielle originale consistant à comparer plusieurs canaux de l'image spectrale associés à diverses longueurs d'onde. Elle consiste à calculer une image à niveau de gris $I_{LAM}(x, y)$ à partir de

Figure 3. à gauche : Image de La Joconde reconstruite en couleur sous un éclairage lumière du jour (D65) ; à droite : image simulée après dévernissage virtuel. © P. Cotte.



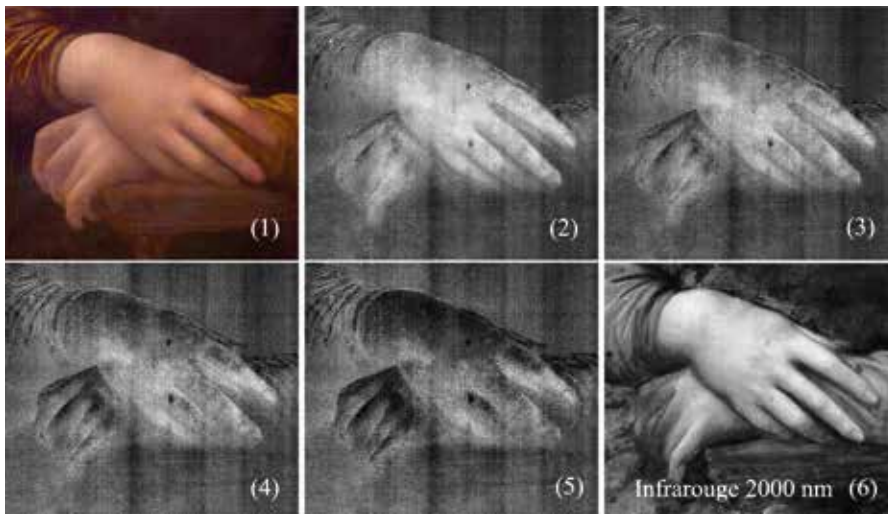


Figure 4. (1) Image visible des mains de la Joconde. (2–5) Séquence d'images L.A.M. obtenues à partir des bandes visibles 600 et 640 nm pour p variant de 0.85 à 1.2, révélant une évolution des mains. © P. Cotte. (6) Comparaison avec une image IR classique à 2000 nm. © Louvre.

deux canaux de l'image de réflectance spectrale $R_{\lambda 1}(x, y)$ et $R_{\lambda 2}(x, y)$:

$$I_{LAM}(x, y) = \gamma [R_{\lambda 1}(x, y) - p R_{\lambda 2}(x, y)]$$

où p est une variable servant à la mise à niveau similaire entre les deux images $R_{\lambda 1}(x, y)$ et $R_{\lambda 2}(x, y)$, et γ un facteur d'amplification de la différence. Une variante du modèle consistant à appliquer à $R_{\lambda 1}$ et $R_{\lambda 2}$ une transformation non-linéaire (e.g., la fonction de rémission du modèle Kubelka-Munk,

de type logarithmique) s'avère intéressante pour les zones de couleur sombre. Une deuxième variante étend le principe à la comparaison de trois canaux $R_{\lambda 1}$, $R_{\lambda 2}$ et $R_{\lambda 3}$.

Cette méthode de calcul différentiel met en évidence des traces d'éléments enfouis dont la nature et les propriétés optiques ne sont pas connues a priori. Les bandes spectrales ainsi que le facteur de correction permettant de les révéler

ne sont donc pas prédictibles. La recherche de ces structures repose sur une exploration combinatoire de l'ensemble des paires de longueurs d'onde λ_1 et λ_2 (ou de triplets $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$), en faisant varier incrémentalement les valeurs des paramètres p et γ . On génère de la sorte environ 1650 images L.A.M., à inspecter par observation directe sans connaissance a priori de celles susceptibles de révéler des éléments pertinents, en faisant défiler les images à cadence élevée, typiquement de 5 à 10 images par seconde. Une séquence vidéo illustrant ce calcul est disponible en annexe numérique (le lien vidéo est placé dans les références en fin d'article).

C'est ainsi que des traces de repentir jusqu'alors inconnus ont pu être détectés sur les mains (voir figure 4). On savait par l'imagerie infrarouge – méthode classique pour révéler des motifs sous-jacents à la peinture visible, car les rayonnements infrarouges sont très pénétrants – que l'index avait été retouché (on voit nettement le contour du doigt initial dans la figure 4-6). Mais la méthode L.A.M. révèle en outre de très fines structures, comme des hachures, qui renseignent sur la façon dont Léonard a reconstruit le modèle du doigt. On découvre aussi que ● ● ●



**LA PRÉCISION DU PHOTON
UNIQUE, AU CŒUR DU NIR**



SPCM 1064

**DÉTECTEUR À PHOTON UNIQUE NIR
POUR LA MESURE OPTIQUE DE HAUTE PRÉCISION**

- PDE typique : 57 % @ 830 nm / 58 % @ 905 nm / 10 % @ 1064 nm
- Zone active : 500 μm
- Haute linéarité à fort taux de comptage
- Option de sortie gated

APPLICATIONS

Spectroscopie Raman - Photoluminescence IR - Photonique quantique - LiDAR - Télémétrie laser - Instrumentation analytique haute sensibilité.

Suivez nous ! 

www.htds.fr
info@htds.fr

LA FLEXIBILITÉ ET L'EXPERTISE AU SERVICE DE L'INNOVATION

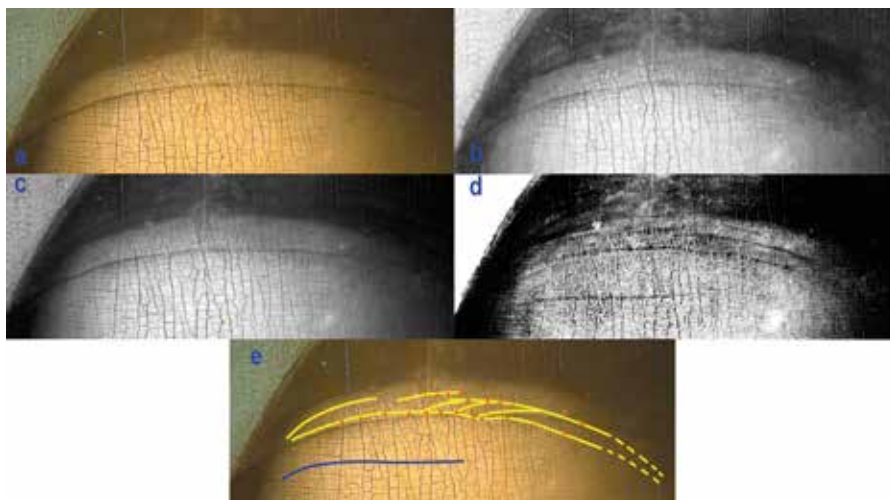


Figure 5. (a) Image couleur D65 du front de la Joconde (détail). (b) Réflectographie infrarouge à 2000 nm. © Louvre, C2RMF. (c) Filtre NIR R900 de la caméra multispectrale ; (d) Image L.A.M. ; (e) Image en couleur et contours du spolvero. © P. Cotte.

l'auriculaire a été repris. La méthode permet donc une analyse fine du processus d'ajustement de la composition par grattage ou par applications successives de fines couches picturales.

TRACES DE SPOLVERO RÉVÉLÉES

Le tableau est né à une époque où la tradition était de peindre sur bois. *La Joconde* est ainsi peinte sur un panneau de peuplier. Le support destiné à être peint subissait un long processus de préparation. Le dessin était d'abord réalisé sur papier puis transféré sur le panneau par la technique du *spolvero* : le dessin était perforé le long des contours à l'aide d'une aiguille, posé sur le support, tamponné avec une poudre de pigments noirs, laissant apparaître une succession de points pour matérialiser le tracé. De nombreux *spolveri* ont été identifiés dans d'autres portraits de Léonard, notamment *La Dame à l'hermine* (Cotte, 2014), *Ginevra de' Benci* et *La Belle Ferronnière*. Il était donc surprenant qu'aucune trace de cette technique n'ait, jusqu'à présent, été mise en évidence pour *La Joconde*. Lors de la dernière étude complète de *La Joconde*, réalisée entre 2004 et 2006 avec des moyens techniques de pointe, dont

la réflectographie infrarouge, aucune mention de *spolvero* n'a été rapportée. En 2019, malgré l'usage de capteurs infrarouges, aucune preuve ne permettait encore d'en affirmer la présence dans cette œuvre. La méthode L.A.M. a permis, pour la première fois, de mettre en évidence des traces de *spolvero* en plusieurs zones du tableau. Ces points apparaissent de manière cohérente sur le contour de la tête, sur certaines parties du visage, le front (voir figure 5), dans les zones de la robe ainsi que sur les mains, révélant ainsi des éléments préparatoires jusqu'alors restés invisibles avec les techniques d'imagerie conventionnelles.

CONCLUSION

La numérisation multispectrale de *La Joconde* et les traitements associés illustrent le potentiel des approches radiométriques pour l'étude des œuvres d'art. En combinant une acquisition à haute résolution spatiale, une modélisation physique des couches picturales et des méthodes différentielles en longueur d'onde comme la L.A.M., il devient possible de révéler des structures invisibles aux techniques classiques et d'apporter un éclairage nouveau sur le processus créatif. Au-delà du cas emblématique de *La Joconde*, la caméra multispectrale constitue aujourd'hui un outil opérationnel dans de nombreux domaines. Elle est utilisée pour l'authentification des peintures, en mettant en évidence des incohérences matérielles ou des étapes de création, mais aussi pour l'étude de manuscrits anciens, notamment la lecture de palimpsestes, où elle permet de retrouver des écritures effacées. Enfin, ces approches trouvent également des applications dans le cadre d'expertises judiciaires, où l'analyse multispectrale permet de révéler des altérations, des falsifications ou des traces invisibles à l'œil nu. Ces développements confirment que l'imagerie multispectrale, au croisement de la physique et de l'histoire de l'art, constitue un outil essentiel pour l'exploration scientifique des objets patrimoniaux. ●

RÉFÉRENCES

- [1] P. Cotte, *Monna Lisa dévoilée - Les vrais visages de La Joconde*, Illustrated-Bilingual édition. ed. Telematique, Paris (2019)
- [2] P. Cotte, *lumière on the Mona Lisa : Hidden portraits*. Vinci Editions, Saint-Fargeau-Ponthierry (2015)
- [3] P. Cotte, *lumière on The Lady with an Ermine Leonardo da Vinci*. Unprecedented Discoveries, 1^{re} édition. ed. Vinci Editions, France (2014)
- [4] M. Elias, P. Cotte, *Applied optics* **47**, 2146 (2008). <https://doi.org/10.1364/AO.47.002146>.
Lien vers la vidéo : https://youtu.be/R44tncfJwQ?si=0e40yAyL0udL_QSL

LA MICROSCOPIE OPTIQUE AVANCÉE POUR L'ÉTUDE DES OBJETS PATRIMONIAUX

Gaël LATOUR^{1,2,*}

¹ Laboratoire d'Optique et Biosciences, CNRS, Inserm, Ecole polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, Palaiseau, France

² Université Paris-Saclay, Gif-sur-Yvette, France

*gael.latour@universite-paris-saclay.fr



Mesurer l'épaisseur d'un vernis avec une précision micrométrique, cartographier l'état de conservation d'un parchemin médiéval : deux exemples de l'intérêt de l'analyse scientifique au service de la conservation-restauration. Les récents développements en microscopie optique viennent enrichir l'information accessible au service de la connaissance et de la préservation de notre patrimoine.

<https://doi.org/10.1051/photon/202613929>

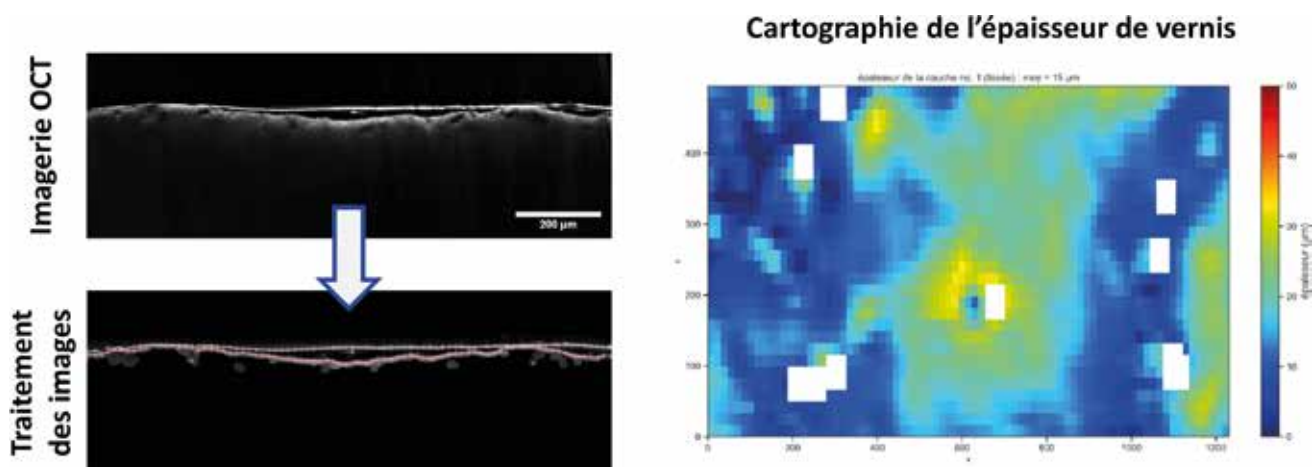
Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation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

Les objets du patrimoine présentent une large diversité de phénomènes d'interaction lumière-matière (réflexion, diffusion de surface et de volume, absorption et plus rarement diffraction et interférences) dans le domaine visible. La conséquence de ces phénomènes est une apparence visuelle particulière, qualifiée à travers les termes de couleur, brillance, transparence... Les structures d'intérêt (épaisseur des couches, présence de pigments et charges, morphologie) sont généralement complexes et présentent des tailles allant du micromètre à

quelques dizaines de micromètres. Pour analyser la structure et la composition de ces couches, l'aspect non invasif et non destructif des techniques d'investigation est un critère essentiel pour ces objets souvent uniques et fragiles. Ainsi, depuis quelques années, les techniques de microscopie optique au service du patrimoine sont en plein essor, bénéficiant de l'expertise développée en imagerie biomédicale [1]. L'objectif est d'accéder à une imagerie tridimensionnelle (3D), avec une résolution micrométrique et si possible spécifique : une information la plus proche possible de celle qui aurait été obtenue via un prélèvement.

LA TOMOGRAPHIE PAR COHÉRENCE OPTIQUE (OCT) : L'ACCÈS À UNE STRATIGRAPHIE VIRTUELLE

La tomographie par cohérence optique (OCT) est une technique largement répandue en ophtalmologie qui permet un diagnostic de la rétine, tissu inaccessible pour les autres techniques d'imagerie. Le caractère non invasif et non destructif pour une analyse des objets du patrimoine s'est rapidement révélé prometteur. L'OCT est basée sur le principe de l'interférométrie en lumière blanche centrée sur le proche infrarouge. La faible cohérence temporelle de ce type de source permet d'obtenir ●●●



un signal d'interférence très localisé ce qui garantit le principe de coupe optique avec une résolution de l'ordre du micromètre au sein de l'échantillon analysé. Tout élément réfléchissant ou diffusant pourra être détecté par interférométrie. L'imagerie est donc non spécifique et donne une information sur la morphologie de l'objet étudié : nombre de couches, épaisseur des couches et présence de

particules diffusantes [1-2]. La principale limitation de cette technique est sa profondeur de pénétration liée aux propriétés d'absorption et de diffusion

des matériaux. Les matériaux étudiés doivent donc être semi-transparents, ce qui en fait un outil de choix pour la caractérisation des vernis.

RETROUVER LE VERNIS ORIGINAL D'UN VIOLON AMATI DU 17^e SIÈCLE

Nicolo Amati était un luthier au 17^e siècle dans la ville italienne de Crémone, époque réputée pour la lutherie avec la production de prestigieux instruments. Le violon étudié, daté de 1678, possédait encore son vernis original sous un vernis contemporain déposé dans les années 2000. L'objectif du travail de restauration était de cartographier la

présence de ces vernis et d'élaborer un protocole de restauration efficace et respectueux du vernis original afin de redonner son apparence originale à cet instrument d'exception [2]. L'imagerie scientifique vient en appui des expertises du luthier et de la restauratrice pour apporter une information inaccessible à la simple observation visuelle.

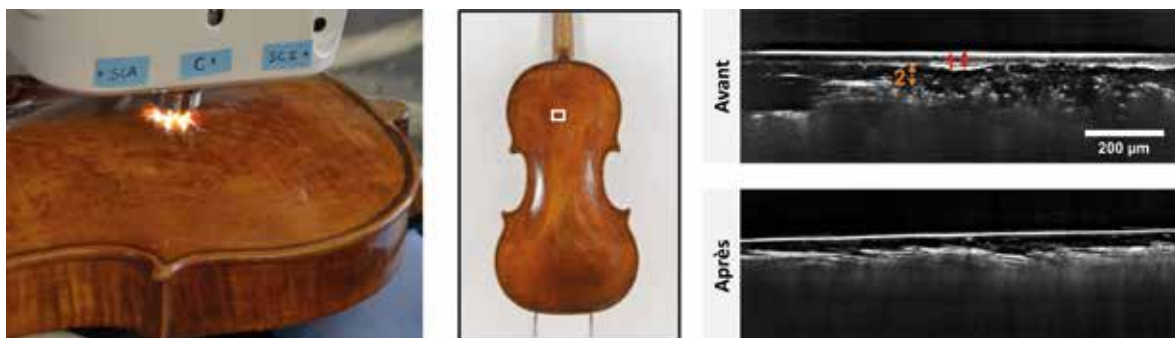


Figure 2. Photographies de la sonde OCT en cours d'analyse du violon Amati (1678) et du dos du violon avant restauration (la zone analysée est indiquée par un rectangle blanc). Imagerie OCT avant restauration (la couche 1 indique le vernis contemporain des années 2000 et la couche 2 le vernis original) et après restauration avec la seule présence du vernis original. ©G. Latour/LOB.

Le vernis, en peinture de chevalet, possède un rôle protecteur pour les couches picturales sous-jacentes, mais également une fonction esthétique – effets de brillance et de saturation des couleurs. Cette couche, rarement originale, se dégrade en quelques dizaines d'années entraînant un jaunissement ou une opacification. Elle a donc vocation à être régulièrement retirée et remplacée. Une caractérisation fine du nombre de couches et une cartographie de son épaisseur sont des informations précieuses pour une meilleure connaissance de l'œuvre ou en amont d'un travail de restauration. Au moment du retrait du vernis, de nombreuses questions se posent pour les professionnels de la conservation-restauration : efficacité du solvant et du mode d'application, retrait complet du vernis ou allègement, développement d'alternatives moins éco-toxiques. Dans la pratique quotidienne, l'expertise visuelle permet d'évaluer l'efficacité d'un traitement, mais l'OCT peut venir objectiver ces informations et accéder à une information complexe dans la profondeur. Au-delà de l'imagerie, un traitement automatisé des images (localisation des interfaces, mesure de distances) donne accès à la taille des structures et une cartographie de l'épaisseur des couches. La résolution garantie par l'imagerie OCT permet un suivi précis lors du développement de protocoles d'allègement de vernis.

