

Photoniques

LA LUMIÈRE ET SES APPLICATIONS

ENTRETIENS

Bruno Desruelle,
Frédérique de Fornel

FOCUS

De la deeptech à
la filière structurée

COMPRENDRE

La topologie
photonique

ACHERER

Une caméra
hyperspectrale FTIR

DOSSIER

COLORATION STRUCTURELLE

- De l'impact du désordre sur l'apparence visuelle de surfaces nanostructurées
- Les couleurs structurelles des cristaux liquides biologiques
- Trois images en une : comment la nanophotonique révolutionne le concept d'image imprimée
- La couleur bleue : des pigments à l'auto-assemblage



- Quand l'imagerie accompagne la restauration d'œuvres picturales : le cas Soulages
- Becquerel et la photographie couleur en 1848

EDP Sciences launches a new books collection : Institut d'Optique Graduate School Textbook

First to be published :

Optical Models for Material Appearance



This book is an introduction to the fundamental notions of optics which allows to understand the radiometric quantities measured with common devices, to learn how to analyze them, and to review some classical optics-based predictive models for various types of materials and structures.

The author, **Mathieu Hébert**, is professor assistant at Institut d'Optique Graduate School

ISBN 978-2-7598-2647-6

260 pages, 95 €

On sale on laboutique.edpsciences.fr
(English books section)



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 Durand, secrétaire général de la Société Française de Physique

Rédaction

Rédacteur en chef

Nicolas Bonod

nicolas.bonod@edpsciences.org

Journal Manager

Florence Anglézio

florence.angelzio@edpsciences.org

Secrétariat de rédaction et mise en page

Agence de communication la Chamade

<https://agencelachamade.com/>

Comité de rédaction

Marie-Begoña Lebrun (Phasics),
Adeline Bonalet (CNRS),
Benoît Cluzel (Université de Bourgogne),
Sara Ducci (Université de Paris),
Céline Fiorini-Debuisschert (CEA),
Sylvain Gigan (Sorbonne Université),
Aurélien Jullien (CNRS),
Patrice Le Boudec (IDIL Fibres Optiques),
Christophe Simon-Boisson (Thales LAS France).

Advertising

Bernadette Dufour

Cell phone + 33 7 87 57 07 59

bernadette.dufour@edpsciences.org

Photoniques est réalisé par

EDP Sciences,

17 avenue du Hoggar,

P.A. de Courtaboeuf,

91944 Les Ulis Cedex A, France

Tél. : +33 (0)1 69 18 75 75

RCS : EVRY B 308 392 687

Gestion des abonnements

abonnements@edpsciences.org

Impression

Fabrique imprimeur

B.P. 10

87500 Saint-Yrieix la Perche

Dépôt légal : février 2024

Route : STAMP (95)



IMPRIM'VERT*

© 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

Pour un accès libre à la science et un avenir coloré

L'accès au savoir est un enjeu majeur pour le monde académique et celui de l'édition scientifique. La revue Photoniques s'inscrit pleinement dans l'objectif de rendre la science accessible à tous. C'est donc avec un immense plaisir qu'avec la Société Française d'Optique et EDP Sciences, nous inaugurons avec ce numéro la diffusion en accès gratuit de l'intégralité de la version numérique de ces pages. Savoir que ce contenu est désormais accessible à tous nous motive encore plus avec le comité de rédaction à identifier les sujets les plus pertinents et à aiguïser, numéro après numéro, votre curiosité. Car Photoniques, ce sont de nombreuses actualités de l'écosystème en optique et photonique. Photoniques, ce sont des articles originaux, complets, rigoureux et accessibles, rédigés pour la revue par les meilleurs spécialistes. Photoniques, ce sont des entretiens qui montrent la grande diversité des parcours des hommes et des femmes qui font progresser les sciences de la lumière aussi bien dans le monde industriel que dans le monde académique. Photoniques, ce sont des rubriques uniques et complémentaires qui permettent de couvrir les nombreux aspects de notre discipline. Photoniques, c'est tout cela, et tout cela est désormais en accès gratuit et facilement accessible sous format numérique.

Et c'est un numéro haut en couleurs que nous vous proposons ici ! Les couleurs ont de tout temps fasciné. Elles

ont attiré l'intérêt des scientifiques, des artisans et des artistes. Car maîtriser la synthèse de nouvelles couleurs, c'est rendre possible de nouveaux effets visuels et processus créatifs. Les couleurs structurelles sont présentes dans le monde minéral et vivant. Des millions d'années d'évolution ont fourni aux végétaux et aux animaux des couleurs éclatantes produites par des matériaux particulièrement avancés. Ces derniers inspirent aujourd'hui les équipes de recherche et les motivent à développer des matériaux nanostructurés pour produire des effets visuels innovants. En écho aux 4 articles de ce dossier technique, *Osez l'optique* vous immergera dans l'univers des « Outrenoirs » de Pierre Soulages et *Expérience Marquante* vous emmènera en l'année 1848 pour retracer l'histoire de la genèse des premières photographies couleurs d'Edmond Becquerel. Nous le savons, la photonique a de multiples atouts pour répondre aux enjeux sociétaux que sont la santé, l'énergie, l'environnement, la défense. Elle est également omniprésente en recherche pour faire progresser nos connaissances scientifiques. Je vous invite dans ce contexte à découvrir l'article *La photonique : de la deeptech à la filière structurée* rédigé par notre partenaire Photonics France. La structuration de la filière photonique va contribuer à accélérer son essor et son implantation dans les territoires. Ensemble, associons-nous pour renforcer la photonique et construire un avenir lumineux et coloré !

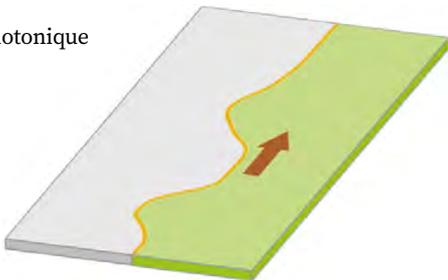


26 **OSEZ L'OPTIQUE** Quand l'imagerie accompagne la restauration d'œuvres picturales



49 La couleur bleue : des pigments à l'auto-assemblage

54 Comprendre la topologie photonique



Sommaire

www.photoniques.com

N° 124

ACTUALITÉS

- 03 Éditorial et actualité de la SFO
- 05 Informations partenaires
- 11 Mots-croisés : coloration structurale
- 12 Actualités scientifiques
- 14 Entretien : B. Desruelle, F. de Fornel

FOCUS

- 20 La photonique : de la deeptech
à la filière structurée

OSEZ L'OPTIQUE

- 26 Quand l'imagerie accompagne la restauration
d'œuvres picturales : le cas Soulages

EXPÉRIENCE MARQUANTE

- 31 Becquerel et la photographie couleur en 1848

DOSSIER : COLORATION STRUCTURELLE

- 34 De l'impact du désordre sur l'apparence
visuelle de surfaces nanostructurées
- 39 Les couleurs structurales des cristaux
liquides biologiques
- 44 Comment la nanophotonique révolutionne
le concept d'image imprimée
- 49 La couleur bleue : des pigments
à l'auto-assemblage

COMPRENDRE

- 54 La topologie photonique

ACHETER

- 59 Une caméra hyperspectrale FTIR

PRODUITS

- 65 Nouveautés

Annonces

Ardop 63
Edmund Optics 55
EDP Sciences **II° de couv.**, 57
EPIC **IV° de couv.**
HTDS 21

ID quantique 47
Imagine Optic 23
ISP SYstem 25
Opton Laser 61
Oxxius 51

Scientec 43
SFO 13
Spectrogon 37
Spectros 45
Toptica 29

Wavetel 53

Crédit photo (couverture) : ©iStockPhoto

L'édito de la SFO



FRANÇOIS SALIN
Président de la SFO



ARIEL LEVENSON
Président sortant de la SFO

Nos fondements de société savante française, la loi Lumières

Nous nous reconnaissons pleinement au sein d'une « société savante », notre SFO. Cette appellation pourrait paraître anachronique, voire prétentieuse de nos jours. Si chacun de nos membres est un sachant dans son domaine de compétence, combien peuvent se revendiquer savants ? Pas nous en tous cas et sans blesser personne, il paraît difficile de se comparer aux savants des siècles passés, au savoir universel ne connaissant pas de frontière disciplinaire. Mais l'universalisme a-t-il pour autant disparu ? Nous nous reconnaissons dans la SFO, en tant que société savante car en associant ces deux mots, société et savante, l'honneur revient au concept de société. Nous avons évoqué dans l'édito de fin d'année notre gouvernance et mode de fonctionnement collégiales, du triumvirat présidentiel jusqu'à nos Clubs et Commissions. Nous avons dit sa nécessité, compte tenu des nombreuses activités et aussi la richesse apportée par la diversité des parcours et cultures. Allons plus loin.

L'optique-photonique est une science en soi et une technologie diffusante (édito Photoniques 117). Y-a-t-il un seul domaine, qu'il soit scientifique ou technique, pour lequel l'optique n'apporte pas une solution, une optimisation, un test ? L'optique est partout et cette omniprésence se reflète dans les actions de la SFO. Regardons notre Congrès. OPTIQUE Normandie 2024 nous plongera dans les impulsions ultracourtes, la biologie, les nanosciences, la physique quantique, la médecine, la spectroscopie, les fibres optiques, les télécommunications, les exoplanètes, l'intelligence artificielle... et même les lasers ! Ensemble grâce à notre diversité, nous, en tant que société, serons plus proches de l'universel et du savant.

Nous pourrions en être fiers, fiers de continuer à apprendre, fiers peut-être lorsqu'une étincelle s'allumera en écoutant une présentation d'un domaine qui nous est étranger. Fiers aussi d'honorer

par ce melting pot, la plus noble tradition française d'universalisme. OPTIQUE Normandie 2024, notre congrès francophone, tendra vers un autre universalisme en réunissant une communauté très diverse, nourrie de collègues travaillant dans des laboratoires et entreprises, venant des quatre coins du monde. Des centaines de jeunes thésards et post-docs, dont un bon nombre en cours d'apprentissage du français, seront également présents. Tous contribuant à faire rayonner la recherche française. Certains resteront en France pour la faire progresser, pour enseigner à leur tour ou pour contribuer à développer notre industrie. D'autres repartiront dans leurs pays d'origine, ou ailleurs, et deviendront des ambassadeurs de notre culture scientifique, gastronomique, littéraire ... D'autres encore, après une formation en France ont effectué des séjours plus ou moins prolongés, dans des contrées plus ou moins éloignées et ressentent l'enrichissement personnel culturel et scientifique apporté par cette expérience. Ces métissages de cultures sont une richesse constitutive et inaliénable de notre communauté.

Oui, nous pouvons être fiers de contribuer, modestement mais activement, à faire vivre, au-delà de notre société savante, cette tradition française d'accueil, d'universalisme et de Lumières et sommes consternés par certains articles du projet de loi immigration qui pourraient non seulement réduire les flux de scientifiques et d'étudiants, mais également remettre en cause les fondements mêmes de notre culture de société savante française.

Photoniquement vôtre
Ariel Levenson
Directeur de recherche CNRS
Président sortant de la SFO
François Salin
Président et CEO Ilasis laser
Président de la SFO



OPTIQUE Normandie 2024, le plus grand congrès international francophone en Optique-Photonique

Appel à communication – la date limite est prorogée au 15 mars 2024

Du 1^{er} au 05 juillet, Rouen, ville historique par excellence, accueille le congrès phare de la Société Française d'Optique. OPTIQUE Normandie 2024 avec plus de 600 participants attendus, met en lumière la richesse de tous les secteurs de l'Optique-Photonique en France et offre une vision globale des recherches de pointe du fondamental à l'appliqué, des développements industriels et des innovations pédagogiques.



Les sessions thématiques du congrès OPTIQUE Normandie 2024 sont organisées par les clubs de la SFO, la Société Française d'Optique.

- ✓ Lasers et Optique Quantique (Club COLOQ)
- ✓ Optique Guidée (Club JNOG)
- ✓ Cristaux pour l'Optique (Club JNCO)
- ✓ Nanophotonique (Club Nanophotonique)
- ✓ Diagnostic Optique et Photonique (Club CDOP)
- ✓ Horizons de l'Optique (Club Horizons)
- ✓ Photonique et Sciences du Vivant (Club PSV)
- ✓ Photonique et Imagerie Optique (Club PIO)
- ✓ Lidar (Club LIDAR)
- ✓ Optique et Micro-ondes (Club OMW)
- ✓ Optique Adaptative (Club JRIOA)
- ✓ Club des Jeunes chercheurs de la SFO (Club JEUNES)

Rejoignez-nous au www.sfoptique.fr

OPTIQUE Normandie, c'est aussi :

- ✓ la table ronde « Science et Société » organisée par le club Jeunes de la SFO avec Anne-Marie LAGRANGE, Etienne KLEIN et Rafaëlle BRILLAUD
- ✓ atelier de la commission « Réussir la Parité en Optique »
- ✓ Rencontres Enseignement de l'Optique et Didactique
- ✓ six ateliers industriels pédagogiques et interactifs animés par nos exposants membres collectifs de la SFO (ALPAO, EXFO, LUMIBIRD, OBSFIBER, SILENTSYS et THORLABS)
- ✓ le paysage industriel du quantique organisé par le club COLOQ, Adrien SIGNOLLES (PASQAL), Tom DARRAS (WelinQ), Peter ROSENBUCH (EXAIL) et Elie GOUZIEN (Alice et Bob)

✓ Les plénières :

- Alberto AMO (PhLAM - CNRS), Marwan ABDOU AHMED (IFSW - Univ. Stuttgart), Camille BRES (EPFL), Anne Marie LAGRANGE (Observatoire de Paris - CNRS), Philippe LALANNE (IOGS - CNRS), Sandrine LEVEQUE-FORT (Univ. Paris Saclay - CNRS), Isabelle REGNER (Univ. Aix-Marseille), Pascal SALIERES (CEA - Paris Saclay), Pascale SENELLART (C2N - CNRS), Real VALLEE (COPL - Univ. Laval).
- ✓ **Les tutoriels du club Horizon :** Juliette MANGENEY (LPA), Alexandra FRAGOLA (ISMO), Christian GRILLET (CNRS, ECL), Pierre-François COHADON (LKB)
- ✓ **Les invités de nos clubs et nos commissions.**



Le Prix Lumières Arnulf Françon

Déposez votre dossier de candidature avant le 31 mars 2024

Les candidatures pour les prix SFO sont ouvertes : Grand Prix Léon Brillouin, Prix Jean Jerphagnon, Prix Fabry-de Gramont. Une nouveauté cette année, lancement du Prix international, Lumières Arnulf Françon récompensant des productions pour la diffusion du savoir réalisées dans un territoire francophone.

Nouvelle Unité d'Enseignement sur la nanofabrication et les nanomatériaux

En plus d'une solide formation théorique les étudiants de NANO-PHOT bénéficient d'un enseignement pratique professionnalisant. Une nouvelle UE, « Nanofabrication et Nanomatériaux » (FAB01) ouvrira au printemps 2024. L'objectif est d'acquérir des connaissances de base et de donner une vue d'ensemble des techniques de nanofabrication actuelles (lithographie optique ou électronique, synthèse chimique, auto-assemblage, fonctionnalisation des surfaces...). Les étudiants seront formés à travailler en environnement réel dans une salle blanche pédagogique dédiée unique en France. Les principales connaissances et compétences associées seront :

- Connaissances basiques en physique et en chimie, liées aux techniques de nanofabrication.
- Compétences expérimentales :
 - . Utiliser un microscope électronique et réaliser une lithographie
 - . Synthétiser des nanoparticules colloïdales
 - . Caractériser de manière basique des colloïdes
 - . Choisir la bonne technique de nanofabrication en fonction du substrat, du design ou de la résolution visée
 - . Travailler aisément en environnement propre

L'UE sera ouverte aux étudiants de master et aux étudiants ingénieurs de l'UTT.