Enfin, les objets patrimoniaux, de part leur taille ou leur valeur, peuvent rarement être déplacés. Il est donc indispensable d'être en capacité de proposer des analyses in situ dans les ateliers de restauration ou sur site. La sonde optique OCT est donc transportable, mais également légère et orientable afin de s'adapter à la morphologie et l'accessibilité des zones d'analyse. La photographie en tête de cet article illustre les analyses effectuées, sur un échafaudage, dans le cadre du chantier de restauration des plafonds peints par Eugène Delacroix de la bibliothèque de l'Assemblée Nationale (Paris).

LA MICROSCOPIE OPTIQUE NON-LINÉAIRE (OU MULTIPHOTON) : UNE IMAGERIE SPÉCIFIQUE

La microscopie optique non linéaire repose sur l'interaction non linéaire entre la lumière et l'échantillon. Cette interaction

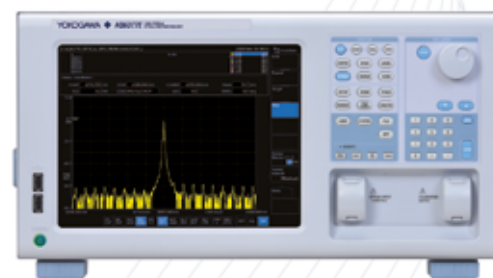
est ainsi qualifiée car plusieurs photons incidents interagissent avec le milieu pour donner lieu à un seul photon émis. Ce phénomène étant peu probable, il ne se produit que très localement au niveau du volume focal, ce qui garantit un sectionnement optique intrinsèque. Dans le cas des phénomènes à deux photons, deux types de signaux, d'origine physique distincte, peuvent être enregistrés simultanément. La fluorescence excitée à deux photons (2PEF) correspond à l'absorption simultanée de deux photons puis à l'émission de fluorescence. Ces signaux peuvent être issus de nombreux fluorophores présents dans les matériaux du patrimoine. En parallèle, il est possible de collecter des signaux de génération de seconde harmonique (SHG). Ce phénomène est lié à la présence d'électrons polarisables au niveau moléculaire et ne se produit que dans le cas d'une organisation non centrosymétrique à cette échelle. Les signaux émis étant cohérents, il est également nécessaire d'avoir une organisation non centrosymétrique à l'échelle du volume focale. Le signal SHG est ainsi une sonde du collagène fibrillaire dans les tissus biologiques (cornée, tendon, peau...) ou pour tout matériau réalisé à base de peaux animales (parchemin, cuirs, peau des espèces naturalisées...) [1]. À l'inverse, dans le cas d'une dénaturation du collagène, associée à une perte de la structure en fibrille et en triple hélice pouvant aller jusqu'à la formation de gélatine, la microscopie permet de suivre la perte des signaux de SHG et l'augmentation des signaux de fluorescence. Cette technique garantit une sonde sans contact et non-destructive de la préservation du collagène fibrillaire équivalente aux techniques de diagnostic conventionnelles basées sur un prélèvement de matière [3].

Au-delà de l'imagerie, l'enjeu est d'accéder à une information quantitative pour un suivi le plus précis possible des différents stades de la dégradation du collagène, mais également de l'influence des conditions d'altération (hydrolyse ou oxydation) afin d'élucider les processus physico-chimiques impliqués dans cette dénaturation. Par exemple, il est possible de caractériser les intensités relatives de fluorescence et de SHG pour suivre l'évolution de ces signaux. Par ailleurs, il est également

Caractérisation avancée des sources laser IR & QCL

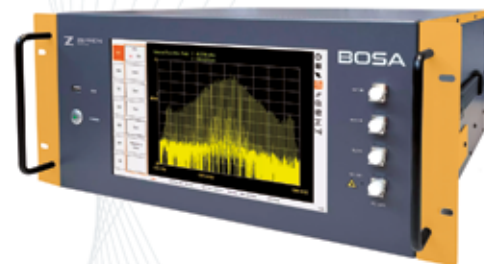
Analyse spectrale MWIR, cohérence et mesure de phase

YOKOGAWA



AQ6377E : Analyse spectrale MWIR jusqu'à 5,5 µm.

ZEPREN Solutions



BOSA : Mesure haute résolution, phase et polarisation.



INFOS

www.wavetel.fr
about@wavetel.fr

ARRAGON PHOTONICS

YOKOGAWA

QUANTIFI PHOTONICS

ZEPREN

ACTIVE TECHNOLOGIES

FIBERPRO

etsc

LIGHTTEL

FBG KOREA

SHIMU

TECHNICS

BKtel

ÉVALUER L'ALTÉRATION DES PARCHEMINS MÉDIÉVAUX DE CHARTRES

La médiathèque de Chartres possède un prestigieux fonds de manuscrits historiques sur parchemin du XIII^e siècle. La majeure partie de ces manuscrits a été détruite ou altérée à des degrés divers par un incendie lié à un bombardement lors de la Libération en 1944 : les parchemins ont alors été exposés au feu puis à l'eau utilisée pour éteindre l'incendie. La microscopie optique non-linéaire a permis de

cartographier l'état de conservation du parchemin de plusieurs manuscrits et de montrer une différence d'état de conservation du support entre le centre et la périphérie. Par ailleurs, une restauration par humidification a été menée en 2009 pour la remise à plat de certains feuillets et il a été possible de confirmer l'absence de conséquences du traitement de restauration [4].

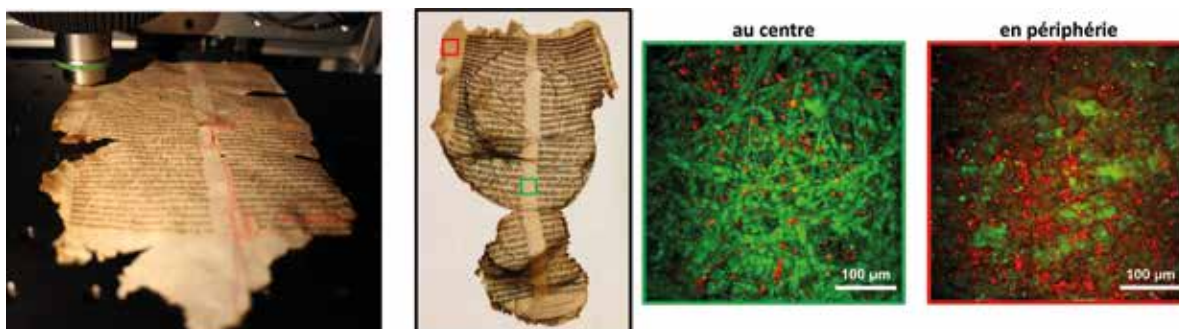


Figure 3. Photographie d'un parchemin issu du fonds de la bibliothèque de Chartres analysé en microscopie multiphoton. Images en fausses couleurs de microscopie optique non-linéaire avec les signaux de génération de seconde harmonique correspondant au collagène fibrillaire (en vert) et la fluorescence excitée à deux photons, liée à la dégradation du collagène (en rouge). Le centre du parchemin est bien conservé alors que la périphérie est davantage altérée. ©M. Schmeltz/LOB.

possible de recourir à la polarimétrie des signaux SHG pour accéder à l'organisation tridimensionnelle du collagène (orientation dans le plan, désordre à différentes échelles) [4].

Les perspectives d'application sont bien plus larges que l'analyse des objets à base de collagène et sont encore à explorer largement. Il est ainsi possible d'étudier les propriétés de fluorescence des vernis et pigments, mais également de sonder d'autres matériaux émettant de la SHG tels que la cellulose dans les papiers ou les textiles archéologiques [5].

CONCLUSION

Comme pour l'imagerie biomédicale, la complémentarité entre les techniques de microscopie et d'autres approches, comme l'imagerie optique à large champ, est riche et précieuse. La réflectographie infrarouge, du fait de sa plus grande profondeur de pénétration, permet d'accéder à

des inhomogénéités au niveau des couches de peintures ou bien à la présence des dessins sous-jacents. La fluorescence sous excitation UV permet une cartographie des couches de vernis et elle est utilisée en routine pour le suivi de l'allègement de vernis au cours d'une restauration. Quant à l'imagerie hyperspectrale, elle propose une cartographie des matières

colorantes sur la base des spectres de réflectance. Quelles que soient les techniques disponibles, l'analyse des matériaux du patrimoine est toujours un travail interdisciplinaire qui repose sur une expertise partagée et au service d'un questionnement autour des phénomènes de dégradation ou des traitements de conservation-restauration. ●

RÉFÉRENCES

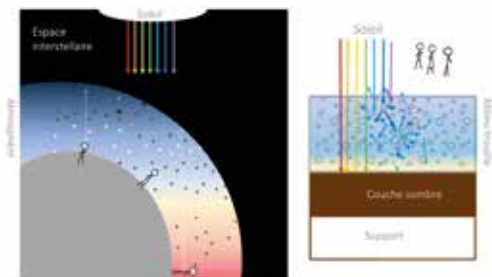
- [1] G. Latour, L. Robinet, « La microscopie optique tridimensionnelle, de l'imagerie biomédicale à la caractérisation des objets du patrimoine, Instrumentation portable. Quels enjeux pour l'archéométrie ? », ed. Archives contemporaines (2019), <https://eac.ac/articles/2469>
- [2] G. Galante *et al.*, npj Herit. Sci. **14**, 193 (2026)
- [3] G. Latour *et al.*, Sci. Rep., 26344 (2016)
- [4] M. Schmeltz *et al.*, Sci. Adv., eabg1090 (2021)
- [5] Reynaud *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci. **33**, 19670 (2020)

LE BLEU SANS PIGMENT : ENTRE PHYSIQUE ET CRÉATION ARTISTIQUE

Amina BENSALAH-LEDOUX, Cécile LE LUYER, Kevin VYNCK, Anne PILLONNET*

Institut Lumière Matière, Université Lyon1/CNRS, France

*anne.pillonnet@univ-lyon1.fr



<https://doi.org/10.1051/photon/202613933>

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.

QUAND LE BLEU VIENT DE LA DIFFUSION RAYLEIGH

Le bleu est aujourd'hui une couleur familière, mais sa fabrication a été loin d'être triviale ; il a longtemps reposé sur des pigments rares et coûteux. Pourtant, dans la nature, certains bleus ne viennent pas d'un colorant : ils émergent de l'interaction de la lumière avec une structure fine de la matière.

Cette distinction entre couleur pigmentaire et couleur structurale est aujourd'hui bien connue en optique. Dans le premier cas, la matière absorbe certaines longueurs d'onde et en réfléchit d'autres. Dans le second, la couleur provient de la manière dont la lumière est diffusée, réfléchie par une micro- ou nanostructure ou interfère avec elle.

Le bleu en art est souvent associé à un pigment bleu. Pourtant, dans la nature, cette couleur provient souvent de structures fines diffusant la lumière, comme le ciel. Nos recherches ont ainsi montré qu'un bleu pictural intense et des verres bleus peuvent être obtenus sans colorant bleu, grâce à la diffusion Rayleigh dans un milieu désordonné. Une démonstration à la croisée de la photonique, des matériaux et des pratiques artistiques, qui ouvre de nouvelles perspectives sur les matières colorées et l'histoire du bleu.

Parmi les couleurs structurales, les couleurs iridescentes, comme celles des plumes de paon, sont très intenses avec une importante variabilité angulaire. Leur production exige la fabrication précise d'une structuration périodique à l'échelle de la longueur d'onde. Si la nature sait très bien le faire, et, qu'aujourd'hui, suite aux recherches en photonique et aux avancées technologiques, certains marchands de couleurs proposent des pigments synthétiques, il est délicat d'imaginer leur conception par les artisans anciens.

Ainsi, nous nous sommes intéressés à la place que la coloration structurale par la diffusion Rayleigh

occupe dans les objets d'art. Cette diffusion colorée s'organise dans des systèmes désordonnés de particules dont la taille est plus petite que la longueur d'onde et pour lesquels la fabrication apparaît moins exigeante qu'un système photonique ordonné. C'est ce mécanisme qui explique le bleu du ciel. Les molécules de l'atmosphère ne sont pas bleues ; elles diffusent plus efficacement la lumière bleue que la lumière rouge. C'est l'origine aussi de la couleur bleue des glaciers, de certaines plumes, ailes de papillon ou encore des yeux clairs.

L'idée forte de nos travaux récents est d'avoir transposé ce phénomène dans un matériau condensé, ●●●

voire une couche picturale, tel le schéma décrit en figure 1a. En pratique, il s'agit de disperser dans un liant transparent des particules transparentes suffisamment petites pour que leur réponse optique soit dominée par la diffusion sélective des courtes longueurs d'onde. Si les conditions sont bien ajustées, le système paraît bleu. La recette paraît simple, mais elle exige une matrice homogène, des particules fines qui y restent en suspension, une densité adaptée. Par ailleurs l'identification de son usage effectif dans une œuvre d'art est plus délicate que la recherche de pigments chimiques.

RECHERCHE ET CRÉATION ENTRE ART ET SCIENCE

Le point de départ de ce travail n'est pas uniquement scientifique. Il est aussi artistique. Une collaboration entre une artiste contemporaine avignonnaise, Anne Goyer, et plusieurs équipes scientifiques de Lyon, a permis de montrer qu'il est possible d'obtenir un bleu structurel intense par une pratique de peinture à l'huile par superposition de couches translucides [1]. Pratique classique de la Renaissance, appelés technique des glacis, utilisant matières et outils non issus de laboratoire, et nécessitant plusieurs mois de création pour respecter le séchage de chaque couche de l'empilement.

Le protocole pictural repose sur deux étapes essentielles : la préparation par l'artiste d'un fond sombre brillant et homogène, au départ à base de bitume naturel, et, l'application de plusieurs couches de glacis constituées de particules de craie blanche dans un milieu transparent.

Le bleu n'apparaît pas immédiatement : il émerge progressivement lorsque la structure finale atteint les bonnes conditions de diffusion. L'épaisseur des couches, le temps de séchage, la finesse des particules et la qualité optique du fond sont déterminants. Il ne s'agit donc pas seulement d'une « recette », mais d'un véritable savoir-faire.

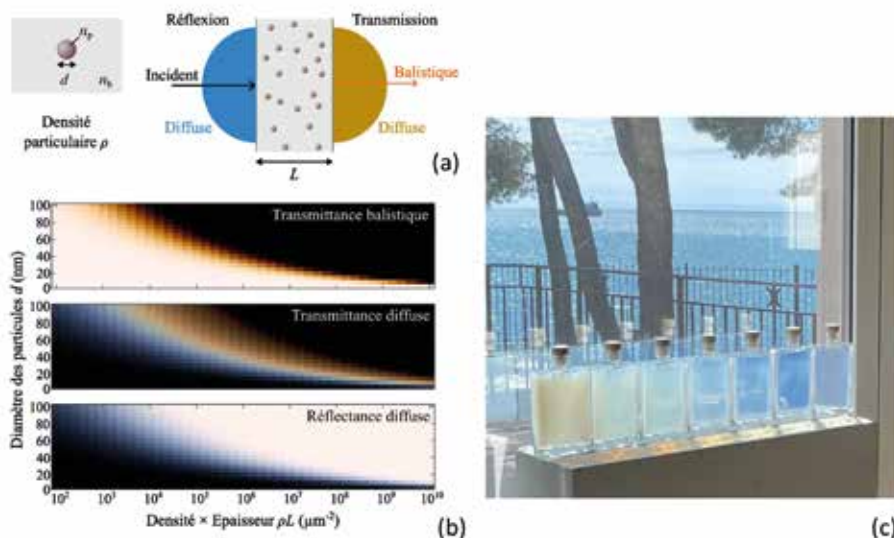


Figure 1. Palettes de couleurs structurales des milieux troubles non absorbants dans le régime de diffusion de Rayleigh : (a) Le milieu modélisé est un plaqué d'épaisseur L , éclairé sous incidence normale, consistant en une dispersion désordonnée de petites particules sphériques de diamètre d et d'indice de réfraction n_p dans une matrice d'indice de réfraction n_b , de densité ρ . (b) Résultats décomposés en transmittance balistique (en haut), transmittance diffuse (au milieu) et réflectance diffuse (en bas), en fonction de la densité réduite des particules ρL et du diamètre des particules d [3]. (c) Liquides atmosphériques, particules incolores nanométriques et eau, aucun pigment bleu, Installation dans le cadre de l'exposition 420nm d'Anne Goyer, Centre d'Art Fernand Léger, Port de Bouc, 2026.

Pourquoi cela marche-t-il ?

D'après l'étude, les particules blanches utilisées par l'artiste (blanc de lithopone) présentent deux familles de tailles après le broyage à la main dans un mortier. Parmi elles, les nanoparticules proches de 100 nm sont essentielles pour diffuser préférentiellement le bleu par diffusion de Rayleigh. Les autres particules plus grosses, au contraire, tendent à blanchir la couche picturale si elles sont trop nombreuses. L'analyse des couches picturales de l'artiste ont montré de manière spectaculaire que la sélection des particules nanométriques est possible manuellement lors de l'application au pinceau (figure 2). Elle implique néanmoins une excellente expertise dans la pratique picturale.

Un autre point important est la réalisation du fond sombre. Celui-ci absorbe une grande partie des autres composantes lumineuses et renforce visuellement la lumière bleue diffusée. En d'autres termes, à l'œil, le bleu n'apparaît pas comme une couche « déposée », mais comme une couleur émergente :

il naît de l'interaction entre lumière, matière nanostructurée et arrière-plan absorbant et peu diffusant à la fois. On passe ainsi d'une logique de coloration par absorption spectrale à une logique de coloration par diffusion spectrale.

Le premier résultat artistique de cette collaboration est contenu dans la couleur des yeux d'un portrait, nommé Hineni, produit par l'artiste Anne Goyer¹ (figure 2b). Cette œuvre d'art est entrée dans la collection permanente contemporaine du musée Pio Monte della Misericordia à Naples (Italie) suite à son exposition en 2018. L'artiste poursuit son travail de recherche et création vers des monochromes bleus structuraux.

UN NOUVEAU REGARD SUR L'HISTOIRE DES SAVOIR-FAIRE ARTISTIQUES

Ce résultat a rapidement fait écho à des descriptions anciennes, notamment attribuées à Léonard de Vinci, qui

¹ www.anne-goyer.com

évoque un « azzurro » obtenu à partir d'un blanc très fin posé sur un fond noir [2]. Dans ces notes, il compare même ce bleu à celui de la fumée de cheminée ou du ciel. Ce qui, à l'époque, pouvait résulter aussi bien d'un savoir d'atelier ou d'une observation empirique de son environnement.