Photolithographie suivie d'une fonctionnalisation de surface permettant l'intégration sélective de boîtes quantiques semi-conductrices émettrices de lumière, $912 \mu\text{m} \times 570 \mu\text{m}$.

H. Gaudin, L. Herry et C. Vezy

<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acsanm.3c00778>

PARTENARIAT AVEC L'ASIE

Un partenariat solide et pérenne en France et à l'étranger permet aux étudiants d'avoir de nouvelles expériences et de développer leur réseau professionnel. L'Asie constitue un fer de lance de la stratégie internationale. Quelques exemples significatifs :



- **Indian Institute of Technology, Jodhpur (IITJ), Inde**

Un accord de double diplôme est en cours entre l'IITJ et l'UTT. Ankur Gupta, doyen des relations internationales et professeur à l'IITJ est fortement impliqué. Avec l'UTT, son équipe

développe des capteurs de gaz flexibles basés sur des nanomatériaux à base de ZnO.

Prof. Gupta (IITJ) rencontrant les étudiants de master de NANO-PHOT

- **Nanyang Technological University (NTU), Singapour**

Renaud Bachelot, directeur de NANO-PHOT, est en délégation CNRS à Singapour au laboratoire CINTRA (CNRS, Thales, NTU) jusqu'en août 2024. Ce séjour permettra de renforcer les collaborations avec NTU, pour permettre aux étudiants de l'UTT d'y passer un semestre, et avec des pays proches tels que l'Indonésie et la Thaïlande.

- **Mumbai University (MU), Inde** (cf. « Actualité »)

Actualités

- Accord-cadre signé entre l'UTT et l'Université de Mumbai cf. <https://www.freepressjournal.in/education/in-a-first-mumbai-university-ties-up-with-french-university-for-dual-degree>.

- **NANO-PHOT a participé au salon SAMS « Salon des Masters et MS »** à Paris le 27 janvier 2024.

CHIFFRES

EN JANVIER 2024,

47 ÉTUDIANTS :

8 M1, 15 M2, 24 PHD STUDENTS

18 UNITÉS D'ENSEIGNEMENT

MASTER, 100% ENSEIGNÉES

EN ANGLAIS

29 PARTENAIRES ACADÉMIQUES

ET INDUSTRIELS

AGENDA

- **Organisation à l'UTT d'un workshop international « Nanophotonics »**
19 - 22 Février 2024

- **Nouvelle école d'été à l'UTT, 15 - 17 mai 2024 sur le sujet « Quantum hardware for quantum technologies »** dans le cadre du projet européen DigiQ: **digitally enhanced quantum technology master**

- **NANO-PHOT participera activement à la conférence META24**

au Japon en Juillet

<https://metaconferences.org/META24/index.php/META/index>

- **Titulaire d'une bourse Fulbright, Kevin Kim, étudiant en thèse, partira en Février au A.J. Drexel Nanomaterials Institute, Philadelphia, PA USA, pour une durée de 4 mois**

CONTACT

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

En bref

VitaDX lauréat du programme Pfizer Health Care Hub !

VitaDX, membre de Systematic a été sélectionnée par Pfizer et WILCO pour intégrer le « Pfizer Health Care Hub » en France. VitaDx fait partie des 5 startups qui bénéficieront de 9 mois d'accompagnement sur-mesure mis en place par Pfizer et Wilco. Bravo VitaDX !.

AGENDA

■ WHAT'S ON C2N
7 mars 2024,
10 Bd Thomas Gobert,
91120 Palaiseau
(9h30 - 11h30)

■ WHAT'S ON Horiba,
4 avril 2024
14 Boulevard Thomas
Gobert, Pass.
Jobin-Yvon, 91120 Palaiseau
(9h30 - 11h30)

www.systematic-paris-region.org/evenements/

CONTACT

Vous souhaitez rejoindre le Hub Optics & Photonics Systematic ?
Une question ?
Un renseignement ?



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

[SEDI ATI Fibres Optiques]

Une collaboration avec le CSL et l'ESA pour une mesure du CO₂ dans l'atmosphère !

SEDI.ATI
fibres optiques

« En collaboration avec le CSL et l'European Space Agency, SEDI-ATI Fibres Optiques a participé au projet CO₂M (Copernicus Anthropogenic Carbon Dioxide Monitoring)

ayant pour objectif de mesurer le taux de CO₂ dans l'atmosphère terrestre, détecter les points chauds émetteurs et évaluer l'impact des variations des émissions par rapport aux objectifs de réduction des émissions de CO₂.

SEDI ATI Fibres Optiques, a travaillé sur deux appareils, CO₂I et CLIM, pour lesquels son savoir-faire et son expérience des environnements extrêmes a permis de fournir des assemblages sur-mesure à base de fibre optique. » Bravo SEDI ATI Fibres Optiques !
(Source : SEDI ATI Fibres Optiques, LinkedIn)

[AMS Technologies]

AMS Technologies acquiert la société neoLASE, société pionnière dans la fabrication de laser à semi-conducteurs !

L'intégration de neoLASE par AMS Technologies offre des possibilités d'innovations dans la fourniture de solutions photoniques. En effet, NeoLASE est spécialisée dans les technologies lasers. Ainsi, en s'appuyant sur le portefeuille de partenaires technologiques et la base de clients d'AMS Technologies, le groupe fusionné proposera désormais des assemblages en espace libre et à base de fibres, offrant ainsi un "banc de travail étendu" à ses clients en Europe. Cette initiative représente une extension stratégique des services, offrant des solutions complètes depuis le composant jusqu'à l'assemblage !
(Source : AMS Technologies, LinkedIn).

[PhotonHub]

Le « Demo Centre PhotonHub », une opportunité pour les entreprises Européennes



PhotonHub Europe joue le rôle d'intermédiaire entre les PME européennes et l'écosystème européen de fournisseurs de formation en photonique, comprenant plus de 50 centres de compétences de fournisseurs de soutien technologique PhotonHub à travers l'Europe. Ensemble, les partenaires de PhotonHub couvrent ainsi une large gamme de technologies photoniques.

Par exemple, les centres d'expérience PhotonHub proposent des programmes au cours desquels les participants reçoivent une formation pratique sur des technologies clés basées sur la photonique.

Si vous êtes déjà engagé dans l'innovation photonique et que vous avez besoin d'approfondir ou d'introduire les compétences et le savoir-faire en interne, n'hésitez pas à vous inscrire ici : [https://ecosystem.photonhub.eu/trainings/?filter_training_type\[\]=1&filter_training_type\[\]=2&gen](https://ecosystem.photonhub.eu/trainings/?filter_training_type[]=1&filter_training_type[]=2&gen) (Source : www.photonhub.eu)

Les enjeux de la surveillance de l'espace



© ArianeGroup Holding

Avec la multiplication des activités spatiales, la surveillance de l'espace est devenue un enjeu stratégique primordial. Cette thématique était au cœur de la journée PHAROS du 7 décembre 2023. Organisée par ALPHA-RLH et Aerospace Valley dans les locaux d'ArianeGroup à Saint-Médard-en-Jalles, elle a rassemblé 70 participants.

Des présentations étaient au programme de la matinée avec Safran Data Systems, ArianeGroup, Thales Alenia Space, Loft Orbital, Look Up Space, CS Group, le CNES, l'ONERA, le Commandement de l'Espace, Aerospacelab ou encore la Chaire Défense & Aérospatial de Sciences Po Bordeaux. Ces conférences étaient axées sur 3 thématiques : la navigation, la gestion des débris spatiaux, la surveillance de l'espace et la souveraineté.

L'après-midi a été consacré à des ateliers et à la visite du système Helix, service d'ArianeGroup dédié à la surveillance de l'espace notamment de tout type de satellites, sur toutes les orbites, grâce à un réseau de trente stations de surveillance réparties dans le monde. Helix intègre dorénavant de nouvelles capacités (téléométrie laser à sécurité oculaire et imagerie) afin d'enrichir en permanence le catalogue de plusieurs milliers d'objets spatiaux. Il est aujourd'hui le plus grand réseau privé européen de télescopes.

Lancement de la première école d'été internationale de la Photonique

Porté par ALPhANOV, le projet TALENTS Photonique Nouvelle-Aquitaine est l'initiative d'un consortium composé du pôle de compétitivité ALPHA-RLH, d'ALPhANOV et d'industriels de la photonique : Amplitude Laser, TOPTICA Photonics et Exail.

Dans le cadre de ce projet, la première école d'été internationale de la Photonique aura lieu du 8 au 12 juillet 2024 à Bordeaux.

La « Photonics TALENT Summer School » rassemblera le monde universitaire et les industriels, offrant ainsi aux étudiants européens en Master et aux doctorants l'opportunité d'explorer les recherches à la pointe de l'innovation dans des domaines stratégiques et révolutionnaires de la photonique.

Elle abordera notamment le développement de sources laser de pointe, l'intelligence artificielle pour la fabrication de laser et l'industrie 4.0, les systèmes laser ultrarapides, les technologies quantiques et la science attoseconde. Vous êtes étudiant ou doctorant ? Déposez votre résumé/ lettre de motivation en scannant le QR code ci-contre.

L'automatisation de la production photonique : apports, enjeux et défis

C'est dans les locaux de notre adhérent ISP System, concepteur d'équipements de précision dans les Hautes-Pyrénées, que s'est déroulée le 16 janvier 2024 une journée dédiée à l'automatisation de la production photonique. Elle a rassemblé 40 participants membres du pôle.



Des conférences et des échanges ont permis d'aborder les défis auxquels sont confrontés les entreprises de la filière photonique française dans un contexte de croissance de la production et de concurrence internationale, mais également de proposer des solutions dans le but d'améliorer les process tout en limitant les coûts.

Afin de matérialiser ces solutions d'industrialisation par des cas pratiques, ISP System a invité les participants à assister à des démonstrations d'une machine automatique de micro-assemblage et d'un nouveau procédé de frittage de particules d'argent.

AGENDA

■ **Rencontres du financement et de la transmission des entreprises innovantes**
7 mars à Bordeaux

■ **Laser World of Photonics China**
20 au 22 mars à Shanghai

Tous les événements sur
www.alpha-rlh.com

Nouvel adhérent :



STMicroelectronics est l'un des tout premiers acteurs mondiaux du secteur économique de la production de semi-conducteurs. Elle fournit des semi-conducteurs innovants à des clients dans tous les secteurs d'application de l'électronique.

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.

AGENDA

Nos prochains rendez-vous :

■ **Business Meeting
La Photonique avec l'ONERA**
29 février 2024 - Palaiseau

■ **SPIE Photonics Europe**
7-11 avril 2024 - Strasbourg

■ **Assemblée générale**
13 mai 2024 - Paris

■ **Business Meeting
La Photonique
pour l'Agriculture**
31 mai 2024 - Rennes

■ **French Photonics Days**
15 - 16 octobre 2024
Besançon

■ **Business Meeting
La Photonique avec le CNRS**
Novembre 2024 - Paris IDF

CONTACTER
PHOTONICS FRANCE

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

SPIE Photonics Europe



SPIE Photonics Europe, organisé par SPIE en partenariat avec Photonics France, se déroulera du 7 au 11 avril 2024 à Strasbourg. Rejoignez-nous au Palais de la Musique et des Congrès pour ce grand rendez-vous de la photonique en France.

L'évènement rassemble dans un environnement dynamique une exposition, des conférences et des événements spéciaux. C'est l'occasion de nouer des contacts avec des acheteurs et des organismes de recherche de toute l'Europe qui sont à la recherche des meilleures technologies pour réaliser leurs prochains projets. Des conférences techniques présenteront les nanosciences et les sciences quantiques, l'imagerie optique et la détection, les lasers et l'optique non linéaire, la biophotonique et les applications de la technologie photonique.

L'exposition de SPIE Europe se tiendra les 9 et 10 avril 2024. Tous les adhérents de Photonics France bénéficient d'un **tarif préférentiel** pour louer un stand.

Pour y participer, contactez, sans tarder, le service communication de Photonics France qui centralise les inscriptions : communication@photonics-france.org

Un kit communication pour l'emploi en photonique

Photonics France vient de mettre en ligne un kit communication sur les métiers et des formations en photonique. Il est mis à disposition des promoteurs de la filière.



La filière photonique en France est en plein développement avec plus de 1 200 entreprises et 2 000 opérateurs et techniciens recrutés chaque année. Pourtant, les formations professionnelles spécifiques de niveau Bac à Bac +3 (Bac pro, BTS, BUT) jusqu'aux cursus d'ingénieurs et de doctorants peinent à se développer et à se faire connaître.

Pour faciliter leur promotion, Photonics France a rassemblé un ensemble de ressources pour valoriser les formations et métiers photoniques lors de salons, d'interventions scolaires, de création d'offres d'emploi et bien d'autres situations.

Le kit s'adresse à toute personne désirant présenter facilement la photonique à des jeunes en recherches de formation, à leurs prescripteurs ou à des adultes en reconversion : industriels, scientifiques, enseignants, chefs d'entreprise, intervenant en milieu scolaire, animateurs de salon...

Le kit communication est accessible sur le site <https://www.orientation-photonique.org> dans la rubrique « Outils de communication ».

Photonics PhD Days : l'entrepreneuriat à portée de main !



Les Photonics PhD Days 2024 ont rencontré un franc succès, faisant ainsi un pas de plus vers l'ambition de devenir un événement incontournable pour les doctorants en photonique. Pour cette 3^e édition organisée à

Lannion (22) par Photonics Bretagne, Anticipa, l'ENSSAT et l'Institut Foton, l'aspect international a pris une ampleur significative avec pas moins de 7 nationalités différentes représentées. Des pitches de thèses captivants, des conférences sur les divers programmes de soutien et de financement accessibles sur le territoire, des success stories inspirantes, des rencontres en One to One avec des entrepreneurs, et des visites d'entreprises photoniques locales - Oxxius, Lumibird et Photonics Bretagne - constituaient le programme de ces 3 jours. Parallèlement, un workshop passionnant a offert aux doctorants l'opportunité de créer des start-up fictives et pitcher leurs projets devant un jury. L'engagement et le professionnalisme dont les doctorants ont fait preuve, ont beaucoup impressionné le jury. Une qualité de travail et une cohésion de groupe sans doute rendues possibles grâce au cadre exceptionnel face à la mer, et aux nombreux moments de convivialité ponctués par la gastronomie bretonne.

LES FRANÇAIS OMNIPRÉSENTS À PHOTONICS WEST



Photonics Bretagne, comme 22 de ses adhérents - Exail, Cailabs, Le Verre Fluoré, BKtel Photonics, Oxxius, Lumibird, EXFO, HEF Photonics, Leukos, Silentsys, Thales, Amplitude Laser, Imagine Optic, Data-Pixel, ALPhANOV, ALPhA-RLH, Iriosome, Laser Components, TOPTICA Photonics, OptoSigma, Aerotech, Inc., Vanguard Automation - a exposé à Photonics West à San Francisco. L'occasion de représenter la photonique bretonne sur le Pavillon France et de mettre en avant nos compétences en matière de conception de fibres optiques spéciales, composants et ingénierie biophotonique. Cette expertise française a notamment été saluée par Frédéric Jung, Consul Général de France à San Francisco : « La France est l'un des 5 premiers acteurs mondiaux de la photonique avec plus de 1000 entreprises, un chiffre d'affaires de 20 milliards de dollars et près de 100 000 emplois ».

En bref

- **AMG Microwave**, expert en solutions radars et capteurs, a repris Intercept Trégor, bureau d'études spécialisé dans la conception de circuits radiofréquence pour l'instrumentation. Les produits d'Intercept sont utilisés en astronomie, dans la défense, et embarqués sur des satellites.
- **Photon Lines** intègre les compétences et les équipes de See Fast Technologies. Avec cette acquisition, Photon Lines se positionne en tant que pionnière dans le développement de logiciels propriétaires d'imagerie multi-acquisition et de contrôle matériel périphérique, le tout associé à du traitement d'images temps réel compatible avec des gros volumes de données. À cela il faut ajouter la configuration complexe de poste de travail multi-support pour la création de bancs d'imagerie complets divers et variés.
- **SILENTSYS**, société concevant des systèmes à très faible bruit couvrant la photonique, les micro-ondes/THz et les modules électroniques, vise le domaine spatial grâce à un projet soutenu par l'ESA, Agence Spatiale Européenne. L'objectif du projet « Compact Optical Frequency Discriminator with low sensitivity to environment » est d'étudier la miniaturisation et l'isolation des technologies Silentsys de stabilisation en fréquence de sources laser pour des applications spatiales embarquées.