Néanmoins, d'un point de vue de la taille des particules, les analyses de certaines grandes toiles de cette époque montrent que la taille des grains de la céruse (le pigment blanc majoritaire de cette époque) sont compatibles avec la diffusion Rayleigh [3]. D'un point de vue de la technique, l'empilement de couches translucides a été utilisé magnifiquement par l'artiste.

Dans d'autres œuvres picturales de grands peintres du XVII^e siècle, dont Pierre Paul Rubens et Johannes Vermeer, la présence de particules fines blanches dispersées est également observée. Les historiens et restaurateurs ont souvent décrit ces milieux désordonnés comme des milieux turbides troubles ou opalescents.

Il serait évidemment excessif d'affirmer que les peintres maîtrisaient la diffusion Rayleigh au sens moderne. En revanche, il est tout à fait plausible qu'ils aient observé et exploité empiriquement certains effets de diffusion structurelle. Cela ne signifie pas que les zones picturales bleues sont « sans pigment bleu », mais que certains effets subtils — notamment dans les glacis, les ombres colorées ou certains modelés — pourraient résulter en partie de phénomènes de diffusion et non uniquement de pigments colorés.

Néanmoins, ces effets ont pu devenir difficiles à observer aujourd'hui à cause du jaunissement des huiles et des vernis, ou des altérations liées au vieillissement comme les craquelures qui génèrent de la diffusion blanche. Un bleu physique subtil peut ainsi disparaître visuellement avec le temps, même si sa structure matérielle est encore partiellement présente.

Cela ouvre des pistes passionnantes pour l'histoire des techniques picturales et la conservation-restauration des œuvres anciennes. En particulier, la formulation précise du lien entre paramètres et couleur pourrait aider à mieux interpréter l'apparence passée de certaines œuvres. Cela pourrait aussi guider des stratégies de restauration ou de reconstitution plus fidèles, non seulement du point de vue chimique, mais aussi du point de vue optique.

COMPRENDRE LA PALETTE DES BLEUS STRUCTURELS

Les chercheurs ont alors modélisé la manière dont la couleur varie en fonction de quelques paramètres physiques simples : taille des particules, concentration, épaisseur du matériau et présence d'absorbeurs noirs [4]. Pour cela, ils ont utilisé une méthode numérique, dite de Monte Carlo : le transport de la lumière dans un milieu turbide est prédit en simulant un grand nombre de marches aléatoires, dont les paramètres sont établis théoriquement à partir des paramètres physiques. Issue de la théorie du transfert radiatif, cette méthode se distingue des approches conventionnelles pour l'étude de l'apparence des matériaux [5] par son aptitude à fournir des prédictions quantitatives pour des matériaux présentant des formes, tailles et paramètres de diffusion et d'absorption arbitraires.

Une couleur mouvante du bleu à l'orange

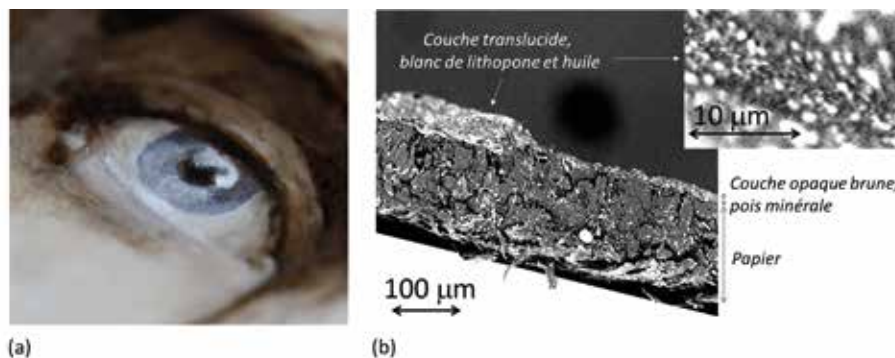
L'un des enseignements majeurs est qu'un matériau basé sur la diffusion Rayleigh ne possède pas une « couleur fixe » comme un pigment classique. Sous un éclairage blanc, sa couleur dépend fortement des conditions d'observation (figure 1b). En transmission directe, il peut paraître orangé ou rougeâtre, en transmission et réflexion diffuse, il peut devenir bleu. S'il diffuse trop fortement, il peut blanchir. S'il absorbe trop, il peut noircir.

Autrement dit, la couleur résulte d'un équilibre entre diffusion et absorption, mais aussi entre lumière transmise et lumière réfléchie. C'est un comportement bien plus riche que celui d'une simple peinture pigmentaire.

Ce comportement rappelle immédiatement l'optique atmosphérique : le ciel est bleu lorsqu'on regarde la lumière diffusée latéralement, mais, au crépuscule, il devient rouge lorsqu'on observe la lumière solaire transmise au travers une grande épaisseur d'atmosphère.

Les simulations et les expériences montrent qu'il existe une plage de paramètres où un matériau peut apparaître bleu à la fois en réflexion diffuse et en transmission diffuse. C'est particulièrement intéressant pour des applications autour de matériaux pour les vitrages, pour l'art et le design lumineux.

Figure 2. (a) *Hineni*, Anne Goyer, 2019, dessin sur papier, poix minérale, craie blanche, aucun pigment bleu, 60×50 cm, Musée Pio Monte della Misericordia, Naples, 2019, Collection contemporaine permanente du Musée (b) Coupe transversale d'une couche picturale similaire, images réalisées au microscopie électronique à balayage pour analyser la taille des particules de craie de blanc de Lithopone [1]



Pourquoi le noir révèle le bleu ?

Un autre résultat important de ces travaux tient au rôle des absorbeurs noirs. Dans la pratique picturale décrite, sans le fond sombre, le système diffuse certes la lumière, mais il tend souvent à paraître blanc ou gris pâle. En effet le noir agit comme un filtre optique passif. La lumière aux grandes longueurs d'onde pénètre profondément dans la couche, et a plus de chances d'être absorbée par le fond sombre. À l'inverse, la lumière à courte longueur d'onde est plus efficacement diffusée près de la surface, et donc ressort plus facilement vers l'observateur.

En pratique, le fond noir supprime une partie du « bruit optique » qui diluerait la coloration. Il permet au bleu structural de devenir visuellement dominant.

Ces travaux montrent que le noir peut être introduit sous forme d'absorbants dispersés dans la matrice. C'est même l'un des résultats conceptuels les plus captivant de ces travaux : ajouter du noir à un système diffusant blanc peut faire émerger du bleu.

VERS DES MATÉRIAUX COLORÉS PLUS SOBRES ET DURABLES

Les chercheurs ont conçu et analysé des matières diffusantes pour valider l'étude numérique du transport de la lumière et ouvrir de nouvelles pistes de fabrication de matières colorées. Des matériaux solides colorés par diffusion de Rayleigh ont été fabriqués à partir de suspensions colloïdales, sous forme de verres hybrides de type sol-gel, et argile à base de borosilicates. Ces matériaux peuvent être moulés, ajustés en épaisseur, et conçus pour produire des couleurs ciblées en fonction de leur microstructure [4].

L'intérêt potentiel est de proposer une alternative à certains pigments ou colorants problématiques par leur toxicité, leur rareté ou leur instabilité. De plus cette gamme donne de nouvelles libertés esthétiques, puisque la couleur varie avec l'éclairage, l'angle d'observation ou le fond, dont les applications en design, en architecture et en arts décoratifs,

peuvent créer des ambiances et des apparences lumineuses évolutives (figure 1c).

Bien sûr, les couleurs structurales sont souvent plus délicates à contrôler qu'un pigment conventionnel. Ces systèmes restent sensibles à la microstructure, à l'épaisseur et à la formulation. Néanmoins, la modélisation numérique montre que ce type de couleurs structurales est robuste à la polydispersité en taille et forme des particules, contrairement par exemple aux couleurs iridescentes ou basées sur les résonances de Mie. En effet, la clef est la sélection de tailles inférieures à 100nm.

Ces matières ne remplaceront pas demain tous les pigments bleus de l'industrie mais elles illustrent une direction de recherche très actuelle : produire la couleur par architecture optique plutôt que par chimie colorante. Ces travaux apportent ainsi des éléments concrets d'échange pour des projets entre artisanat, science des matériaux et simulation numérique.

CONCLUSION

L'un des attraits de ce cheminement, à la croisée entre l'art et la science, réside dans le dialogue qu'elle instaure entre plusieurs siècles de culture matérielle : celui d'un bleu qui ne tient pas à un pigment, mais à une organisation de la matière et de la lumière. Elle montre aussi comment un phénomène « naturel » bien connu

peut être reproduit à petite échelle et contrôlé dans des objets ou des matériaux artificiels.

Ces travaux sur cette couleur bleue mettent en lumière un principe fondamental : percevoir une couleur ne consiste jamais seulement à observer une substance, mais à saisir une interaction entre une structure, une lumière et un regard. De ce point de vue, le « bleu physique » dépasse le simple objet scientifique et devient une illustration particulièrement élégante de la manière dont la physique ne se contente pas d'expliquer *a posteriori* un effet visuel, mais offre aussi les moyens de reformuler un savoir-faire ancien voir participe à la création.

Cette coloration bleue, dite Rayleigh, ne se limite d'ailleurs pas aux œuvres picturales : elle a été identifiée dans des couches d'émail anciennes, notamment dans les céladons chinois [6]. La stabilité de la matière a permis à la teinte de se conserver jusqu'à aujourd'hui. De ces nuances, le poète Lu Yu (733-804) écrit :

*Ronds comme l'âme
d'une lune à son coucher,
légers comme l'âme d'un nuage
montant dans les airs. ●*

REMERCIEMENTS

Nous remercions l'ensemble de nos collaborateurs scientifiques et historiens, ainsi que l'artiste Anne Goyer pour cette fructueuse collaboration de recherche-crédation.

RÉFÉRENCES

- [1] A. Goyer *et al.*, Arts et science journal **19**, 3 (2019)
- [2] A. Goyer, A. Pillonnet, R. Thomas, Peindre en bleu sans pigment bleu : le bleu « physique » en peinture, du *xxi*^e au *xvi*^e siècle, dans « Les bleus et verts : couleurs et lumières », (Edn. Herrmann, 2022)
- [3] V. Gonzalez *et al.*, Microchemical journal **125**, 43 (2016)
- [4] K. Vynck *et al.*, ACS Photonics (2026)
- [5] M. Hébert, Optical models for material appearance, (Science Press, EDP Sciences, 2022)
- [6] P. Shi *et al.*, Ceramics International **43**, 2943 (2017)

LE VITRAIL, UN FILTRE OPTIQUE: QUAND LA CHIMIE ET LA PHOTONIQUE FABRIQUENT LA COULEUR

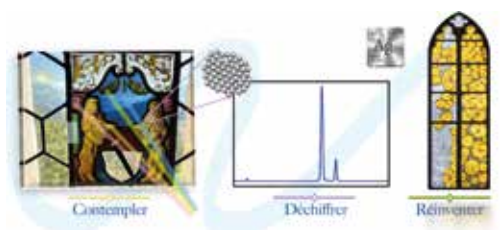
Julien PROUST^{1,3,*}, Flavie SERRIERE VINCENT PETIT^{2,3}

¹ Université de Technologie de Troyes, CNRS UMR 7076, Troyes

² Manufacture Vincent Petit, Troyes

³ ANR Labcom LUMINANO : Lumière - Nano-Optique – Vitrail

*julien.proust@utt.fr



<https://doi.org/10.1051/photon/202613937>

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.

« Le vitrail c'est la peinture qui participe le plus directement du brillant de la lumière cosmique ; c'est la seule qui colore aussi les autres choses, en mêlant à elles sa propre image. »¹

Alain 1931

O n présente volontiers le vitrail comme un art ancien de la couleur, du récit et de la lumière, mais c'est aussi un objet technologique optique. Entre le soleil, le verre et l'œil, il agit comme un filtre spectral, un milieu

Le vitrail peut être considéré comme un système optique où lumière, matière et perception interagissent. Filtre spectral et milieu diffusant, il module empiriquement absorption et transmission. Certaines techniques, comme le jaune d'argent, relèvent d'une structuration nanométrique de la matière. Entre patrimoine et physique contemporaine, le vitrail apparaît comme un laboratoire ancien de l'interaction lumière-matière.

diffusant et, parfois, un matériau nanostructuré. Bien avant que les concepts aient été formalisés, les peintres verriers faisaient de la photonique sans le savoir.

UN DISPOSITIF OPTIQUE ÉLÉMENTAIRE

Regarder un vitrail, c'est d'abord se trouver au cœur d'un système optique à la fois simple dans son principe et universel (figure 1) : une source, un objet, un détecteur.

La source est le soleil. L'objet est le vitrail. Le détecteur est bien évidemment l'œil humain. Cette description, presque scolaire, est pourtant suffisante pour entrer dans l'intelligence profonde de l'œuvre. Le vitrail ne produit pas lui-même la lumière ; il la reçoit, la transforme et l'adresse au regard. Il n'est pas source, mais médiation.

Dès le Moyen Âge, il est pensé comme un dispositif de transformation de la lumière. Les écrits de ●●●

¹ Alain (Émile Chartier), *Vingt leçons sur les BEAUX-ARTS*, 1931, Leçon XVIII page 98.

Site web: <http://bibliotheque.uqac.quebec.ca/index.htm>



Figure 1. Système optique typique du vitrail.

Suger – abbé de St Denis au XII^e siècle – témoignent d'une conception dans laquelle la lumière, en traversant la matière, s'élève de sa condition physique vers une dimension spirituelle. Le vitrail opère une médiation entre visible et invisible, entre phénomène optique et expérience du sacré. En filtrant la lumière, il crée l'espace du sacré, il accompagne l'architecture et la liturgie.

Du point de vue de l'optique, cette médiation lumineuse repose sur une première donnée essentielle : la lumière solaire n'est pas homogène. Elle est constituée d'une palette de longueurs d'ondes inégalement réparties, dont seule une partie, « visible », est perçue par l'œil humain. L'artiste travaille donc dans les limites d'un système couplant le spectre de la source, les propriétés du matériau et la sensibilité du détecteur. Cette triade a été saisie de manière empirique par les verriers bien avant sa formalisation scientifique.

FILTRE LA LUMIÈRE : VERRE, PLOMB ET GRISAILLE

Le premier point important est presque contre-intuitif : un vitrail ne crée pas la couleur. Comme une vitre ordinaire, le vitrail est d'abord un filtre spectral. Mais là où la fenêtre recherche une transparence relativement neutre, le vitrail organise la transformation de la lumière : il en transmet certaines longueurs d'onde, en affaiblit d'autres, en diffuse une partie et en module l'intensité comme la direction. L'œuvre est

donc moins une image posée sur un support qu'un dispositif de traitement lumineux.

Cela explique une différence fondamentale entre peinture de chevalet et peinture sur verre. Dans un tableau, la lumière est réfléchie, et à l'intérieur du cadre, la clarté, les ombres et ses modulations sont peintes par des artifices techniques. Dans un vitrail, la lumière traverse l'œuvre, elle en est constitutive.

Que traverse exactement la lumière ? Des pièces de verre plat, teintées ou non dans la masse, assemblées par des plombs et peintes en

grisaille, en jaune d'argent, en émail. Le peintre verrier compose alors avec des paramètres matériels et formels : épaisseur, texture, opacité locale, état de surface, composition du verre et cycle thermique.

LE VITRAIL COMME FILTRE : ÉVOLUTION DES TECHNIQUES

L'évolution technique du vitrail montre bien comment cette maîtrise de la lumière s'est raffinée au cours des siècles (figure 2). Du haut Moyen Âge jusqu'au début du XIV^e siècle, le vitrail est d'abord une mosaïque de verres colorés assemblés par des plombs. Le motif naît du dessin des plombs autant que de la couleur des pièces. La grisaille est une peinture composée d'une phase vitreuse et d'une phase d'oxydes métalliques, mate et opaque après cuisson à 630°C. Utilisée à partir du V^e-VI^e siècle en vitrail en occident. Elle module la lumière selon son application : déposée en couches plus ou moins fines — « putoisées » ou « blaireautée » —, elle atténue la transmission ; « enlevés », elle laisse au contraire le verre nu et libère la lumière ; appliquée en trait, elle agit comme un écran opaque,

Figure 2. Évolution des techniques entre, à gauche un vitrail XIII^e (Zacharie, basilique Saint-Urbain, Troyes), à droite un vitrail du XVI^e (verrière de l'Assomption et du Couronnement de Marie, Collégiale Notre-Dame-en-Vaux, Châlons-en-Champagne).



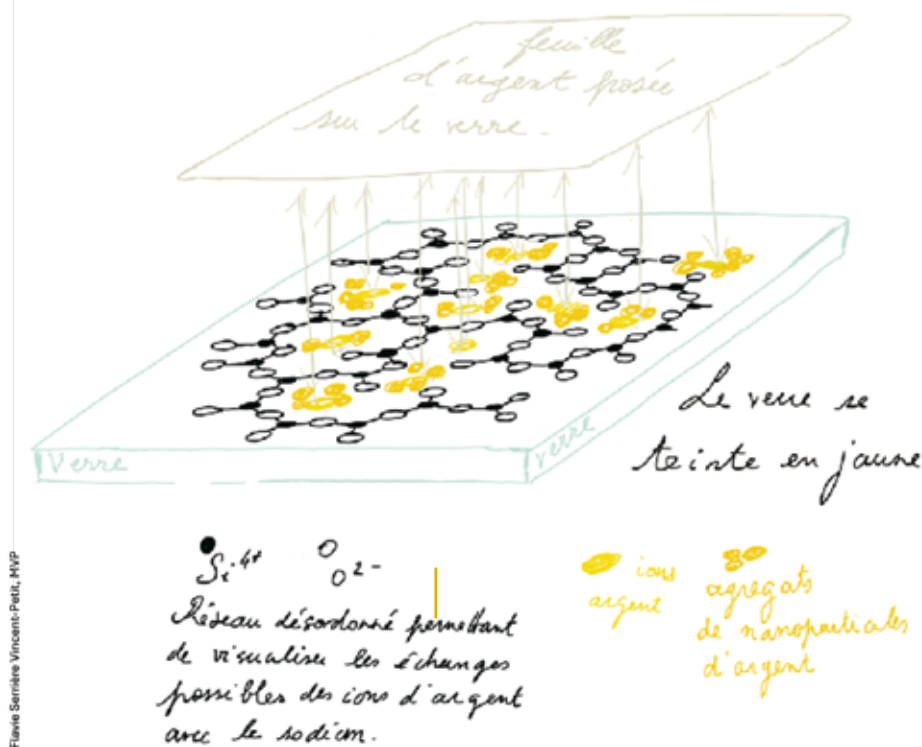


Figure 3. Schéma des échanges ioniques entre les composants du verre et les composants de la peinture, menant à la formation de nano-agrégats d'argent.

comparable au plomb. Ces modelés en grisaille produisent des variations contrôlées de la transmission lumineuse. Ainsi, la grisaille précise et complète l'ensemble : pupilles des yeux, drapés, fils des chevelures. Son caractère mat et opaque lui permet d'arrêter la lumière et de renforcer la lisibilité du motif en contre-jour. De loin, plomb et grisaille se répondent dans une même écriture noire. Le vitrail médiéval est alors un art de la découpe lumineuse.