AGENDA

- **OFC**
24 - 28 mars, San Diego (Etats-Unis)
- **Techno Conférence Quantique**
4 avril, Lannion
- **Photonics Europe**
7 - 11 avril, Strasbourg
- **Business Meeting**
La photonique pour l'agriculture
31 mai, Rennes
- **EPIC Meeting**
fibres optiques spéciales
12 - 13 juin, Lannion
- **AG Photonics Bretagne**
5 juillet, Lannion

CONTACT

cluster@photonics-bretagne.com
www.photonics-bretagne.com

En bref

Rémi Carminati,

Directeur Général de l'Institut d'Optique, physicien à l'Institut Langevin et professeur à l'ESPCI Paris - PSL, a été nommé au grade de chevalier de l'ordre national du Mérite. Félicitations !

Antoine Browaeys,

directeur de recherche CNRS au Laboratoire Charles Fabry, fait en 2023 son entrée à l'Académie des sciences dans la section Physique. Dix-sept autres scientifiques font également parti de ce nouveau cru d'Académiciens et Académiciennes.

AGENDA DE LA FORMATION CONTINUE

■ EF13

Acquisition d'images avec une caméra
Du 27/02 au 29/02/2024

■ EF2

Bases de l'optique
Du 12 au 15/03/2024
et du 26 au 29/03/2024

■ SC19

Vision industrielle
Du 18/03 au 20/03/2024

■ SC7

Mesure de front d'onde
Du 21/03 au 22/03/2024

■ EF4

Infrarouge thermique : choix et utilisation
Du 02/04 au 05/04/2024

■ SC9

Systèmes optiques d'imagerie
Du 22/04 au 26/04/2024

Tél. : 01 64 53 32 15

Plus sur :
www.fc.institutoptique.fr

CONTACT

Clémentine Bouyé, responsable de la communication

clementine.bouye@institutoptique.fr

Une journée de célébration à Saint-Étienne

L'antenne stéphanoise de l'Institut d'Optique fêtait en 2023 ses 20 ans. À cette occasion, une journée de célébration a eu lieu le 25 janvier 2024. Retour sur un événement joyeux, l'occasion de faire le bilan pour mieux se projeter vers l'avenir.



Photo ©3WPointCOM

En 2003, l'Institut d'Optique installait une antenne de son école à Saint-Etienne sur le tout nouveau campus Manufacture de l'Université Jean Monnet. Vingt ans plus tard, cette implantation au cœur d'une des régions qui compte le plus en photonique garde tout son sens, comme l'a rappelé Rémi Carminati, Directeur Général de l'Institut d'Optique, en introduction de la cérémonie anniversaire de l'antenne de Saint-Etienne de l'établissement.

Le jeudi 25 janvier dernier, cette cérémonie a rassemblé une centaine de personnes dans les locaux de l'Institut d'Optique. Cet événement a été l'occasion de mettre en valeur la richesse et la variété des projets menés en commun avec les partenaires locaux en recherche, formation et innovation depuis deux décennies. Les participants à l'unanimité ont souligné à quel point les projets passés et les perspectives de collaborations étaient enthousiasmantes.

Des animations « made in Institut d'Optique » ont ponctué la cérémonie : une exposition intitulée « Phénomènes optiques pour les arts graphiques » issue des travaux de Mathieu Hébert, enseignant-chercheur au laboratoire Hubert Curien (Université Jean Monnet / CNRS / IOGS), une observation du soleil au télescope proposée par Thierry Lépine, également enseignant-chercheur, et pour apporter une touche artistique et poétique supplémentaire, le Laserwave (association étudiante spécialisée dans les show laser) a proposé un show inédit de mapping laser sur la façade du bâtiment de l'Institut d'Optique.

Pour clore cette journée, Alain Aspect, prix Nobel de Physique 2022 et professeur à l'Institut d'Optique, a donné une conférence vulgarisée destinée à l'ensemble de la communauté de l'Université Jean Monnet. Avec plus de 400 participants, cette conférence a été un véritable succès et a rassemblé des publics variés – étudiants, physiciens, biologistes, médecins, personnels administratifs – autour du thème de la physique quantique.

Vif succès pour le speed-meeting « Jeunes filles et femmes scientifiques »

L'Institut d'Optique a organisé le 18 janvier 2024 pour la 3^{ème} année consécutive un speed-meeting de rencontres entre des femmes scientifiques et des jeunes filles de la 3^{ème} à la Terminale.

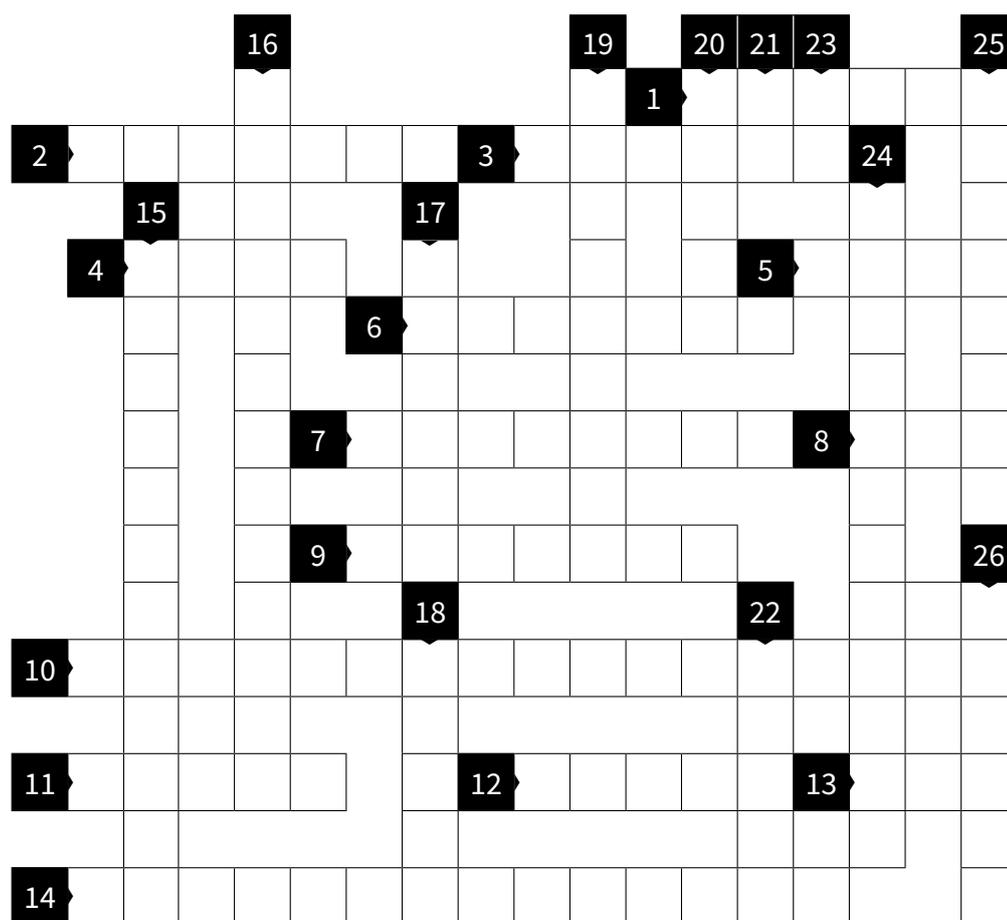
Ce jour-là, 115 jeunes filles ont poussé les portes de l'Institut d'Optique pour découvrir la diversité des parcours de femmes scientifiques. En un peu plus d'une heure, elles ont eu l'occasion d'échanger avec des enseignantes, des chercheuses, des étudiantes, des ingénieures, des entrepreneuses, ... À la fin de l'après-midi, elles ont visité des expériences du Laboratoire Charles Fabry (IOGS / Université Paris-Saclay / CNRS) et du LEnsE (Laboratoire d'Enseignement Expérimental) et sont reparties avec des étoiles plein les yeux.



Photo ©3WPointCOM

MOTS CROISÉS SUR LE THÈME DE LA COLORATION STRUCTURELLE

Par Philippe ADAM



SOLUTION SUR
PHOTONIQUES.COM



- | | | | |
|----|---|----|---|
| 1 | La couleur en est un dans le monde animal, indique souvent un danger | 15 | Source chimique de la coloration animale et végétale |
| 2 | Joli papillon de couleur émeraude | 16 | Cellule pigmentée |
| 3 | Coquille nacrée | 17 | Superbe lépidoptère bleu iridescent |
| 4 | Il sait monter une roue... colorée | 18 | Souvent un infra pour les opticiens |
| 5 | Structure logicielle de colorisation en accès libre | 19 | Message nano-gravé dans la masse, sans encre ni peinture |
| 6 | Livre de Newton (1704) écrit avec et sur les plumes | 20 | Coupe de viande colorée par l'arrangement périodique des fibres |
| 7 | Qualifie la fréquence des motifs réguliers sur un corps, définissant sa couleur | 21 | Infrarouge |
| 8 | En faisceau, permet des gravures très fines | 22 | La couleur observée change quand il change |
| 9 | Un bec et des plumes | 23 | Rouge, orange ont la même fin |
| 10 | Processus de gravure à l'échelle du nanomètre | 24 | Innovation issue de l'observation des propriétés naturelles |
| 11 | Supports de vol, à plumes... ou pas | 25 | Nobel 1908 pour sa méthode de reproduction des couleurs |
| 12 | Ses réflexions sont colorées | 26 | Un des règnes du vivant |
| 13 | C'est comme cela que commence le mimétisme | | |
| 14 | Qualifie un phénomène à l'origine des couleurs | | |

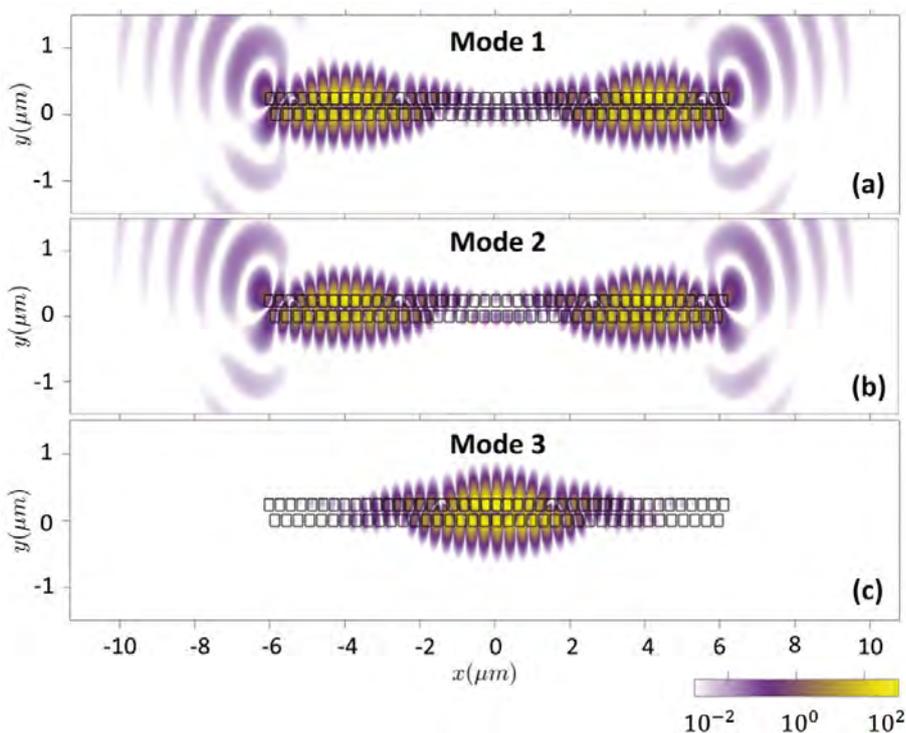
Configuration « magique » dans les moirés photoniques : la preuve par trois !

Bien connu en optique, l'effet de moiré résulte de la superposition de deux réseaux périodiques légèrement différents. Plus spécifiquement, lorsque les deux réseaux sont commensurables, le moiré apparaît comme un réseau infini de « supercellules » de période supérieure à celle des réseaux individuels.

En nanophotonique, ces deux réseaux sont structurés à l'échelle de la longueur d'onde ce qui entraîne une modification significative de la relation de dispersion des modes guidés se propageant dans ces structures. En ajustant la position relative des deux réseaux, il est possible d'obtenir des configurations dites « magiques » permettant de confiner la lumière de façon non conventionnelle. Par exemple dans les moirés 1D infini, ces effets se manifestent lorsque la distance entre les deux réseaux prend des valeurs particulières. Ces distances « magiques » induisent l'émergence de modes optiques présentant des bandes d'énergie à dispersion parfaitement plates. À ces énergies, les photons peuvent être ainsi parfaitement confinés et localisés dans chaque supercellule du réseau moiré périodique.

Une équipe de recherche de l'Institut des Nanotechnologies de Lyon (CNRS, École Centrale de Lyon, INSA de Lyon, Université Lyon I, CPE), s'est intéressée à ce phénomène pour tenter de répondre à la question pratique : serait-il possible d'observer un confinement aussi efficace dans une structure moiré finie et si oui, quelle taille minimum devrait avoir le réseau moiré ?

Ces recherches ont permis d'élucider le phénomène à l'origine des bandes plates à partir d'un modèle analytique de type liaisons fortes dont les résultats ont été confirmés par des simulations numériques. Nous montrons ainsi que la configuration magique a pour effet d'annuler le couplage entre les supercellules. Les calculs révèlent que lorsque le moiré est réduit à une seule supercellule, la configuration magique n'a plus d'impact sur le confinement du



Cartes d'intensité (E_z) des modes d'une cavité à trois supercellules à la distance magique. (a) Mode à perte 1, (b) mode à perte 2, et (c) mode quasi-BIC 3. Les modes 1 et 2 sont localisés sur les supercellules de droite et de gauche. Le mode 3 est confiné dans la supercellule du milieu et quasiment sans perte.

champ électromagnétique. En revanche, lorsque trois supercellules sont connectées en configuration magique, la lumière peut être parfaitement localisée et confinée dans la cellule centrale. Le mode correspondant a un facteur de qualité supérieur à 10^6 et présente toutes les caractéristiques d'un état quasi lié dans le continuum (« Bound state In the Continuum » ou BIC).

Ce mécanisme de confinement pourrait servir à diverses applications qui demandent une forte exaltation des interactions lumière matière, comme la récupération d'énergie, l'optique quantique, les pinces optiques, les

systèmes de détection ou les microlasers. ●

RÉFÉRENCE

C. Saadi, H. S. Nguyen, S. Cueff, L. Ferrier, X. Letartre, S. Callard, "How many supercells are required for unconventional light confinement in moiré photonic lattices?" *Optica* **11**, 245 (2024). <https://doi.org/10.1364/OPTICA.498089>

CONGRÈS
DE LA



01/05 juillet 2024

OPTIQUE

NORMANDIE

VENEZ À ROUEN

2024



www.sfoptique.org

rubrique congrès OPTIQUE



TÉMOIGNAGE D'ENTREPRENEUR

Bruno Desruelle, Muquans

Photoniques s'entretient avec Bruno Desruelle, Cofondateur de Muquans, entreprise pionnière dans le domaine des technologies quantiques

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

Lorsque j'étais en classes préparatoires à Lille, nous avons eu la chance de réaliser des travaux pratiques d'Optique particulièrement didactiques, qui ont fait naître en moi une véritable passion pour l'étude de la lumière. J'ai naturellement pris la décision d'intégrer SupOptique à la fin de ma prépa. J'ai eu alors l'immense privilège de rencontrer Alain Aspect à l'institut d'Optique et de démarrer une collaboration avec lui dans le groupe d'optique atomique qu'il venait de monter. À la suite de mon diplôme d'ingénieur, j'ai poursuivi par une thèse sous sa direction visant à développer une expérience de condensation de Bose Einstein. Cette thèse a été d'une part une aventure extraordinaire, d'autre part elle m'a permis d'apprendre énormément, en tirant un bénéfice maximum de la supervision d'Alain.