À partir du XIV^e siècle, l'apparition du jaune d'argent, peinture par cémentation cuite au-dessus de la température de transition vitreuse, T_g , permet de juxtaposer deux couleurs sur une même pièce de verre sans plomb de liaison. Les visages s'agrandissent, les auréoles se nuancent, les chevelures s'illuminent, les compositions gagnent en continuité et en lumière.

Au XVI^e siècle, cette évolution trouve un équilibre remarquable : les plombs soulignent encore la structure, mais la peinture sur verre s'épanouit. Les camaïeux de grisaille et de jaune d'argent ponctuent et remplacent parfois les

polychromies plus franches. Les émaux apportent transparence et brillance. La qualité optique de la lumière transmise et son scintillement deviennent essentiels.

DES NANOTECHNOLOGIES AVANT DE SAVOIR LES NOMMER

C'est ici que le regard nano-optique devient particulièrement fécond. Certaines techniques verrières historiques relèvent d'une manipulation de la matière à l'échelle nanométrique, bien antérieure à l'invention du mot « nanotechnologies ». Lorsque des nanoparticules métalliques se forment dans la proche surface du verre, leur interaction avec la lumière n'est plus celle du métal massif. À l'échelle du nanomètre, l'absorption et la diffusion deviennent fortement dépendantes de la taille, de la concentration, de la nature chimique et de l'environnement de ces particules. C'est ce qui permet à certains verres

ou à certaines peintures de produire des couleurs spécifiques, parfois impossibles à expliquer par une simple coloration homogène de masse. Ces phénomènes peuvent apparaître soit dans la masse du verre — comme dans le cas du rose à l'or — soit en surface, par cémentation, comme pour le jaune d'argent.

Dans cette perspective, le vitrail peut être relu comme un matériau composite optiquement fonctionnel. Le verre fournit une matrice transparente, relativement stable, mise en forme à chaud. Les espèces métalliques, qu'elles soient introduites dans la masse ou générées par cémentation en surface, constituent des centres d'interaction avec le rayonnement. La lumière, après traversée, absorption et diffusion, n'est plus seulement filtrée : elle est redistribuée. Le vitrail ne colore donc pas seulement un faisceau ; il fabrique une ambiance optique.

Cette lecture permet aussi de comprendre pourquoi le vitrail se révèle surtout depuis l'intérieur des édifices. La raison n'est pas uniquement symbolique, elle tient à l'asymétrie lumineuse. Le flux principal vient de l'extérieur et pénètre l'espace intérieur. Depuis l'extérieur, l'observateur n'est pas placé dans la configuration où la transmission colorée joue pleinement vers lui. Depuis l'intérieur, il reçoit la lumière filtrée, diffusée et mise en scène par le verre. La physique de la propagation rejoint ici l'expérience liturgique et architecturale.

LE JAUNE D'ARGENT : UNE NANO-OPTIQUE EMPIRIQUE

Le jaune d'argent constitue un cas exemplaire de peinture par cémentation. Il apparaît sous Philippe le Bel, vers l'an 1300, dans un contexte de bouillonnement artistique et à la croisée des disciplines. Déposé à la surface du verre puis recuit, le composé à base d'oxyde d'argent induit pendant une cuisson maîtrisée des échanges ioniques dans la ● ● ●

zone superficielle et la formation de nanoparticules d'argent (figure 3). Celles-ci absorbent fortement dans le bleu, ce qui donne au verre sa coloration jaune.

La température, le choix du sel d'argent, la composition du verre et les conditions de recuit gouvernent alors la nucléation, la croissance et l'agrégation des particules, donc la nuance finale, du jaune citron au jaune plus orangé. La couleur obtenue ne résulte donc pas d'un simple dépôt, mais d'un système couplant matière, procédé thermique et interaction optique.

L'observation directe des surfaces de jaune d'argent permet aujourd'hui de relier le geste ancien à une réalité nanométrique mesurable. Les images de microscopie électronique à balayage d'un jaune d'argent (figure 4a et 4b) révèlent une surface densément peuplée de

nanoparticules métalliques, proches les unes des autres, dont le diamètre typique est de l'ordre de la dizaine de nanomètres. La distribution en taille, centrée ici autour de 9–10 nm, confirme que la coloration ne provient pas d'un dépôt continu d'argent, mais d'une population d'objets discrets formés dans ou à proximité immédiate de la surface du verre au cours de la cuisson. Cette organisation nanométrique gouverne directement la réponse optique : le spectre d'extinction (figure 4c) présente une bande intense dans le bleu-violet, signature de l'interaction collective des électrons de conduction des nanoparticules d'argent avec la lumière. En absorbant préférentiellement cette partie du spectre, le verre transmet alors une lumière enrichie en jaune. La nuance finale dépend de la densité de particules, de leur taille, de leur

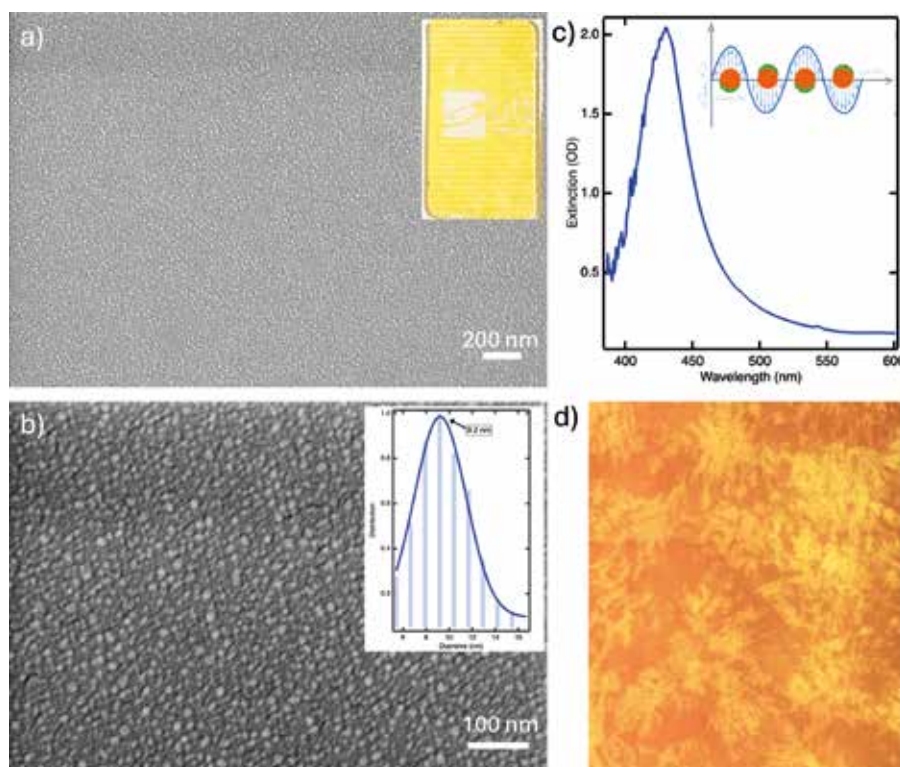
état d'agrégation, mais aussi de la composition de la recette (figure 4d) — chlorures, sulfures, supports minéraux — et du cycle thermique. Le jaune d'argent apparaît ainsi comme un procédé de nanofabrication de surface avant le mot : une couleur née non d'un pigment simplement posé sur le verre, mais d'une structuration contrôlée de la matière par diffusion ionique, réduction et croissance nanoparticulaire.

Les traités anciens sont précieux parce qu'ils montrent à quel point cette maîtrise fut longtemps empirique. Antoine de Pise, Jean d'Outremeuse ou le moine de Zagan décrivent des gestes, des mélanges, des liants, des supports, des modalités d'application. Ils ne parlent pas de nanoparticules ni d'oxydo-réduction, mais des procédures qui conduisent effectivement à de tels phénomènes. L'atelier médiéval ou renaissant apparaît alors comme un laboratoire sans instrumentation moderne, mais non sans méthode : observation, répétition, comparaison, correction. En ce sens il s'agirait d'une évolution et systématisation du travail sur verre des artisans romains, qui exploitaient déjà la formation de nanoparticules métalliques, comme dans la coupe de Lycurgue. La science contemporaine ne remplace pas ces savoir-faire; elle permet de comprendre ce qu'ils faisaient réellement à la matière.

UNE PHOTONIQUE DU PATRIMOINE

Si le vitrail éclaire l'histoire des techniques, il est aussi un objet scientifique pleinement actuel. C'est dans cette continuité que s'inscrit le LabCom Luminano — Lumière, Nano-Optique, Vitrail — créé entre le laboratoire Lumière Nanomatériaux Nanotechnologies (L2n) et la Manufacture Vincent-Petit. Son ambition est d'étudier les vitraux anciens à l'aide de méthodes spectroscopiques et physico-chimiques actuelles pour mieux

Figure 4. a) et b) Images de microscopie électronique à balayage de la surface d'un échantillon de jaune d'argent. Insert a) photographie de l'échantillon coloré. Insert b) distribution de la taille des nanoparticules. c) Spectre d'extinction d'un échantillon de jaune d'argent. d) Peinture en nuances de jaune d'argent obtenue à partir d'un mélange de chlorures et de sulfures d'argent.



comprendre leurs procédés de fabrication, leurs mécanismes de coloration et leurs altérations. Observer un vitrail ancien, ce n'est donc pas seulement documenter une œuvre, c'est on l'aura compris, lire, dans la matière, l'histoire d'une interaction entre lumière, verre, ions, pigments, cuisson et temps long.

Cette démarche n'est pas seulement rétrospective. Comprendre les vitraux anciens, c'est aussi se donner les moyens d'agir sur ceux de demain. En étudiant les échanges ioniques, la diffusion dans le verre et la formation de nanoparticules métalliques par cémentation, on peut non seulement expliquer le jaune d'argent apparu autour de 1300, mais aussi en retrouver la logique matérielle pour l'étendre. L'enjeu n'est pas de reproduire une couleur historique à l'identique, mais de réinvestir un principe : celui d'une couleur issue de la matière elle-même, transformée par la chaleur, la migration d'espèces métalliques et leur interaction avec la lumière.

Le vitrail devient alors un terrain privilégié pour une recherche à la fois fondamentale et appliquée. Fondamentale, parce qu'elle interroge les liens entre structure, composition, nano-structuration et réponse optique. Appliquée, parce qu'elle ouvre la voie à de nouvelles nano-fabrications sur grandes surfaces vitrées, à l'élargissement des gammes colorées, à l'exploration de matériaux moins toxiques et à la recreation de procédés anciens avec les outils conceptuels d'aujourd'hui. Il

ne s'agit plus seulement de conserver un héritage, mais de le rendre à nouveau productif.

Le jaune d'argent constitue, à cet égard, un moment décisif. Vers 1300, la couleur ne dépend plus uniquement d'un verre teinté dans la masse ou d'une mise en plomb : elle naît d'une transformation de surface, locale et gouvernée par la cuisson. En ce sens, cette technique annonce déjà une pensée moderne du matériau fonctionnel. Revenir à ce geste fondateur, non pour le figer mais pour l'élargir, c'est rouvrir l'histoire du vitrail. Avec d'autres métaux, d'autres compositions verrières, d'autres cinétiques de diffusion et d'autres signatures spectrales, ce principe ancien peut devenir la matrice de couleurs nouvelles.

Le vitrail montre ainsi qu'une œuvre n'est pas seulement une image, mais un régime d'interaction entre lumière et matière. Longtemps, les peintres verriers ont maîtrisé cette interaction sans disposer du vocabulaire de la nano-optique ; aujourd'hui, la spectroscopie, la microscopie et la science des matériaux permettent d'en décrire les mécanismes avec une précision inédite. Mais l'essentiel demeure : il s'agit toujours de donner forme à la lumière. De Chagall à Cocteau, de Bazaine à Soulages, en passant par de nombreuses œuvres laïques d'ateliers, les exemples contemporains ne manquent pas. Entre patrimoine et innovation, le vitrail apparaît alors non comme un art du passé, mais comme un champ encore actif d'invention optique. ●

RÉFÉRENCES

- [1] C. Wu *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **78**, 1850 (2001), doi:10.1063/1.1358846
- [2] F. Atteia *et al.*, *Mater. Res. Bull.* **131**, 110973 (2020), doi:10.1016/j.materresbull.2020.110973
- [3] T. Midavaine, *Imagerie à bas niveau de lumière - Fondamentaux et perspectives*, *Opt. Photonique* (2012), doi:10.51257/a-v1-e6570
- [4] S. Ma *et al.*, *AIP Adv.* **8**(3), 035010 (2018), doi:10.1063/1.5018642
- [5] Bao, *et al.*, *Nature* **619**, 7971, 743 (2023)

micronora

salon international
des microtechniques
et de la précision

BESANCON / FRANCE

29 sept. → 2 oct.
2026



ZOOM

AÉRONAUTIQUE,
SPATIAL & DÉFENSE

en partenariat avec



BADGE VISITEUR
INSCRIVEZ-VOUS



SAUTIS - www.sautis.fr

L'IMAGERIE SPECTRALE PORTABLE POUR L'ÉTUDE DES ŒUVRES PICTURALES MODERNES : EXPLORER L'HÉTÉROGÉNÉITÉ CHIMIQUE ET VISUELLE PAR LA LUMIÈRE

Mathieu THOURY*

IPANEMA, CNRS, UVSQ, MC, MNHN, Université Paris-Saclay, Saint-Aubin, 91190, France

*mathieu.thoury@cnrs.fr



L'étude des œuvres picturales modernes par imagerie spectrale portable explore l'hétérogénéité chimique et visuelle des matériaux à travers leurs propriétés de luminescence. Issu d'une réflexion à l'intersection de la matérialité des œuvres et de l'optimisation d'un instrument dédié à l'exploration des comportements luminescents de systèmes complexes, ce dispositif a été utilisé pour analyser des œuvres de Robert Delaunay et Pierre Soulages. Ces travaux montrent comment les questionnements artistiques et techniques s'éclairent mutuellement, ouvrant de nouvelles perspectives pour la conservation et l'histoire de l'art.

<https://doi.org/10.1051/photon/202613942>

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.

L'interaction entre lumière et matière a, depuis plus d'un siècle, révolutionné l'étude des objets patrimoniaux. Dès le XIX^e siècle, des pionniers comme Ritter, Stokes ou Röntgen ont révélé l'existence de rayonnements invisibles à l'œil nu, tels les ultraviolets ou les rayons X. Ce n'est qu'au tournant du XX^e siècle

que leur application concrète à l'examen des œuvres d'art a été mise en œuvre, notamment grâce aux travaux de James J. Rorimer. En 1931, ce dernier publiait *Ultra-Violet Rays and Their Use in the Examination of Works of Art*, qui synthétise les expériences conduites au Metropolitan Museum et présente de nombreux exemples d'examen d'œuvres sous UV [1]. Il y démontre et illustre le potentiel du

phénomène de luminescence induite par les ultraviolets pour révéler des détails invisibles à l'œil nu, tels que les vernis, les repeints ou les altérations de surface, et témoignant de la « vie » passée des objets.

Au cours des vingt dernières années, les questionnements liés à la matérialité des œuvres picturales, issus de l'histoire de l'art technique, de la conservation et de l'étude des

procédés artistiques, ont favorisé et été favorisés par l'émergence de nouvelles techniques d'investigation, notamment en imagerie. Ces approches ont profondément transformé l'étude des matériaux picturaux en faisant passer l'analyse d'une logique « ponctuelle », fondée sur l'examen de prélèvements ou de zones limitées, à une approche spatialisée permettant d'appréhender l'organisation des matériaux à l'échelle de l'œuvre entière. Au-delà de la composition des matériaux, elle permet d'interroger leurs relations spatiales, leurs modes de distribution et leur articulation avec les processus de création, de transformation et de conservation des œuvres.

Dans le cadre du développement des grands instruments de recherche, tels que les synchrotrons, les techniques de fluorescence X (XRF) et de diffraction des rayons X (XRD) par balayage, d'abord conçues pour la science des matériaux et la géologie, ont été adaptées à l'étude du patrimoine culturel [2]. Elles donnent accès à la composition physico-chimique des couches picturales par des analyses élémentaires et cristallographiques (Monico et al., 2025). L'imagerie hyperspectrale, issue de l'observation de la Terre, complète

ces approches en cartographiant les matériaux picturaux grâce à leurs signatures de réflectance dans le visible et le proche infrarouge [3].

Dans le cortège des phénomènes d'interaction lumière-matière, la luminescence constitue une sonde particulièrement pertinente pour étudier la diversité chimique des matériaux picturaux, car elle permet d'analyser à la fois les composés organiques (liants, vernis, résines, colorants) et inorganiques (pigments, charges minérales). Contrairement à des techniques principalement sensibles à la composition élémentaire ou moléculaire, elle est fortement influencée par l'environnement local des espèces luminescentes et par les états d'organisation ou de désordre des matériaux. Ces effets se manifestent à travers les caractéristiques de l'émission — intensité, distribution spectrale et durée de vie — qui renseignent sur la présence d'impuretés, de défauts structuraux, d'interactions moléculaires ou encore de phénomènes d'altération. Ces caractéristiques ont motivé le développement d'un système inspiré des travaux de Rorimer, mais offrant une flexibilité accrue pour explorer l'hétérogénéité chimique des œuvres *via* leurs propriétés de photoluminescence.

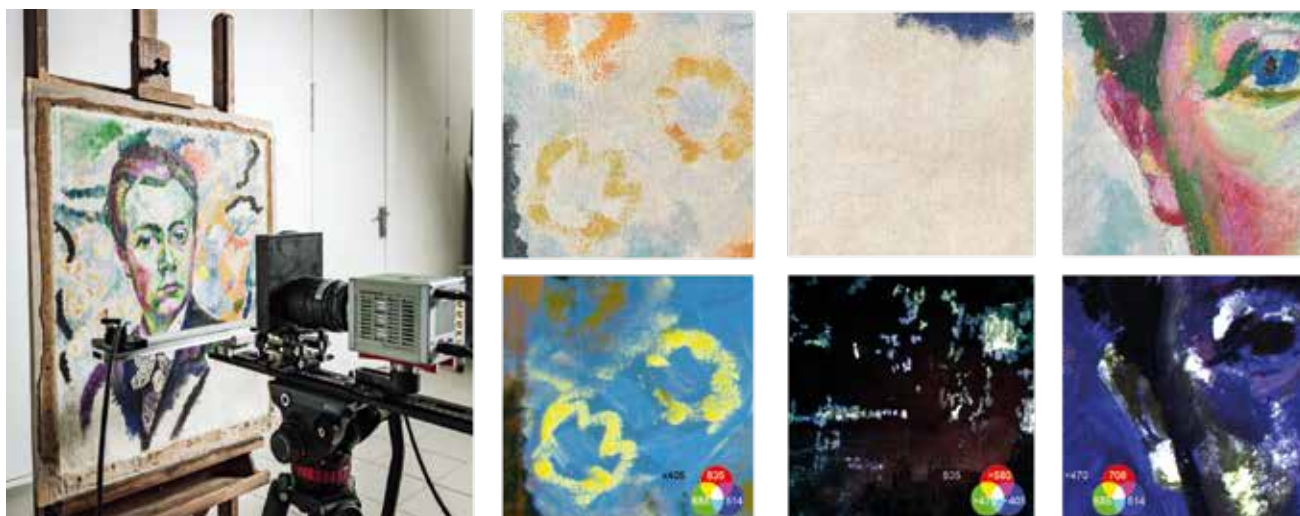
DU LABORATOIRE AU MUSÉE : LA CONCEPTION D'UN SYSTÈME D'IMAGERIE SPECTRALE ADAPTABLE

La première version du système d'imagerie, conçue pour un usage en laboratoire, a graduellement évolué vers une version portable (Figures 1a et 3a) pour permettre l'analyse d'objets et d'œuvre très difficilement déplaçables [4]. La conception du système a visé à pour répondre à trois objectifs. La version portable (Figures 1a et 3a), encore à l'état de prototype, a été développée pour répondre à trois objectifs principaux : exploiter une configuration de détection en plein champ, déjà validée pour l'étude de peintures modernes [5] ; intégrer une détection multispectrale couvrant un large domaine spectral ; et permettre l'exploration de différentes plages d'excitation afin d'optimiser la révélation des contrastes liés aux matériaux présents dans les œuvres.