APRÈS UNE THÈSE SUR UN SUJET FONDAMENTAL, VOUS SOUHAITEZ ALORS ÉVOLUER VERS LE MONDE DE L'ENTREPRISE

Ma thèse portait sur un sujet fondamental et, après l'obtention de mon doctorat en 1999, j'ai souhaité m'orienter vers des activités plus appliquées. Je souhaitais découvrir le monde de l'entreprise, en particulier le domaine des hautes technologies. Alain Aspect m'a alors proposé de monter une entreprise visant à développer des solutions laser pour les atomes froids. Il a ainsi organisé une rencontre avec Hervé Arditty, formidable entrepreneur

qui était alors PDG de Photonetics et qui a créé à la suite iXblue, pour m'accompagner dans ce projet, mais je ne me sentais pas encore prêt à monter une entreprise. J'ai donc décidé de rejoindre Corning pour travailler sur le développement d'amplificateurs pour les télécoms optiques. Ça a été une période très intense, avec une croissance du secteur très forte, des propositions d'embauche complètement folles... Jusqu'à l'éclatement de la bulle des télécommunications, l'arrêt de l'activité et mon licenciement. J'ai heureusement réussi à rebondir rapidement en rejoignant Thales Optronique où j'ai participé au développement de différents systèmes optroniques pour les applications militaires. Je n'y suis resté qu'une année mais j'en garde d'excellents souvenirs et ce passage chez TOSA aura été une passerelle très efficace pour la suite de ma carrière.

VOUS REJOIGNEZ ALORS LA DGA

J'ai effectivement rejoint la DGA en 2003. J'ai commencé par m'occuper d'activités dans le domaine de la guerre optronique et des armes laser avant de rencontrer en 2005 Pierre Guillon, conseiller scientifique du délégué général pour l'Armement, qui venait de créer la Mission pour la Recherche et l'Innovation scientifique (MRIS, ancêtre de l'AID). Pierre m'a proposé de prendre la responsabilité du domaine scientifique photonique au sein de cette nouvelle structure. Mon job consistait à identifier les technologies photoniques les plus prometteuses pour les applications de Défense et à accompagner les meilleurs laboratoires dans leurs projets

de recherche au travers de contrats de recherche ou de thèses de doctorat. J'ai beaucoup apprécié ce passage à la MRIS qui m'a permis de côtoyer des scientifiques de très haut niveau et de les aider à faire progresser leurs recherches avec des moyens satisfaisants, ce qui est très gratifiant.

MALGRÉ CES CONDITIONS DE TRAVAIL TRÈS FAVORABLES, VOUS PRENEZ LA DÉCISION DE VOUS LANCER DANS UN PROJET ENTREPRENEURIAL TRÈS INNOVANT

En effet, en décembre 2009, je reçois la visite de 2 anciens camarades de thèse, Philippe Bouyer du Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique et Arnaud Landragin du SYRTE. Arnaud et Philippe étaient tous les deux chercheurs au CNRS, et experts en capteurs inertiels basés sur la manipulation d'atomes froids par laser. Ils venaient de déposer un brevet sur un gravimètre quantique et avaient l'intention de monter une entreprise pour le commercialiser. Philippe et Arnaud me présentent alors leur projet qui réveille en moi des souvenirs de thèse et cette passion pour la belle Physique. Ils me présentent également une étude de marché préliminaire qui me convainc de la possibilité de trouver des débouchés, et de la viabilité économique du projet d'entreprise. À la fin de la réunion, je leur annonce que je suis motivé pour rejoindre le projet et prendre la direction de l'entreprise. Je démissionne donc de la DGA en 2010 pour me consacrer pleinement à la préparation du projet, et nous prenons la décision de créer l'entreprise à

Bordeaux où Philippe Bouyer était en train de créer le LP2N à l'Institut d'Optique d'Aquitaine.

VOUS DÉCOUVREZ SUR BORDEAUX UN ÉCOSYSTÈME TRÈS FAVORABLE AU DÉVELOPPEMENT DE L'ENTREPRISE

Absolument. Pour commencer, ALPHANOV nous a offert des conditions d'incubation incroyables, en prenant par exemple mon salaire en charge pendant 1 an et en m'offrant un espace de travail. Nous avons par ailleurs bénéficié d'un soutien du Conseil Régional d'Aquitaine, d'un accompagnement par le technopôle Unitec et l'Incubateur Régional d'Aquitaine. Ensuite, j'ai pu interagir à Bordeaux avec de nombreux entrepreneurs en Photonique expérimentés (Nicholas Traynor d'ALS, Eric Mottay d'Amplitude, Philippe Métivier d'Eolite...) qui m'ont beaucoup aidé dans le montage du projet.

Grâce à tout cela, notre projet d'entreprise a rapidement progressé et nous avons créé Muquans début 2011, puis concrétisé les premiers recrutements et démarré notre programme de R&D en septembre 2011.

QUELS SONT LES CHALLENGES À RELEVER POUR COMMERCIALISER UN PRODUIT AVEC UN TEL NIVEAU DE TECHNOLOGIE ?

La conception d'un instrument de très haute technologie comme un gravimètre à atomes froids représente un défi technologique considérable et nous avons dû surmonter d'innombrables difficultés pour développer une version industrielle de ce produit. C'est un système qui fait appel à un grand nombre de technologies différentes : enceinte à vide, système laser intelligent, optique de précision, contrôle de champs magnétiques, mécanique et opto-mécanique, électronique bas bruit, informatique temps réel, micro-onde à très faible bruit de phase. Les compétences requises pour développer un tel système sont nombreuses sachant de plus que chacune de ces technologies doit être poussée à ses limites ultimes. Prenons l'exemple du système laser : celui-ci doit générer deux fréquences indépendantes, avec une largeur de

raie de l'ordre de 10 kHz, connues avec une exactitude de 100 kHz, et doit présenter une accordabilité rapide avec des sauts de fréquence de l'ordre de 1 GHz en moins d'1 msec. Par ailleurs, pendant la phase d'interrogation des atomes, les 2 fréquences doivent être verrouillées en phase avec un bruit de phase inférieur à 20 mrad. Rajoutons à cela des contraintes industrielles pour que ce système soit transportable, et facile d'utilisation tout en fonctionnant dans des conditions expérimentales difficiles, et vous avez une bonne idée de la difficulté du problème à affronter.

QUEL A ÉTÉ LE TEMPS NÉCESSAIRE POUR DÉVELOPPER LE PREMIER SYSTÈME ?

Fort heureusement, nous ne sommes pas partis de zéro car Muquans est une spin-off de 2 laboratoires académiques, le Syrte et le Laboratoire Charles Fabry, disposant d'une très grande expertise dans le domaine. Nous avons ainsi pu bénéficier des 20 années d'expériences acquises par les équipes de ces laboratoires sur les capteurs inertiels à atomes froids, et leur apport pour la réussite de notre projet a été considérable. Nous avons ainsi réussi à développer ●●●

Gravimètre quantique absolu déployé au sommet de l'Etna pour la surveillance du volcan.



un prototype de première génération en 2 ans environ avec une première validation convaincante fin 2013. La livraison de la première unité série a été réalisée fin 2015. Il s'agissait à cette époque d'un gravimètre de laboratoire et nous savions qu'il fallait encore améliorer le système pour produire une version de terrain. Il nous a fallu encore 4 ans pour développer cette version et les premières unités ont été livrées à la fin de l'année 2019. Au final, c'est donc un développement qui s'est étalé sur une dizaine d'années.

QUELLE EST LA SITUATION CONCURRENTIELLE DANS LE DOMAINE DES CAPTEURS INERTIELS PAR ATOMES FROIDS ?