Le système d'imagerie repose sur une caméra scientifique sCMOS ORCA-Flash4.0 LT3 (Hamamatsu), équipée d'un capteur sensible de 300 à 1100 nm, couplée à un objectif UV-VIS-IR 60 mm f/4 Apo Macro (CoastalOptics). Il permet l'acquisition d'images de 4 mégapixels avec un champ de vue modulable selon la distance de travail, depuis quelques centimètres carrés à haute résolution (100–200 $\mu\text{m}/\text{pixel}$) jusqu'à des zones d'environ 90 × 80 cm^2 , à plusieurs mètres. Grâce à son faible ●●●

Figure 1. a : Système d'imagerie de luminescence positionné devant Autoportrait (1905) de Robert Delaunay, conservé au Centre Pompidou. © Cyril Fresillon / PPSM / IPANEMA / CNRS Images.
b : collecte d'images de luminescence sous illumination centrée autour de 460 nm.
© Cyril Fresillon / PPSM / IPANEMA / CNRS Images.





bruit de lecture ($< 1,5$ électron RMS) et à sa large sensibilité spectrale (320–1100 nm), le système est adapté à la détection de faibles signaux de photoluminescence.

La sélection spectrale est assurée par un barillet de huit filtres interférentiels passe-bande à bande étroite (Semrock), offrant une forte transmission et une excellente séparation spectrale. Cette approche multispectrale cible des bandes choisies en fonction des signatures optiques des matériaux étudiés (pigments, liants, vernis), permettant de discriminer des émissions proches et d'identifier

Figure 2. Système d'imagerie de luminescence positionné devant Autoportrait (1905) de Robert Delaunay, conservé au Centre Pompidou (a). © Cyril Fresillon / PPSM / IPANEMA / CNRS Images. Les détails de la surface de l'œuvre illustrent une zone de fleurs (b), le visage (d) et la zone de réserve (f). Les images en fausses couleurs (c, e, g) sont obtenues par association d'images acquises sous excitation à 405 nm (c) et 470 nm (g), ou avec une détection centrée à 835 ± 35 nm (e).

des composantes spécifiques. Combinée à la haute sensibilité du système, elle autorise la détection de faibles signaux de luminescence du

visible jusqu'au proche infrarouge, notamment au-delà de 700 nm.

Le système d'excitation repose sur un illuminateur CoolLED

Figure 3. Mesure par imagerie de luminescence réalisée sur l'œuvre Peinture (1959) de Pierre Soulages au musée Les Abattoirs – Musée/Frac Occitanie Toulouse. © Cyril Fresillon / PPSM / IPANEMA / CNRS Images.



pE-4000 intégrant 16 LEDs couvrant le domaine 365–700 nm. Chaque LED est pilotable individuellement, permettant un contrôle précis de l'intensité et de la durée d'éclairement. La lumière est acheminée vers l'échantillon par un ou deux guides de lumière liquide (Lumatec), assurant un éclairage homogène et flexible. Grâce à sa stabilité spectrale et temporelle, cette configuration permet d'adapter finement l'excitation aux propriétés d'absorption des matériaux étudiés (pigments, colorants, liants, vernis) et d'optimiser le contraste des images de photoluminescence, y compris pour des matériaux faiblement émetteurs.

EXPLORATION DE L'HÉTÉROGÉNÉITÉ DES ŒUVRES MODERNES PAR IMAGERIE SPECTRALE

Le système a été utilisé dans le cadre de deux projets consacrés à l'étude physico-chimique des œuvres de Robert Delaunay et de Pierre Soulages. Le premier, le projet Marie Skłodowska-Curie *Robert Delaunay's palette: studying its production, use and reactivity by innovative chemical imaging methods*, mené au laboratoire PPSM (ENS Paris-Saclay), vise à caractériser la palette de Robert Delaunay à l'aide de méthodes avancées d'imagerie chimique adaptées aux matériaux modernes. Le second, développé dans le cadre du projet NOIRœS (Nouveaux Outils Interdisciplinaires pour la Restauration des Œuvres de Pierre Soulages), réalisé au sein de l'EUR Humanités, Création et Patrimoine (CY Cergy Paris Université), s'intéresse aux relations entre l'apparence visuelle des surfaces picturales, notamment leur brillant, et l'hétérogénéité chimique des couches de peinture.

Dans le cadre de l'étude de l'*Autoportrait* (1905) de Robert Delaunay, conservé au Centre Pompidou, le système a permis de cartographier la distribution spatiale de différents pigments, colorants et matériaux de restauration sur l'ensemble de l'œuvre (Figure 2a). En modulant les conditions d'excitation et de détection, il est possible de sélectionner la réponse luminescente de composés présentant

des propriétés d'absorption différentes (Figure 1b).

Les colorants organiques, qui absorbent préférentiellement dans le visible (450–550 nm) et émettent entre 500 et 700 nm, ont ainsi pu être distingués des pigments minéraux. Certaines zones du visage, notamment au niveau des joues et du menton, présentent une luminescence caractéristique révélant la présence de matériaux non détectables par fluorescence ou diffraction des rayons X (Figure 2g). Les restaurations situées dans les réserves de la toile sont également facilement identifiables grâce à leurs émissions spécifiques, notamment dans le proche infrarouge, alors qu'elles restent difficilement perceptibles sous lumière naturelle (Figure 2e).

L'étude a également permis de caractériser les pigments utilisés pour peindre les fleurs représentées sur la partie gauche de l'œuvre. Leur photoluminescence dans le proche infrarouge est caractéristique des pigments de sulfoséléniure de cadmium ($\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$). Les variations d'intensité observées traduisent probablement des différences structurales au sein des pigments, liées à la présence de défauts cristallins ou de phases partiellement amorphes. Sous excitation UV, les émissions enregistrées dans le visible et le proche infrarouge fournissent ainsi des informations sur l'état structural de ces matériaux (Figure 2c). Cette sensibilité aux états structuraux permet de distinguer différents types de pigments à base de cadmium, d'émettre des hypothèses sur leurs procédés de fabrication, notamment les conditions de synthèse *via* la présence de défauts cristallins, et d'évaluer leur stabilité dans le temps au regard de leur évolution structurale et optique.

L'œuvre de Pierre Soulages repose quant à elle sur les interactions entre la lumière et la matière perceptibles à travers les effets de brillant et de matité générés par la structuration de la surface picturale. Dans le cadre du projet NOIRœS, plusieurs méthodes d'observation ont été développées afin de mieux comprendre les transformations chimiques et visuelles affectant



Pigments



Textiles



Manuscrits



Monuments historiques



Sculptures



Gemmes



Archéologie

Analyse non invasive des œuvres d'art par spectroscopie optique

- Spectromètres compacts et fibrés
- UV-Vis-NIR / Raman
- Sondes optiques sur mesure
- Intégration systèmes photoniques

www.idil-fiber-optics.com
info@idil.fr +33 (0)2 96 05 40 20



Figure 4. Pierre Soulages, Peinture, 15 décembre 1959, huile sur toile, 202 × 130 cm, collection Les Abattoirs – Musée - Frac Occitanie Toulouse (a). © Jean-Luc Auriol et Alain Gineste / Adagp, Paris, 2026. L'image en noir et blanc (b) montre une zone agrandie de la surface, acquise en réflectance dans la gamme spectrale 514 ± 15 nm. L'image en fausses couleurs (c) est obtenue avec une illumination à 435 nm et une détection multicanal : rouge à 685 nm, vert à 571 ± 36 nm et bleu à 514 ± 15 nm.

certaines œuvres réalisées à la fin des années 1950. Un scanner conçu à cette fin, associé à une source lumineuse mobile, a notamment permis de produire des cartes de brillant en unité de brillant avec une résolution spatiale de 70 μm .

Le système d'imagerie de luminescence a été utilisé *in situ* lors d'une campagne menée en 2023 au musée des Abattoirs – Musée/Frac Occitanie Toulouse sur l'œuvre Peinture (1959) (Figure 3). En utilisant des excitations dans la gamme des ultraviolets, pour lesquelles les pigments noirs ne présentent pas de luminescence, les images acquises ont montré que les zones les plus luminescentes correspondaient aux zones les plus brillantes (Figure 4c). Cette corrélation traduit une accumulation locale de liant à la surface de la couche picturale. Une zone présentant une signature d'émission légèrement différente a également été identifiée et pourrait correspondre à des résidus d'un ancien vernis appliqué afin d'homogénéiser le brillant de la surface. Ces résultats illustrent l'intérêt de l'imagerie de luminescence pour visualiser l'hétérogénéité spatiale de certains composés qui traduisent la réactivité au cours du temps et renseigne sur la stabilité chimique des matériaux.

CONCLUSION

L'imagerie spectrale portable, exploitant la photoluminescence *via* une détection multispectrale et une

illumination accordable, offre une approche innovante pour appréhender la complexité des œuvres modernes. Leur hétérogénéité, loin d'être un obstacle, devient une source d'informations précieuses sur les matières premières, les procédés de synthèse, les traces d'intervention ou les mécanismes d'altération. Cette démarche illustre une réciprocité entre les défis posés par la matérialité des œuvres et l'innovation technique, ouvrant de

nouvelles perspectives pour l'histoire de l'art et la conservation. ●

REMERCIEMENTS

Nous remercions Victor Gonzalez, Pauline Hérou-de La Grandière, Lionel Simonot, Chloé Coustet et Mathieu Hébert pour leur implication, ainsi que les musées partenaires (Les Abattoirs, Centre Pompidou) pour leur collaboration. Ce travail a bénéficié du soutien de la MITI du CNRS (programme 80PRIME)

RÉFÉRENCES

- [1] J. Rorimer, *Ultra-Violet Rays and Their Use in the Examination of Works of Art*, Metropolitan Museum of Art, New York (1932). DOI: 10.1080/15436314.1932.11467293
- [2] L. Monico, K. Janssens, M. Cotte, S. M. Webb, F. Vanmeert, V. Gonzalez *et al.*, *La Rivista del Nuovo Cimento* **48**, 315 (2025). DOI: 10.1007/s40766-025-00070-7
- [3] C. Cucci, J. K. Delaney et M. Picollo, *Accounts of Chemical Research* **49**, 2070 (2016). DOI: 10.1021/acs.accounts.6b00048
- [4] A. Brayard, P. Gueriau, M. Thoury et G. Escarguel, *Geobios* **54**, 71 (2019). DOI: 10.1016/j.geobios.2019.04.008
- [5] M. Thoury, J. K. Delaney, E. R. de la Rie, M. Palmer, K. Morales et J. Krueger, *Applied Spectroscopy* **65**, 939 (2011). DOI: 10.1366/11-06230
- [6] M. Hébert, L. Simonot, B. Bringier, M. Thoury et P. Hérou-de La Grandière, *Photoniques* **124**, 26 (2024). DOI: 10.1051/photon/202412426

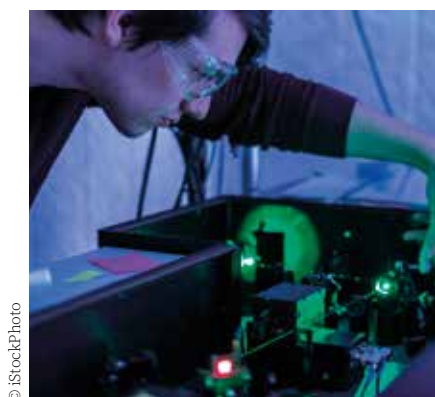
FORMER AUX TECHNOLOGIES PHOTONIQUES : ENJEUX, MUTATIONS ET NOUVELLES APPROCHES PÉDAGOGIQUES

Ludovic LESCHIEUX^{1,*}, Marie-Madeleine GREFFET²

¹ Responsable de PYLA, centre de formation d'ALPhANOV, 33400 Talence

² Responsable de la Formation continue à l'Institut d'Optique, 91120 Palaiseau

*ludovic.lescieux@alphanov.com



© iStockPhoto

À mesure que les technologies photoniques s'imposent dans des secteurs industriels variés, les besoins en compétences associées croissent rapidement. La formation professionnelle devient un levier stratégique pour soutenir la compétitivité des entreprises. Former au juste besoin, au bon niveau et sur des compétences rapidement opérationnelles est essentiel pour accompagner les évolutions technologiques.

<https://doi.org/10.1051/photon/202613947>

L'intégration des technologies photoniques dans les procédés industriels s'accélère, transformant des secteurs aussi variés que l'industrie manufacturière, la défense, le médical ou l'aéronautique. Qu'il s'agisse de procédés laser, de systèmes optiques avancés ou d'imagerie, ces technologies deviennent des outils incontournables.

Cette évolution redéfinit les attentes en matière de formation professionnelle. Former ne se limite plus à transmettre un savoir : il s'agit désormais d'acquérir rapidement des compétences opérationnelles, grâce à des formations ciblées, flexibles et ancrées dans les réalités du terrain.

UNE TRANSFORMATION DES BESOINS EN COMPÉTENCES

La montée en puissance des technologies photoniques ne se traduit pas seulement par une augmentation quantitative des besoins en compétences,

mais aussi par une diversification de leur nature. Les entreprises doivent composer avec des attentes variées, à différents niveaux de qualification et sur des temporalités souvent courtes. L'enjeu n'est pas toujours de ●●●

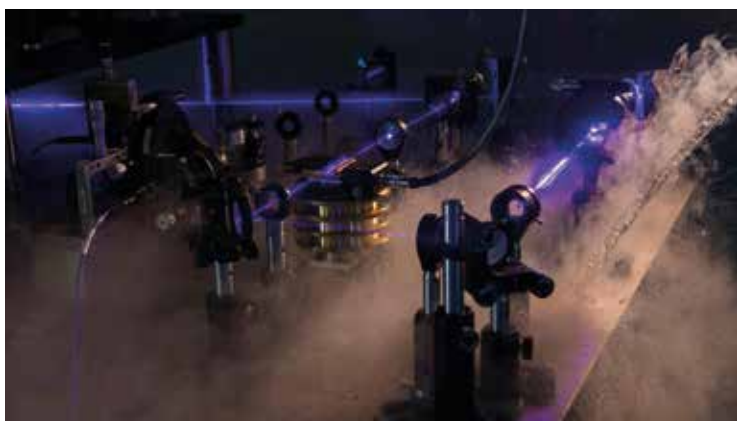
Travaux pratiques sur les lasers intenses - ALPhANOV - PYLA.





Formation en conception optique. Institut d'Optique.

LES FORMATIONS EN TECHNOLOGIES QUANTIQUES À L'INSTITUT D'OPTIQUE



Expérience d'enseignement en quantique : génération de paires de photons. Institut d'Optique.

Les technologies quantiques reposent sur la maîtrise de la matière à l'échelle de l'atome et de la lumière à l'échelle du photon unique et permettent de relever de nombreux défis techniques et scientifiques actuels. Les domaines d'application sont non seulement le calcul quantique, mais aussi la réalisation de capteurs quantiques ultra-précis, ou la cryptographie. Il s'agit d'une rupture technologique majeure pour de nombreux secteurs industriels et stratégiques. Pour permettre de saisir les enjeux de cet environnement industriel en évolution rapide et de découvrir ces nouvelles solutions technologiques, l'IOGS propose des stages de formation continue dédiés aux technologies quantiques :

- Introduction aux technologies quantiques et à leurs applications ;
- Capteurs quantiques à atomes froids pour la mesure de précision et la navigation inertielle sans GPS ;
- Introduction au calcul quantique
- Enjeux de la cryptographie post-quantique et de la sécurité informatique.

Animées par des spécialistes reconnus du domaine, ces formations combinent théorie, applications concrètes et retours d'expérience.

recruter de nouveaux profils, mais plutôt d'adapter les métiers existants ou d'accompagner la montée en compétences des collaborateurs en poste. Un opérateur, un technicien ou un ingénieur peut ainsi intégrer de nouveaux procédés photoniques sans formation initiale spécifique.

Cette évolution impose des besoins de formation rapides, ciblés et directement applicables. Les entreprises recherchent des compétences opérationnelles, mobilisables immédiatement.

DES MODÈLES DE FORMATION COMPLÉMENTAIRES

La formation initiale permet d'acquérir des connaissances scientifiques et techniques structurées en photonique. Les cursus du supérieur (en BTS, dans les universités ou les écoles d'ingénieurs) forment des techniciens, ingénieurs et chercheurs avec des bases solides, combinant théorie, travaux pratiques et réalisation de projets. Cependant, ces formations s'inscrivent dans des logiques de temps long. De leur côté, les industriels font face également à des besoins plus immédiats, liés à l'intégration, à la production ou l'optimisation de technologies. Dans ce contexte, la formation professionnelle apporte une réponse complémentaire en s'adressant à des publics en activité devant acquérir ou adapter rapidement des compétences. La formation tout au long de la vie prend ici tout son sens : les compétences en photonique doivent être régulièrement actualisées afin de permettre la mobilité professionnelle ou le suivi des innovations technologiques.

LES SPÉCIFICITÉS DE LA FORMATION PROFESSIONNELLE SPÉCIALISÉE

Les formations professionnelles continues en photonique se caractérisent par plusieurs éléments distinctifs : une durée courte (quelques jours) et ciblée sur des compétences clés, une conception sur mesure pour répondre aux spécificités des entreprises, des publics variés : ingénieurs, techniciens, opérateurs ou professionnels en reconversion et enfin une place centrale accordée à la pratique : accès à des



Session de travaux pratiques en réalité virtuelle - ALPhANOV - PYLA

plateformes technologiques, manipulation d'équipements, mise en situation sur des cas concrets.

Les formations professionnelles couvrent une grande diversité de niveaux, depuis les bases de l'optique (pour des publics non spécialistes) aux stages experts (conception optique avancée, technologies quantiques, lasers intenses, etc.), répondant ainsi aux attentes de tous les profils, des opérateurs aux ingénieurs confirmés.

Ces formations courtes peuvent s'inscrire dans une logique de parcours pédagogique, en associant des modules de niveaux successifs ou des thématiques complémentaires, pour accompagner une montée en compétences progressive et structurée.

Elles jouent aussi un rôle de transfert technologique, diffusant les innovations vers les entreprises.

VERS DE NOUVELLES MODALITÉS D'APPRENTISSAGE

Les transformations en cours dans le domaine de la formation s'accompagnent de l'émergence de nouvelles approches pédagogiques, adaptées aux contraintes des industriels et des apprenants. L'hybridation entre présentiel, distanciel et e-learning permet de concilier accessibilité et efficacité, en combinant apports théoriques à distance et sessions pratiques en laboratoire ou sur plateforme technique. Ces solutions permettent une flexibilité accrue : les apprenants progressent ●●●

LA CONCEPTION OPTIQUE À L'INSTITUT D'OPTIQUE

Avant d'être fabriqué puis testé, un système optique d'imagerie doit être simulé sur ordinateur. Cette phase de conception nécessite l'utilisation d'un logiciel spécialisé permettant d'optimiser les performances du système. L'Institut d'Optique propose des stages de formation continue en conception optique destinés aux ingénieurs et professionnels souhaitant s'initier afin de pouvoir échanger avec une équipe de conception optique ou souhaitant monter en compétence sur les outils de référence du domaine : Ansys Zemax OpticStudio et Code V. Les différentes formations abordent notamment :

- les principes fondamentaux des instruments d'optiques ;
- la conception et l'optimisation de systèmes optiques d'imagerie visible ou IR ;
- l'utilisation de composants commerciaux pour le prototypage rapide de systèmes.

L'Institut d'Optique propose des stages de niveaux différents, avec une formation centrée sur la pratique du logiciel dédié, en présentiel ou à distance.

Lumière & électromagnétisme

Institut d'Optique Graduate School Textbook

Benjamin VEST et François MARQUIER

Lumière et électromagnétisme
Introduction à l'ingénierie électromagnétique
des ondes lumineuses

edp sciences

INSTITUT D'OPTIQUE
UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY

Issu du cours dispensé à l'École supérieure d'optique par François Marquier et Benjamin Vest, ce livre vise à fournir à la fois une compréhension physique des phénomènes optiques et les outils pour les modéliser à travers l'électromagnétisme classique.

Disponible directement via le QR code :



28 € - 260 pages

LA SÉCURITÉ LASER



Formation sécurité laser avec formatrice labélisée CoNSOL – ALPhANOV – PYLA

Le développement rapide des technologies laser dans l'industrie s'accompagne d'un besoin croissant de formation à la sécurité laser. Les articles R.4452-13 alinéa 7 et R.4452-19 à R.4452-21 du Code du travail rappellent notamment l'obligation de former les collaborateurs exposés aux Rayonnements Optiques Artificiels (ROA).

Dans ce contexte, la qualité des formations proposées constitue un enjeu essentiel afin de répondre aux exigences réglementaires et aux bonnes pratiques définies par les normes en vigueur. Afin de structurer l'offre de formation et de promouvoir des référentiels communs, Photonics France, accompagné d'une vingtaine de représentants de grandes entreprises et de spécialistes français du laser, a mis en place dès 2012 le label CoNSOL (Commission Nationale de Sécurité Optique et Laser).

Les missions de cette commission sont multiples :

- construire et maintenir un référentiel commun de formation adapté aux exigences réglementaires ;
- labelliser les formateurs à travers un processus d'évaluation par un jury externe, selon un cahier des charges défini ;
- assurer une veille active et contribuer aux travaux de normalisation européens.

Spécialisé dans la sécurité laser, le centre de formation PYLA s'inscrit ainsi dans cette démarche collective de qualité, d'expertise et de partage de bonnes pratiques. Cette structuration contribue à renforcer la professionnalisation des formations et à accompagner le déploiement sécurisé des technologies photoniques dans les différents secteurs industriels.

Pour les entreprises et les utilisateurs, le label constitue également un repère de confiance, tant sur les compétences des formateurs que sur la cohérence des contenus pédagogiques proposés selon les différents niveaux de formation.

l'expérimentation et la répétition de gestes professionnels sans risque et réduisant les contraintes logistiques.

L'accent sur la formation en présentiel reste essentiel, notamment pour l'expérimentation et la mise en pratique. Les structures de formation continue tirent parti d'équipements pédagogiques spécialement conçus pour l'enseignement de l'optique et de la photonique. Par exemple, l'Institut d'Optique s'appuie sur son Laboratoire d'Enseignement Expérimental (Lense) et sa centaine de montages expérimentaux et Pyla développe des formations et travaux pratiques au sein de son plateau pédagogique mutualisé avec l'Université de Bordeaux, et spécialisé notamment dans les lasers à impulsions ultra-brèves. Cette approche favorise des échanges directs et personnalisés entre formateurs et stagiaires, essentiels pour une assimilation optimale des concepts et une adaptation fine aux besoins spécifiques.

Ces deux modalités – numérique et présentiel – répondent à des besoins différents : la première offre flexibilité et accessibilité, tandis que la seconde privilégie l'immersion pratique et les interactions humaines. Leur complémentarité permet de couvrir l'ensemble des attentes des industriels et des apprenants.

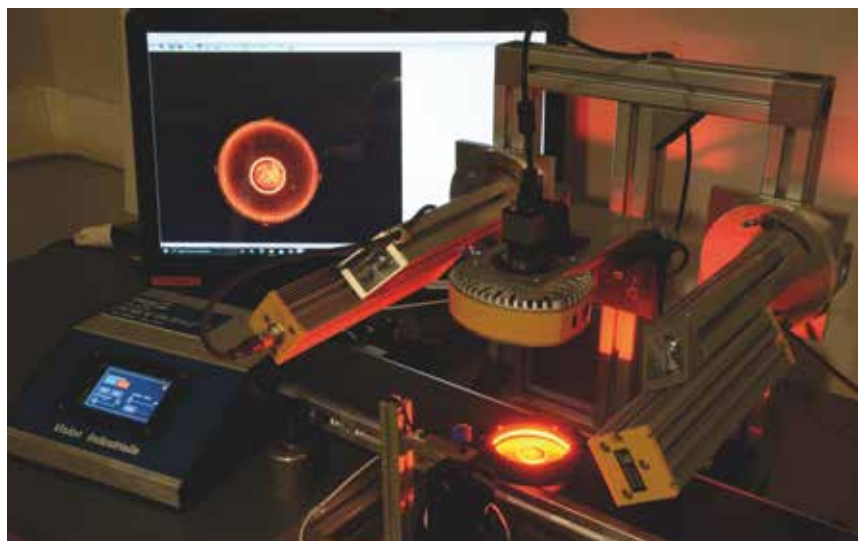
CONCLUSION

La formation aux technologies photoniques est un pilier essentiel pour accompagner les mutations industrielles et technologiques. Dans un contexte où les innovations se multiplient et où les compétences deviennent un facteur clé de différenciation, elle permet aux entreprises de rester compétitives et aux professionnels de s'adapter en continu. Face à ces enjeux, les acteurs de la formation ont un rôle majeur à jouer. En renforçant les complémentarités entre formation initiale, formation continue et besoins industriels, ils contribuent à bâtir une filière photonique dynamique, innovante et résiliente. Investir dans la formation, c'est donc investir dans l'avenir de la photonique en France. ●

à leur rythme, parfois en autonomie et les entreprises peuvent former leurs collaborateurs au fil de l'eau, même pour de petits effectifs.

Les outils numériques tels que les simulateurs, la réalité virtuelle ou les jumeaux numériques se démocratisent.

Ces outils, souvent complémentaires aux travaux pratiques sur équipements réels, offrent des avantages sérieux dans la construction des apprentissages en permettant de s'entraîner à des situations et procédures complexes tout en facilitant



Formation en conception optique. Institut d'Optique.

FORMER ET RECRUTER DE NOUVEAUX OPÉRATEURS POUR LES TECHNOLOGIES PHOTONIQUES

Le besoin d'opérateurs dans le domaine de la photonique n'est pas toujours évident à palier pour les industriels sur des temporalités souvent assez rapides. Pour répondre à ces enjeux, certaines initiatives associent directement acteurs de la formation, services publics de l'emploi et industriels afin de construire des parcours adaptés aux besoins des entreprises.

Dans ce cadre, le centre de formation PYLA a accompagné plusieurs industriels dans leurs démarches de recrutement et de montée en compétences d'opérateurs. En collaboration avec France Travail, des sessions de recrutement basées sur la Méthode de Recrutement par Simulation (MRS) sans CV ont notamment été mises en place afin d'identifier des candidats en recherche d'emploi présentant les aptitudes nécessaires aux futurs postes de travail, indépendamment de leur parcours initial.

Les candidats retenus dans le cadre ces Préparations Opérationnelles à l'Emploi (POE) suivent ensuite un parcours de formation de trois semaines construit sur mesure en fonction des postes de travail de l'entreprises. Cette formation associe apports techniques, mise en pratique sur équipements et préparation aux conditions réelles de production. Une période d'immersion en entreprise est également organisée en cours de parcours afin de faciliter l'appropriation du futur environnement de travail avant l'intégration définitive au sein des équipes.

Au-delà des besoins immédiats des industriels, le développement des compétences dans le domaine de la photonique passe également par la structuration de filières de formation initiale adaptées. Dans cette perspective, plusieurs acteurs de la filière, dont PYLA, accompagnent le développement du baccalauréat professionnel Photonique : technologies de la lumière. Les premières promotions issues de cette nouvelle formation arriveront sur le marché de l'emploi à l'issue de l'année scolaire 2026-2027, contribuant ainsi à renforcer progressivement le vivier de compétences techniques dans le domaine.



Quantitative phase microscopy for waveguide testing



2D Refractive index mapping in a single-shot



Plug'n'play module on any microscope



Compatible with laser inscribed waveguides

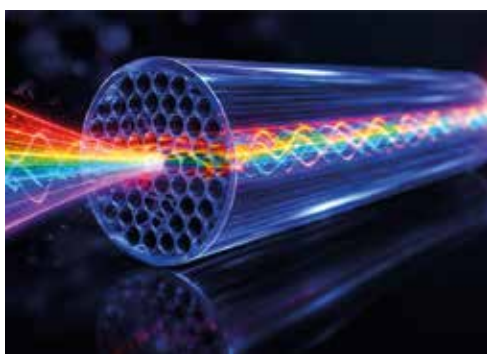
COMPRENDRE LES FIBRES MICRO-STRUCTURÉES

Olivier VANVINCQ, Géraud BOUWMANS, Yves QUIQUEMPOIS, Laurent BIGOT*

Univ. Lille, CNRS, UMR 8523 - PhLAM - Physique des Lasers Atomes et Molécules, F-59000 Lille, France

*laurent.bigot@univ-lille.fr

Image générée par ChatGPT



Hormis quelques travaux pionniers initiés dans les années 60-70, la thématique des fibres micro-structurées a réellement émergé dans la seconde moitié des années 90 avec les recherches menées par le groupe dirigé par le professeur P. St. J. Russell à l'université de Southampton puis à l'université de Bath. Cet article a pour but de revisiter les différents mécanismes de guidage associés à cette famille de fibres.

<https://doi.org/10.1051/photon/202613952>

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.

AVÈNEMENT D'UNE NOUVELLE FAMILLE DE FIBRES OPTIQUES

Une des motivations des recherches de l'époque était de transposer en photonique fibrée le concept de cristal photonique et de guidage par bande interdite photonique (BIP) notamment décrit par le professeur E. Yablonovitch à la fin des années 80 et émergeant en photonique planaire [1]. L'idée de structurer périodiquement l'indice du cœur et/ou de la gaine d'une fibre optique à l'échelle de la longueur d'onde a ainsi donné naissance au concept de fibre à cristal photonique (Photonic Crystal Fiber, PCF) et plus généralement à celui de fibre micro-structurée (FMS). Les publications de l'époque ont rapidement permis de réaliser à quel

point un vaste champ de géométries de fibres et de nouvelles propriétés optiques devenait accessible : ceci fit souffler un vent nouveau dans la communauté de la photonique fibrée. Ainsi, cette nouvelle thématique de recherche a donné lieu à de nombreux développements théoriques et technologiques qui ont permis de maîtriser la fabrication de ces nouvelles fibres et de comprendre et d'analyser finement leurs propriétés de guidage parfois singulières. Dans de nombreux cas, les propriétés observées étaient inaccessibles aux fibres conventionnelles du fait de leur mécanismes de guidage relativement figé (réflexion totale interne) et de leur manque de souplesse en termes de gestion des indices de réfraction du cœur et de la gaine.

Pour fabriquer les FMS, des développements technologiques majeurs ont été réalisés en commençant par l'adoption de nouveaux procédés de fabrication au premier rang desquels le procédé d'assemblage/étirage (stack-and-draw). PCF, MOF (Micro-structured Optical Fibers), holey fibers, fibres à trous, fibres BIP, fibres anti-résonantes... sont alors devenus des noms et des acronymes de plus en plus répandus et la Figure 1 tente d'illustrer comment ces différentes ramifications de la famille des FMS se positionnent les unes par rapport aux autres.

Toutes ces fibres se distinguent notamment par des mécanismes de guidage qui leurs sont propres et que nous allons décrire à présent.

En supposant une fibre optique de gaine infinie, invariante par translation selon son axe (Oz) et constituée de milieux diélectriques isotropes et sans propriété magnétique, l'équation différentielle vérifiée par le champ électrique $\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}(x, y, z)\exp(-i\omega t)$ est :

où $n(x, y)$ est le profil d'indice de réfraction de la fibre à la pulsation ω et k_0 le vecteur d'onde dans le vide.

$$\vec{E}(x, y, z) = \vec{e}(x, y) \exp(i\beta z)$$

où β est la constante de propagation correspondant à la composante longitudinale du vecteur d'onde. La fonction $\vec{e}(x, y)$ est le profil d'amplitude du champ électrique vérifiant l'équation :

$$(\vec{\Delta}_t + k_0^2 n^2 - \beta^2) = -(\vec{\nabla}_t + i\beta\vec{u}_z)(\vec{e} \cdot \vec{\nabla}_t (\ln n^2))$$

Ces solutions particulières sont appelées modes et peuvent être de plusieurs types :

- Les modes guidés qui constituent un

ensemble fini de valeurs discrètes et réelles de β . Ces modes se propagent sans pertes et sont équivalents aux rayons qui ne peuvent pénétrer dans la gaine à cause du phénomène de réflexion totale en optique géométrique.

- Les modes radiatifs qui constituent un continuum de valeurs réelles de β et qui sont équivalents aux rayons réfractés.
- Les modes évanescentiels qui constituent un continuum de valeurs purement imaginaires de β .
- Les modes à fuites qui constituent un ensemble infini de valeurs discrètes et complexes de β et qui s'atténuent donc au cours de la propagation.

L'ensemble des modes guidés, radiatifs et évanescents forme une base sur laquelle peut se décomposer tout champ électromagnétique se propageant dans la fibre. Les modes à fuite ne font pas partie de cette base et peuvent d'ailleurs être exprimés à l'aide des modes radiatifs et évanescents.

Un mode peut également être caractérisé par son indice effectif défini par :

$$n_{eff} = \frac{\beta}{k_0}$$

La vitesse de phase v_φ et les pertes linéiques α du mode sont reliées ●●●

Figure 1. Vue schématique des principaux types de FMS, classés par grandes familles.



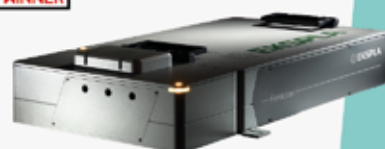
INSCRIPTION DES FBG

REEMPLACEMENT DES LASERS ION-ARGON LASER UV IMPRESS 213



- ▲ Laser DPSS sans gaz rares
- ▲ Réduction du coût d'exploitation de 99%
- ▲ Écriture rapide même sans chargement en hydrogène
- ▲ Plus de 150 unités en activité
- ▲ Robuste et stable, conçu pour la production industrielle

**INSCRIPTION DIRECTE
PAR LASERS fs
LASER Yb FEMTOLUX**



- ▲ Source femtoseconde 50 W ultra versatile
- ▲ Refroidissement direct sans eau
- ▲ Aucune maintenance nécessaire
- ▲ Mode rafale GHz + MHz innovant
- ▲ Contrôle avancé des impulsions (« pulse on demand »)
- ▲ Du prototypage à la grande série



respectivement à la partie réelle et à la partie imaginaire de β :

$$v_\phi = \frac{\omega}{\text{Re}(\beta)} \text{ et } \alpha = 2 \times \text{Im}(\beta)$$

Les modes les plus intéressants en pratique sont ceux pour lesquelles la lumière est principalement localisée dans le cœur de la fibre et qui subissent peu de pertes. Il peut s'agir de modes guidés ou de modes à fuite possédant une constante de propagation à faible partie imaginaire. Nous pouvons distinguer quatre mécanismes physiques expliquant l'existence de ce type de modes.

Mécanisme de guidage par réflexion totale interne (RTI)

Il s'agit du mécanisme le plus couramment rencontré dans les fibres conventionnelles possédant une gaine homogène. Pour illustrer ce mécanisme, nous allons considérer une fibre à saut d'indice constituée d'un cœur homogène d'indice n_c et d'une gaine homogène et infinie d'indice $n_g < n_c$. Un mode sera guidé si le champ est transversalement oscillant dans le cœur (composante transverse du vecteur d'onde réel) et évanescent dans la gaine (composante transverse du vecteur d'onde imaginaire). L'indice effectif d'un mode guidé doit donc être compris entre l'indice de la gaine et l'indice du cœur : $n_g^2 < n_{\text{eff}}^2 < n_c^2$. En revanche, les modes radiatifs sont transversalement oscillants dans les deux milieux : $0 < n_{\text{eff}}^2 < n_g^2$ et les modes évanescents possèdent une composante longitudinale purement imaginaire : $n_{\text{eff}}^2 < 0$.

Un mode guidé par RTI peut aussi être vu comme un mode localisé dans le cœur qui ne se couple pas avec les modes pouvant se propager dans le milieu constituant la gaine. Dans le cas de la fibre à saut d'indice, les modes pouvant se propager dans le milieu infini et homogène constituant la gaine sont les ondes planes qui possèdent un indice effectif pouvant prendre toute valeur comprise entre 0 et n_g . Dans la Figure 2, l'ensemble des modes de

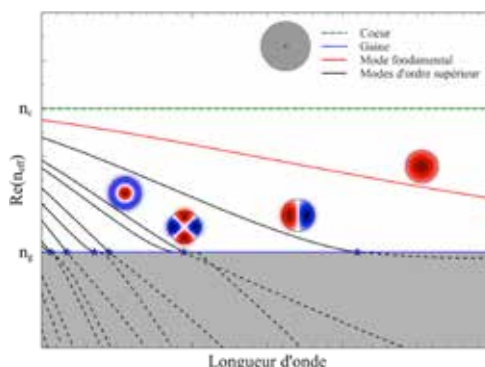


Figure 2. Diagramme de bandes d'une fibre à saut d'indice constituée d'un cœur d'indice n_c (pointillés verts) et d'une gaine d'indice n_g (droite bleue). Les indices effectifs des modes guidés sont représentés en rouge pour le mode fondamental et en noir pour les modes d'ordre supérieur, sans prendre en compte la dispersion du matériau. Sous l'indice de gaine, au-delà de leur longueur d'onde de coupure symbolisée par une étoile, les modes d'ordre supérieur ne sont plus guidés et deviennent des modes à fuite qui sont représentés en pointillés. Les images représentent le profil d'amplitude de différents modes guidés.

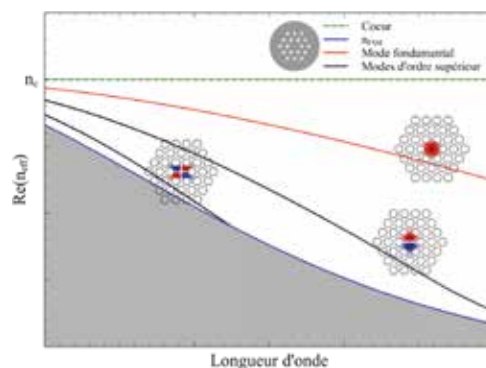
gaine constituent la zone grise appelée bande autorisée dans laquelle la densité d'états dans la gaine est non nulle. Les modes guidés sont donc compris sous l'indice du cœur (pointillés verts) mais en dehors de cette zone grise. L'indice effectif du mode fondamental est représenté en rouge et décroît avec la longueur d'onde. Ce mode existe quelle que soit la longueur d'onde, ce qui n'est pas le cas des modes d'ordre supérieur représentés en noir et qui disparaissent au-delà d'une longueur d'onde dite de coupure symbolisée par une étoile. Au-delà de leur longueur d'onde de coupure, les modes guidés se transforment en mode à fuite (représentés en pointillés noirs) mais leurs pertes sont si élevées qu'ils ne sont pas utilisables en pratique. Toutefois, lorsqu'une « tranchée » possédant un indice de réfraction $n_t < n_g$ est insérée entre le cœur et la gaine, les modes à fuites dont la partie réelle de l'indice effectif est compris entre n_t et n_g peuvent parfois être considérés

comme quasiment guidés. En effet, ces modes présentent des pertes d'autant plus faibles que la tranchée possède une épaisseur élevée et un indice de réfraction faible car cela diminue l'intégrale de recouvrement entre le mode de cœur et les modes de gaine.

Mécanisme de guidage par réflexion totale interne modifiée (RTIM)

Il s'agit du type de guidage rencontré dans les fibres possédant une gaine micro-structurée présentant des trous d'air (ou d'un matériau possédant un indice plus faible que le cœur). Le cœur est réalisé en retirant un ou plusieurs trous et constitue donc un défaut dans la structure périodique de la gaine. L'indice moyen de la gaine est alors plus faible que celui du cœur comme dans le cas d'une fibre à saut d'indice et le mécanisme de guidage est donc similaire. Pour déterminer les modes pouvant se propager dans la structure périodique constituant la gaine, il est possible d'utiliser différentes méthodes numériques comme la méthode de décomposition en ondes planes ou la méthode des éléments finis avec

Figure 3. Diagramme de bandes d'une FMS guidant par RTIM. La fibre est constituée d'un matériau d'indice n_c (pointillés verts) et de trous d'air. L'indice effectif du mode fondamental de la gaine est appelé n_{FSM} et il est représenté par la courbe bleue. Les indices effectifs des modes guidés sont représentés en rouge pour le mode fondamental et en noir pour les modes d'ordre supérieur. Les images représentent le profil d'amplitude des différents modes guidés.



Parmi l'infinité de modes pouvant se propager dans la gaine, celui qui possède l'indice effectif le plus élevé est représenté en bleu foncé. Son indice effectif est appelé n_{FSM} (pour *Fundamental Space-filling Mode*) et il est l'équivalent de l'indice de réfraction de la gaine de la fibre à saut d'indice : sous cette valeur, il existe une infinité de modes pouvant se coupler avec le mode de cœur. Notons que, dans le cas des FMS, n_{FSM} dépend de la longueur d'onde même si les milieux ne sont pas dispersifs : à courte longueur d'onde la lumière est localisée dans les zones de haut indice et n_{FSM} est proche de l'indice du cœur alors qu'à grande longueur d'onde la lumière se répartit quasi-uniformément dans le milieu micro-structuré (les relations de passage du champ EM étant toutefois toujours vérifiées) et l'indice effectif est plus faible. L'ensemble des indices effectifs des modes guidés dans le cœur (en rouge et en noir dans la Figure 3) sont donc localisés entre n_{FSM} et l'indice du cœur n_c .

conditions de bord périodiques. Nous obtenons alors un diagramme de bandes typique de la Figure 3.

Il faut toutefois noter que le nombre de couronnes de trous d'air situées autour du cœur est en réalité fini. Autour de cette gaine finie, il existe une seconde gaine possédant le même indice que le cœur et la gaine micro-structurée peut être vue comme une tranchée de bas indice. Les modes localisés dans le cœur sont donc en fait des modes à fuites dont les pertes diminuent lorsque le nombre de couronnes augmente.

Guidage par Bande Interdite Photonique (BIP)

Lorsque la gaine est constituée d'inclusions d'indice de réfraction plus élevé que celui du cœur, n_{FSM} est supérieur à l'indice du cœur et le type de guidage est nécessairement très différent de celui de la réflexion totale. En effet, il apparaît dans le diagramme de bandes des zones situées sous n_{FSM} où la densité d'états dans la gaine est nulle du fait de la périodicité du milieu constituant la gaine : il s'agit des bandes interdites photoniques (zones blanches dans la Figure 4). Il est donc possible d'obtenir des modes guidés lorsque l'indice effectif se situe à la fois dans ces BIP et sous l'indice de réfraction n_c du cœur. Comme pour le cas précédent, la gaine n'est en réalité pas infinie et les modes sont à fuite et présentent des pertes qui dépendent du type d'inclusions de haut indice et du nombre de couronnes.

Les bandes autorisées (zones grises) délimitant les BIPs sont créées par le couplage des modes d'une inclusion unique qui sont représentés en pointillés rouges et noirs et qui sont situés approximativement au centre des bandes autorisées. Les bords de BIPs qui délimitent les zones de transmission de la fibre correspondent donc approximativement aux longueurs d'onde de coupure d'une inclusion unique. Bien qu'un peu plus ●●●



Analysez la propagation de vos faisceaux laser en toute autonomie et avec une précision exceptionnelle – de l'UV au NIR. Bénéficiez d'une analyse de l'astigmatisme à la pointe de la précision industrielle.

- Précision extrême de la localisation de la taille du faisceau, idéale pour les faisceaux UV
- Précision de 3 % de l'astigmatisme laser
- Cohérence exceptionnelle entre les appareils, moins de 5 %
- Supporte les lasers à longue portée Rayleigh jusqu'à 40 mètres
- Couvre le spectre 266-1100nm (CW ou pulsés)
- Caméra haute sensibilité et haute résolution
- Mesures conformes à la norme ISO en moins d'une minute

Appelez-nous +33 6 01 01 27 32
ou visitez notre site web :
www.ophiropt.com



complexe du fait des différents types de résonateurs constituant la gaine, une telle description est également valable dans le cas d'une fibre à cœur creux guidant par BIP.

Guidage par couplage inhibé

Pour les trois types de guidage précédents, la lumière peut être confinée dans le cœur lorsqu'il n'existe aucun mode se propageant dans les différents éléments constituant la gaine et possédant le même indice effectif que le mode de cœur ce qui interdit de fait le couplage entre ces deux types de mode. Le guidage par couplage inhibé exploite la seconde possibilité interdisant le couplage entre deux modes : faire en sorte que leur intégrale de recouvrement soit nulle. Dans le cas d'une fibre à cœur creux tubulaire dont le diagramme de bandes est représenté schématiquement sur la Figure 5, la gaine constituée de 7 anneaux possède un n_{FSM} supérieur à l'indice du cœur et ne présente aucune BIP. Néanmoins, l'intégrale de recouvrement entre le mode de cœur quasi-gaussien et les modes d'ordre très élevé des anneaux constituant la gaine est très faible du fait du très grand nombre d'oscillations du champ dans les anneaux. La fibre présentera donc des zones de transmission situées entre les longueurs d'onde de coupure des modes d'anneaux présentant une symétrie circulaire (modes LP_{0x}) représentés en trait bleu (mode fondamental) ou en pointillés noirs.

CONCLUSION

Les différents mécanismes de guidage que nous venons de décrire ont donné lieu à de nombreuses propriétés originales dont certaines étaient tout simplement inaccessibles pour des fibres conventionnelles, comme la possibilité de confiner très efficacement la lumière dans un cœur creux ou d'obtenir un comportement infiniment monomode. Ces propriétés ont, et continueront, de trouver des applications dans des domaines très variés tels que les télécommunications, les nouvelles sources de

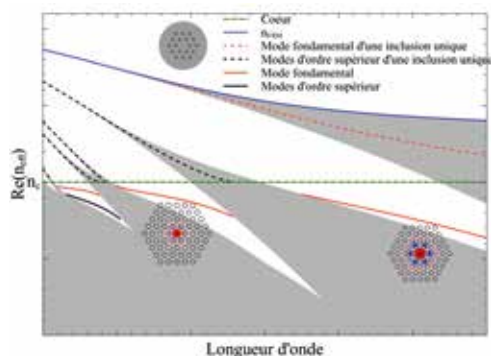
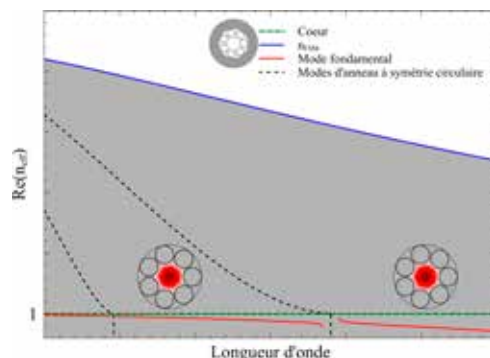


Figure 4. Diagramme de bandes d'une FMS guidant par BIP. La fibre est constituée d'un matériau d'indice n_c (pointillés verts) et d'inclusions possédant un indice de réfraction plus élevé. L'indice effectif du mode fondamental de la gaine est appelé n_{FSM} et il est représenté par la courbe bleue. Les indices effectifs des modes guidés sont représentés en rouge pour le mode fondamental et en noir pour les modes d'ordre supérieur. Les images représentent le profil d'amplitude du mode fondamental dans les deux premières BIPs.

lumière (métrologie, grands instruments, défense, quantique...), les capteurs biologiques et physiques... Parmi elles, nous pouvons citer la génération de supercontinuum, ou laser blanc, technologie déjà largement répandue (OCT, métrologie, peigne de fréquences, spectroscopie...) permettant, grâce aux propriétés de dispersion des FMS RTIM, de délivrer un rayonnement cohérent spatialement sur des gammes spectrales très étendues (du visible au proche infrarouge voire bien au-delà) [2]. Moins établies à ce jour mais à très fort potentiel, les fibres à cœur creux, en particulier les fibres dites *nested*, offrent aujourd'hui des pertes plus faibles que les meilleures fibres télécoms [3]. Même si, à ce jour, ce type de FMS reste

délicat à produire en grande quantité et à faible coût, il apparaît comme une technologie de rupture pour les liaisons inter-datacenter (vitesse de propagation accrue, dispersion et non-linéarités très faibles) ou pour la transmission effective de rayonnement hors fenêtre de transparence de la silice (UV et MIR). Les FMS sont également utilisées depuis plusieurs années dans des lasers industriels de puissance grâce à leur capacité à posséder des cœurs de grandes dimensions (LMA) tout en préservant un contenu modal de qualité. Enfin, le développement actuel important des technologies quantiques et de métrologies profiteront sans aucun doute des propriétés originales des FMS (génération et distribution de photons intriqués, horloges optiques, gyroscopes ultra-stables, résistance aux environnements sévères...). ●

Figure 5. Schéma d'un diagramme de bandes d'une FMS guidant par couplage inhibé. Le cœur de la fibre est constitué d'air (pointillés verts). n_{FSM} est représenté en bleu et les autres modes d'anneaux à symétrie circulaire sont représentés en pointillés noirs. Les indices effectifs des modes guidés sont représentés en rouge pour le mode fondamental et les images représentent le profil d'amplitude de ce mode à différentes longueurs d'onde.



RÉFÉRENCES

- [1] P. St. J. Russell, *J. Lightwave Technol.* **24**, 4729 (2006)
- [2] J. M. Dudley *et al.*, *EPL* **151**, 55001 (2025)
- [3] S. Gao *et al.*, *European Conference on Optical Communications Th03.01.1* (2025)

COMMENT CHOISIR UNE CAMÉRA INFRAROUGE : ADAPTER LA LONGUEUR D'ONDE, LE DÉTECTEUR ET L'APPLICATION

Ruediger BADER*, Fethi AYERED

Hamamatsu Photonics France, 19 rue du Saule Trapu, Parc du Moulin de Massy, 91300 Massy, France

*info@hamamatsu.fr



[https://doi.org/10.1051/
photon/202613757](https://doi.org/10.1051/photon/202613757)

Les caméras infrarouges couvrent plusieurs bandes spectrales, chacune étant gouvernée par différents mécanismes physiques tels que la réflexion, la transmission, l'absorption ou l'émission thermique. Choisir le système approprié nécessite de comprendre où se situe l'information pertinente dans le spectre et comment la technologie du détecteur, l'optique et les conditions d'acquisition influencent les performances. Cet article propose un guide pratique pour sélectionner une caméra infrarouge en fonction de l'application visée.

La sélection d'une caméra infrarouge commence par l'identification de la gamme de longueurs d'onde dans laquelle se trouve l'information recherchée. Cet article passe en revue les principales bandes spectrales infrarouges, les

technologies de détection associées et les critères essentiels qui déterminent les performances d'imagerie. Des exemples d'applications illustrent comment la physique du signal guide la conception du système et aide les utilisateurs à choisir la caméra infrarouge la plus adaptée à leurs besoins.

COMPRENDRE L'IMAGERIE INFRAROUGE POUR MIEUX CHOISIR

L'imagerie infrarouge est utilisée dans de nombreux domaines, allant de l'inspection industrielle et du tri alimentaire à la fabrication de semi-conducteurs, l'analyse du patrimoine culturel et la recherche scientifique. Cependant, « l'imagerie infrarouge » ne constitue pas une technique unique. Elle englobe plusieurs régions spectrales, chacune révélant des ●●●

Tableau 1. Bandes spectrales infrarouges, mécanismes et applications.

BANDE SPECTRALE	PLAGE DE LONGUEURS D'ONDE	MÉCANISME DOMINANT	APPLICATIONS TYPIQUES
NIR	0.75–1.0 μm	Réflexion	Alignement laser, inspection simple
SWIR	0.9–1.7 μm	Réflexion et transmission	Tri alimentaire, inspection du silicium, imagerie d'électroluminescence
MWIR	3–5 μm	Émission thermique (objets chauds)	Combustion, imagerie des gaz, procédés à haute température
LWIR	8–14 μm	Émission thermique (objets à température ambiante)	Thermographie, maintenance, diagnostic du bâtiment

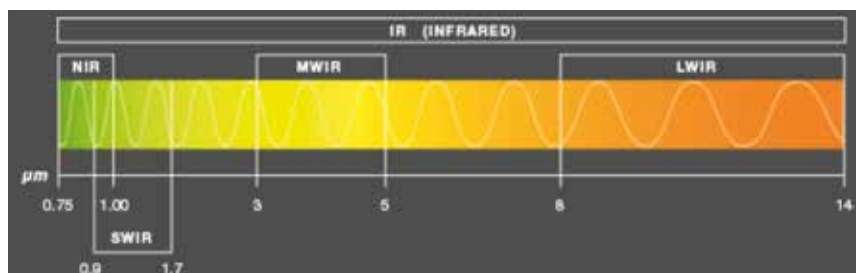


Figure 1. Domaines spectraux infrarouges. La sélection de la bande spectrale appropriée constitue la décision la plus importante lors du choix d'une caméra infrarouge.

phénomènes physiques différents selon que le contraste dominant provient de la réflexion, de la transmission, de l'absorption ou de l'émission thermique. Comprendre ce qui doit être observé et à quelle longueur d'onde cette information existe constitue le fondement de la sélection d'une caméra infrarouge.

Cette approche est bien plus fiable que la simple comparaison de spécifications techniques isolées. Elle garantit que le détecteur, l'optique, l'éclairage et les paramètres d'acquisition soient choisis en fonction de l'application plutôt qu'à partir de critères de performance génériques.

DOMAINES SPECTRAUX DE L'INFRAROUGE

La région infrarouge s'étend approximativement de 0,75 à 14 μm et est généralement divisée en quatre bandes principales : le proche infrarouge (NIR), l'infrarouge à ondes courtes (SWIR), l'infrarouge à ondes moyennes (MWIR) et l'infrarouge à ondes longues (LWIR). Chaque bande correspond à différentes interactions entre la lumière et la matière, et offre donc des capacités d'imagerie spécifiques.

Pour aider le lecteur à comprendre ces distinctions, le Tableau 1 résume les régions spectrales, les mécanismes physiques dominants et quelques applications représentatives.

TECHNOLOGIES DE DÉTECTEURS ET LEURS IMPLICATIONS

Le détecteur est le cœur d'une caméra infrarouge. Il détermine la sensibilité, les performances en bruit, la vitesse d'acquisition et la stabilité, et définit en fin de compte les informations physiques qui pourront être observées.

Les détecteurs au silicium dominent les régions visible et NIR grâce à leur haute résolution et leur faible coût. Toutefois, leur sensibilité diminue fortement au-delà de 1 μm . Dans le domaine SWIR, les détecteurs InGaAs constituent la technologie de référence. Ils offrent une sensibilité élevée et un faible bruit, aussi bien pour l'imagerie par réflexion que par transmission. Ils sont disponibles sous forme de capteurs matriciels (area scan) pour l'imagerie bidimensionnelle et de capteurs linéaires (line scan) pour l'inspection rapide d'objets en mouvement.

Pour l'imagerie MWIR et LWIR, les détecteurs refroidis tels que l'InSb ou le HgCdTe (MCT) fournissent la sensibilité nécessaire aux mesures thermiques de haute précision. Les microbolomètres non refroidis constituent quant à eux une solution compacte et économique pour les applications générales de thermographie lorsque des performances extrêmes ne sont pas requises.

Afin de fournir une vue d'ensemble claire, le Tableau 2 compare les principales familles de détecteurs.

Le détecteur n'est pas simplement un capteur : il détermine quels phénomènes physiques peuvent être observés.

MÉCANISMES DE BRUIT QUI DÉFINISSENT LES PERFORMANCES D'UNE CAMÉRA

Les détecteurs infrarouges se distinguent des capteurs silicium non seulement par leur sensibilité spectrale, mais également par les mécanismes physiques de bruit qui limitent leurs performances. **Ces mécanismes déterminent le rapport signal/bruit (SNR) atteignable, influencent le temps d'exposition et les besoins en refroidissement, et définissent finalement la capacité d'une caméra IR à répondre aux exigences d'une application donnée.**

Le bruit d'obscurité dans les détecteurs infrarouges est principalement dû aux porteurs générés thermiquement. Comme les matériaux infrarouges tels que l'InGaAs, l'InSb ou le HgCdTe possèdent une bande interdite beaucoup plus faible que le silicium, ils présentent un courant d'obscurité significativement plus élevé à

Figure 2. Image visible (à gauche) et image SWIR à 1200 nm (à droite) de grains de café mélangés à des pierres. La réflectance SWIR révèle des différences de matériau invisibles dans le domaine visible [1].

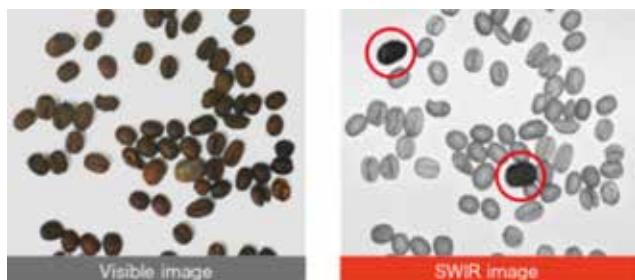
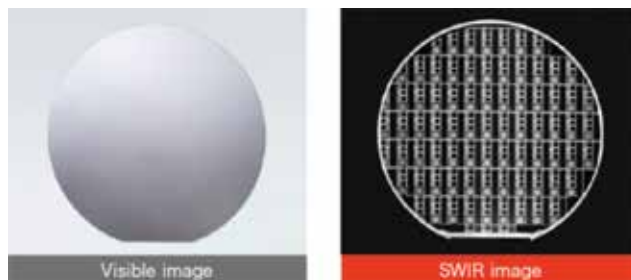


Figure 3. Image visible (à gauche) et image SWIR en transmission à 1100 nm (à droite) d'un wafer de silicium. Les longueurs d'onde SWIR traversent le silicium et révèlent des structures internes qui n'apparaissent pas dans le domaine visible [1].



TYPE DE DÉTECTEUR	DOMAINE SPECTRAL	AVANTAGES	LIMITATIONS
Silicium	VIS-NIR	Haute résolution, faible coût	Non adapté au-delà d'environ 1 μm
InGaAs	SWIR	Haute sensibilité, faible bruit, imagerie en réflexion et transmission	Coût plus élevé, bruit dépendant de la température
InSb / MCT refroidis	MWIR-LWIR	Excellente sensibilité, thermographie de précision	Refroidissement nécessaire, complexité accrue
Microbolomètre	LWIR	Compact, non refroidi, économique	Sensibilité plus faible, réponse plus lente

température donnée. Ce courant d'obscurité augmente de manière exponentielle avec la température, ce qui rend le refroidissement indispensable pour les détecteurs photoniques SWIR, MWIR et LWIR lorsque des temps d'exposition longs ou une haute sensibilité sont nécessaires.

La plupart des détecteurs IR utilisent une architecture hybride dans laquelle la couche photosensible est assemblée par microbilles (« bump bonding ») sur un circuit de lecture dédié (ROIC). Cette structure introduit des capacités parasites et des sources de bruit électronique supplémentaires qui n'existent pas dans les capteurs CMOS monolithiques. Associés à la densité de défauts plus élevée des matériaux III-V et II-VI, ces facteurs conduisent à un bruit de lecture plus important et à des variations plus marquées d'un pixel à l'autre par rapport aux détecteurs du domaine visible.

Les variations de réponse et de courant d'obscurité entre pixels sont à l'origine du bruit de motif fixe (FPN), de la non-uniformité du signal d'obscurité (DSNU) et de la non-uniformité de la réponse photoélectrique (PRNU). Ces effets sont plus prononcés dans les détecteurs infrarouges et nécessitent une correction d'uniformité (NUC), généralement réalisée au moyen d'un étalonnage à un ou deux points. Comme ces paramètres évoluent avec la température, la stabilisation thermique est essentielle pour maintenir une qualité d'image constante dans le temps.

L'effet combiné du bruit d'obscurité, du bruit de lecture et des non-uniformités détermine le signal minimal détectable. En pratique, les caméras infrarouges peuvent être limitées par le bruit lors d'expositions courtes, sauf si l'éclairage est suffisant, et les capteurs haute résolution dotés de petits pixels sont particulièrement sensibles au manque de photons. La compréhension de ces mécanismes de bruit est

Tableau 2. Technologies de détecteurs et leurs caractéristiques.

donc essentielle pour sélectionner la technologie de détection, la stratégie de refroidissement et la configuration optique les mieux adaptées à une application donnée.

PARAMÈTRES CLÉS INFLUENÇANT LES PERFORMANCES D'UNE CAMÉRA IR

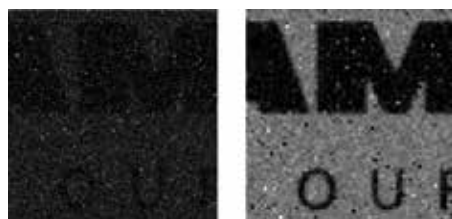
Le choix de la bande spectrale est crucial et doit correspondre à la longueur d'onde où se trouve l'information recherchée. Par exemple, le contraste lié à l'humidité est particulièrement marqué dans le domaine SWIR, tandis que la thermographie à température ambiante nécessite le domaine LWIR. Les structures internes des wafers de silicium ne deviennent visibles qu'au-delà d'environ 1,1 μm , ce qui oriente également vers le SWIR. À l'inverse, les procédés à haute température émettent fortement dans le domaine MWIR.

La sensibilité et le niveau de bruit sont tout aussi essentiels. Les signaux infrarouges étant souvent faibles, le rapport signal/bruit (SNR) constitue un indicateur de performance plus pertinent que la seule sensibilité nominale. Cela est particulièrement vrai en imagerie SWIR, où les contrastes obtenus en transmission peuvent être très faibles.

La résolution et la taille des pixels doivent être considérées conjointement. Une résolution plus élevée implique souvent des pixels plus petits, qui collectent moins de photons et peuvent ainsi réduire le rapport signal/bruit lorsque l'éclairage est limité. Le compromis entre niveau de détail spatial et budget photonique est au cœur de la conception des systèmes infrarouges. La fréquence d'acquisition et le temps d'exposition dépendent de l'application. ● ● ●

POURQUOI UNE RÉOLUTION PLUS ÉLEVÉE N'EST PAS TOUJOURS MEILLEURE

L'augmentation de la résolution implique généralement une diminution de la taille des pixels. Des pixels plus petits collectent moins de photons, ce qui peut dégrader significativement le rapport signal/bruit dans les applications IR à faible luminosité ou à faible contraste. Par conséquent, un capteur à plus haute résolution peut produire des images de moins bonne qualité si l'optique ou l'éclairage ne fournit pas suffisamment de signal. Le choix optimal repose sur un équilibre entre la résolution, la taille des pixels, l'optique et le flux photonique disponible.



Effet de la taille des pixels sur le rapport signal/bruit pour un flux photonique identique : image de gauche avec des pixels de 5 μm , image de droite avec des pixels de 15 μm . À éclairage et temps d'exposition identiques, les pixels plus grands collectent davantage de photons et atteignent donc un rapport signal/bruit plus élevé, tandis que les pixels plus petits deviennent limités par le bruit malgré leur résolution nominale supérieure [2].

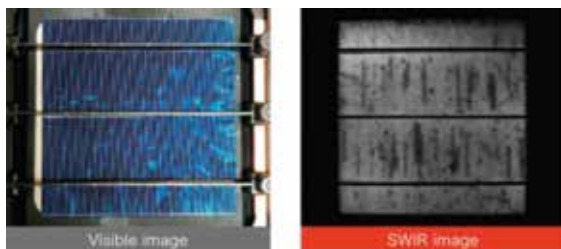


Figure 4. Image visible (à gauche) et image SWIR (à droite) d'une cellule solaire. L'imagerie SWIR révèle des variations internes et des défauts impossibles à observer sur l'image conventionnelle [1].

Les systèmes d'inspection sur convoyeur nécessitent des vitesses élevées et des temps d'exposition courts, tandis que l'imagerie par électroluminescence de cellules solaires requiert généralement des expositions plus longues ainsi qu'une excellente stabilité.

Enfin, le refroidissement et la stabilité thermique jouent un rôle majeur dans les performances de bruit, notamment pour les détecteurs SWIR et MWIR. Le refroidissement réduit le courant d'obscurité et stabilise l'image dans le temps.

Une caméra infrarouge n'est réellement efficace que si elle atteint le rapport signal/bruit requis dans les conditions d'imagerie réelles.

APPLICATIONS REPRÉSENTATIVES

L'imagerie infrarouge se comprend particulièrement bien à travers des exemples concrets illustrant l'interaction entre la longueur d'onde, le choix du détecteur et la conception du système.

Dans les applications de contrôle alimentaire, l'imagerie visible échoue souvent à distinguer certains contaminants, tels que des pierres, lorsque leur forme et leur couleur sont proches de celles du produit inspecté. Dans la région SWIR,

en revanche, leurs spectres de réflectance diffèrent fortement de ceux des aliments. L'imagerie linéaire (« line scan ») est fréquemment utilisée pour inspecter des produits défilant sur un convoyeur, et un éclairage homogène est indispensable pour garantir une détection fiable [1].

Dans l'inspection des wafers de silicium, le silicium devient partiellement transparent au-delà d'environ 1,1 μm . L'imagerie SWIR permet ainsi l'observation non destructive de structures internes, de marques d'alignement et de défauts présents dans les wafers. L'obtention d'un contraste suffisant nécessite une sensibilité SWIR élevée, une résolution adaptée et un faible niveau de bruit [1].

Dans l'imagerie par électroluminescence des cellules solaires, le signal émis se situe dans la région NIR-SWIR et est généralement très faible. Une sensibilité élevée, un faible bruit et une excellente stabilité temporelle sont indispensables pour cartographier les défauts et les variations de performance au sein d'un dispositif [1].

L'application détermine la longueur d'onde, et la longueur d'onde détermine la technologie.

PIÈGES FRÉQUENTS LORS DU CHOIX D'UNE CAMÉRA IR

Plusieurs erreurs récurrentes peuvent compromettre les performances d'un système. L'une des plus courantes consiste à choisir une caméra uniquement en fonction de sa résolution ou de son prix sans tenir compte de la longueur d'onde nécessaire à l'application. Négliger l'optique, les filtres ou l'éclairage peut également dégrader fortement la qualité d'image. De même, supposer qu'une « sensibilité plus élevée » conduit automatiquement à de meilleurs résultats est souvent une simplification trompeuse. Les aspects d'intégration — déclenchement (trigger), formats de données, synchronisation — sont parfois sous-estimés alors qu'ils sont essentiels à un fonctionnement fiable du système.

CONCLUSION

Sélectionner une caméra infrarouge ne consiste pas à comparer des fiches techniques, mais à comprendre la physique de l'objet ou du phénomène observé. La question essentielle n'est pas : « Quelle est la meilleure caméra ? », mais plutôt : « À quelle longueur d'onde l'information que je recherche existe-t-elle réellement ? » Une caméra infrarouge ne peut offrir des performances optimales que lorsqu'elle est intégrée dans un système complet comprenant une optique adaptée, un éclairage approprié, des paramètres d'acquisition optimisés et un traitement d'image pertinent. En partant de l'application plutôt que du dispositif lui-même, il est possible de concevoir une solution d'imagerie fiable, efficace et parfaitement adaptée au besoin. ●

FOURNISSEURS	PRINCIPALES GAMMES / SPÉCIALITÉS
Teledyne FLIR	Caméras thermiques et scientifiques, principalement MWIR et LWIR
Xenics	Large gamme de caméras SWIR, MWIR et LWIR
Allied Vision	Caméras industrielles SWIR InGaAs, notamment gamme Goldeye
Hamamatsu Photonics	Caméras InGaAs pour l'imagerie NIR/SWIR scientifique et industrielle
Specim	Caméras hyperspectrales couvrant VNIR, NIR, SWIR, MWIR et LWIR
Teledyne	Large gamme de caméras infrarouges pour l'imagerie industrielle, thermique et scientifique, couvrant notamment le SWIR, le MWIR et le LWIR

Tableau 3. Liste des principaux fournisseurs.

REFERENCES

- [1] Hamamatsu Photonics, InGaAs Cameras Overview, technical resource (accessed 2026). <https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/cameras/ingaas-cameras.html>
- [2] Hamamatsu Photonics, Scientific Camera Technical Resources, technical resource (accessed 2026). <https://camera.hamamatsu.com/jp/en.html>

Laser de forte puissance à 1762 nm pour les ions Ba⁺



TOPTICA Photonics propose une source laser monofréquence de forte puissance à 1762 nm, spécifiquement développée pour le contrôle des qubits dans les processeurs quantiques à ions baryum (Ba⁺). Cette architecture entièrement fibrée combine haute puissance, faible bruit et excellente stabilité fréquentielle afin d'accompagner le développement des technologies quantiques à ions piégés.

www.toptica.com/products/narrow-linewidth-lasers/als-ir

ÉLECTRONIQUE DE COMPTAGE DE PHOTONS JUSQU'À 64 CANAUX



PicoQuant enrichit sa gamme d'électroniques de comptage de photons corrélés dans le temps (TCSPC) avec l'HydraHarp 500 L, un système conçu pour les expériences multi-canaux générant de grands volumes de données. Capable de gérer jusqu'à 64 canaux de détection avec une résolution temporelle de 1 ps, l'HydraHarp 500 L cible les applications en information quantique, imagerie résolue en temps et caractérisation de composants photoniques.

www.picoquant.com

Système de mesure d'épaisseur pour les wafers de 300 mm



Hamamatsu Photonics présente HyperGauge C17319-11, un système de mesure d'épaisseur par interférométrie spectrale capable de cartographier l'épaisseur d'un wafer de 300 mm en seulement 5 secondes. Basé sur la technologie propriétaire λ -Capture®, il réalise une mesure surfacique haute résolution sans recourir à un spectromètre, offrant ainsi un contrôle rapide et précis de l'uniformité des couches minces pour la fabrication des semi-conducteurs.

www.hamamatsu.com

LASER GHZ POUR LE MICRO-USINAGE DE NOUVELLE GÉNÉRATION



Synthwave Lasers présente Neon-Burst, une source laser picoseconde destinée aux applications de micro-usinage. Basée

sur une architecture de synthèse d'impulsions à l'échelle du GHz, la source laser Neon-Burst offre une grande flexibilité des paramètres (0,5 à 20 ps, 1 à 20 GHz, mode burst avec façonnage temporel) pour des applications telles que les traversées de verre (TGV), la microélectronique ou la micro-soudure. Sa conception optique robuste en fait une solution adaptée aux environnements industriels.

www.synthwave-lasers.com/products/neon-burst/

Système de mesure dédié aux fibres optiques de nouvelle génération

Arden Photonics présente le FGC-GH, un système de mesure conçu pour les fibres optiques de nouvelle génération, telles que les fibres à

cœur creux, multicœurs ou à maintien de polarisation. Grâce à une optique haute résolution et à une architecture logicielle modulaire, il fournit des mesures automatiques, répétables et indépendantes de l'opérateur, aussi bien en R&D qu'en production.

www.ardenphotonics.com



H 1 Hydrogen																	He 2 Helium	
Li 3 Lithium	Be 4 Beryllium																	
Na 11 Sodium	Mg 12 Magnesium																	
K 19 Potassium	Ca 20 Calcium	Sc 21 Scandium	Ti 22 Titanium	V 23 Vanadium	Cr 24 Chromium	Mn 25 Manganese	Fe 26 Iron	Co 27 Cobalt	Ni 28 Nickel	Cu 29 Copper	Zn 30 Zinc	Ga 31 Gallium	Ge 32 Germanium	As 33 Arsenic	Se 34 Selenium	Br 35 Bromine	Kr 36 Krypton	
Rb 37 Rubidium	Sr 38 Strontium	Y 39 Yttrium	Zr 40 Zirconium	Nb 41 Niobium	Mo 42 Molybdenum	Tc 43 Technetium	Ru 44 Ruthenium	Rh 45 Rhodium	Pd 46 Palladium	Ag 47 Silver	Cd 48 Cadmium	In 49 Indium	Sn 50 Tin	Sb 51 Antimony	Te 52 Tellurium	I 53 Iodine	Xe 54 Xenon	
Cs 55 Cesium	Ba 56 Barium	La 57 Lanthanum	Hf 72 Hafnium	Ta 73 Tantalum	W 74 Tungsten	Re 75 Rhenium	Os 76 Osmium	Ir 77 Iridium	Pt 78 Platinum	Au 79 Gold	Hg 80 Mercury	Tl 81 Thallium	Pb 82 Lead	Bi 83 Bismuth	Po 84 Polonium	At 85 Astatine	Rn 86 Radon	
Fr 87 Francium	Ra 88 Radium	Ac 89 Actinium	Rf 104 Rutherfordium	Db 105 Dubnium	Sg 106 Seaborgium	Bh 107 Berkelium	Hs 108 Hassium	Mt 109 Mitlergum	Ds 110 Darmstadtium	Rg 111 Roentgenium	Cn 112 Copernicium	Nh 113 Nihonium	Fl 114 Flerovium	Mc 115 Moscovium	Lv 116 Livermorium	Ts 117 Tennessine	Og 118 Oganesson	
Ce 58 Cerium	Pr 59 Praseodymium	Nd 60 Niodymium	Pm 61 Promethium	Sm 62 Samarium	Eu 63 Europium	Gd 64 Gadolinium	Tb 65 Terbium	Dy 66 Dysprosium	Ho 67 Holmium	Er 68 Erbium	Tm 69 Thulium	Yb 70 Ytterbium	Lu 71 Lutetium					
Th 90 Thorium	Pa 91 Protactinium	U 92 Uranium	Np 93 Neptunium	Pu 94 Plutonium	Am 95 Americium	Cm 96 Curium	Bk 97 Berkelium	Cf 98 Californium	Es 99 Einsteinium	Fm 100 Fermium	Md 101 Mendelevium	No 102 Nobelium	Lr 103 Lanthanum					

Now Invent.TM

La Nouvelle Génération de Fabricants de Matériaux Photoniques et Optiques

Fabricant de plus de 35 000 composés, métaux et nanoparticules certifiés de haute pureté, du laboratoire à l'échelle industrielle — incluant une vaste gamme de matériaux vitreux et cristallins ainsi que des précurseurs destinés aux applications photoniques, laser et optoélectroniques, conçus pour répondre aux normes de qualité les plus rigoureuses.

American Elements ouvre un monde de possibilités....Now Invent!

www.americanelements.com