Nous n'avons pas vu à ce jour de produit commercial concurrent mais différentes sociétés nous talonnent et nous avons connaissance de plusieurs projets en cours. Nous restons donc à ce stade les seuls à maîtriser l'ensemble de la chaîne pour commercialiser des systèmes basés sur une technologie aussi innovante. Ce serait toutefois une grosse erreur de sous-estimer nos concurrents et nous poursuivons notre effort de R&D pour maintenir notre avance.

AVEZ-VOUS PARFOIS DOUTÉ FACE AUX NOMBREUX DÉFIS À RELEVER ?

Comme je l'ai dit tout à l'heure, nous avons dû affronter une myriade de difficultés et les déceptions ont été nombreuses. Il m'est donc arrivé de douter... Mais jamais très longtemps. J'ai eu la chance de m'appuyer sur une équipe de collaborateurs formidablement compétents et incroyablement motivés. Chacun a su faire preuve d'une grande combativité pour trouver les solutions aux problèmes rencontrés car tout n'a pas marché du premier coup, loin de là. L'aspect financier a été également une source de stress car le développement de l'instrument a pris plus de temps que prévu et nous avons pris du retard sur notre Business Plan. Il a donc fallu trouver des solutions pour continuer à financer l'activité.

D'un point de vue émotionnel, je dois reconnaître que ce projet n'a pas été un long fleuve tranquille et il a fallu être solide nerveusement pour réussir à traverser les moments difficiles.

VOUS AVEZ ÉTÉ PRÉCURSEURS DES TECHNOLOGIES QUANTIQUES

Effectivement, lorsque nous avons démarré, il n'y avait qu'une petite poignée de sociétés travaillant sur les technologies quantiques et nous avons fait partie des pionniers dans le domaine. Je pense pouvoir dire que nous avons été les premiers à montrer qu'il était possible d'utiliser des instruments basés sur la manipulation quantique d'atomes refroidis de façon opérationnelle.

Notre travail a sans doute contribué à faire émerger la vague de startups dans les technologies quantiques que l'on observe aujourd'hui, et c'est incroyable de voir à quel point le domaine s'est développé au cours des 10 dernières années. Je pense qu'il faudra encore plusieurs années pour voir l'impact industriel de ces projets car ces technologies demandent un effort de développement très significatif. Je suis curieux de voir ce qui va se passer.

COMMENT S'EST DÉVELOPPÉE L'ENTREPRISE ?

Au cours de la vie de l'entreprise, plusieurs opportunités sont apparues, notamment avec le développement de notre horloge atomique et les solutions de transfert de fréquence sur les fibres optiques du réseau RENATER dans le cadre du projet REFIMEVE. Nous sommes maître d'œuvre industriel de ce projet depuis 2014, en collaboration avec le LPL et le SYRTE, et ce réseau est maintenant opérationnel.

Par ailleurs, toutes les technologies lasers développées pour nos gravimètres peuvent trouver des applications dans d'autres domaines. Nous livrons par exemple des sources laser à l'entreprise Pasqal, qui développe des processeurs quantiques basés sur la manipulation d'atomes froids. J'ai d'ailleurs participé au lancement de cette société très prometteuse dont la technologie se base

sur les recherches menées par Antoine Browaeys et Thierry Lahaye à l'Institut d'Optique, et qui a connu un essor absolument incroyable depuis sa création. Nous travaillons également avec le CNES qui a beaucoup aidé Muquans pour la spatialisation de nos technologies laser et initié le développement d'un gravimètre spatial. Nous participons ainsi au projet CARIOQA qui vise à lancer un accéléromètre quantique en orbite basse à l'horizon 2030.

Toutes ces activités nous ont permis d'atteindre l'équilibre financier rapidement et Muquans a été bénéficiaire dès 2016, avec un fort niveau d'exportation (Chine, US,...). Afin de poursuivre notre développement, nous avons souhaité nous adosser à un grand groupe industriel. Nous avons identifié depuis plusieurs années iXblue comme un repreneur idéal pour nous accompagner dans notre projet de développement d'entreprise, et Muquans a fusionné en 2021 avec iXblue. Avec un recul de 2 ans, je dois dire que cette fusion a été une opération extrêmement positive pour nos activités et tous les bénéfices que nous envisagions se sont concrétisés. iXblue nous a permis d'accéder à une gamme de technologies absolument uniques, à des méthodes et des outils industriels de tout premier plan et un réseau commercial extrêmement dynamique partout dans le monde. iXblue a été depuis rachetée par le groupe Gorgé pour donner lieu à la société Exail. Depuis le début de l'année, Exail m'a proposé de reprendre la stratégie photonique du groupe, ce qui représente une opportunité incroyable et un défi formidablement motivant. Le groupe dispose en effet d'un arsenal de technologies photoniques absolument uniques : une activité sur les fibres spéciales à Lannion, les solutions de modulation à Besançon, les capteurs quantiques et les systèmes photoniques à Bordeaux. Le potentiel de développement est donc gigantesque. Nous avons identifié de nombreuses opportunités pour poursuivre notre croissance et c'est un chantier absolument passionnant. ●



Entretien avec Frédérique de Fornel

**Directrice de recherche au CNRS,
spécialiste de la microscopie en champ proche optique**

COMMENT AVEZ-VOUS DÉCOUVERT LA PHYSIQUE ?

J'ai toujours voulu faire de la recherche en physique, depuis le lycée. C'est un choix personnel. Après le lycée, j'ai fait un choix particulier en décidant d'aller étudier en faculté plutôt que d'intégrer des classes préparatoires. Je voulais apprendre et appréhender les concepts de la physique et des mathématiques. J'ai suivi mon cursus universitaire à l'université de Limoges.

COMMENT VOUS ÊTES-VOUS SPÉCIALISÉE EN OPTIQUE ?

Durant ma licence, l'équipe d'optique dirigée par Mme Gaultier Du Marache avait un contrat DGA et avait besoin de quelqu'un pour participer au travail de l'équipe durant quelques mois. J'ai pu remplir cette fonction avec intérêt et plaisir. Quelque temps ensuite, Jacques Arnaud chercheur au Bell Labs s'installait à Limoges pour monter une équipe de recherche sur les fibres optiques. On est venu me proposer dès le début de l'année du DEA de réaliser mon stage de DEA sous sa direction. Une thèse dans le même domaine a débuté ensuite. Un point fort à Limoges était d'avoir une culture scientifique très forte à la fois en micro-ondes et en optique.

QUEL ÉTAIT LE SUJET DE VOTRE THÈSE ?

Le sujet portait sur les couplages de modes et les micro-courbures dans les fibres optiques. Sous l'initiative de Paul Facq, nous avons développé un projet autour de l'excitation d'un mode unique dans une fibre optique multimode. L'idée proposée par P. Facq pour exciter de façon efficace un mode unique sur les dizaines de modes d'une fibre multimode consistait à injecter dans la fibre la distribution d'intensité et de phase correspondant au mode sélectionné. Après avoir validé

cette idée, j'ai pu montrer que l'effet des microcourbures sur la propagation de ces modes uniques dépendait directement du spectre des microcourbures et du profil d'indice des fibres étudiées.

VOUS ÊTES ALORS RECRUTÉE AU CNRS

J'ai été auditionnée au concours du CNRS en mai 1981, avant la soutenance de ma thèse. J'ai présenté un projet pour mener des recherches sur le couplage de modes et les composants fibrés à l'IRCOM, dirigé par Y. Garault, qui est aujourd'hui devenu le laboratoire XLIM. À ma grande joie, j'ai été sélectionnée et j'ai ainsi pu démarrer mes activités de recherche dès le mois d'octobre 1981.

COMMENT SE SONT DÉROULÉES VOS PREMIÈRES ANNÉES DE RECHERCHE ?

Les premières années ne se sont pas déroulées comme prévu. Tout d'abord, Jacques Arnaud a quitté Limoges, ceci m'a amenée à faire évoluer mon projet de recherche. J'ai commencé à élaborer un programme numérique pour déterminer les modes des fibres optiques pour différents profils d'indice. Ensuite, mon mari est parti effectuer un post-doctorat à Londres et j'en ai profité pour effectuer un détachement à Southampton dans l'équipe d'Alec Gambling et Dave Payne. J'avais beaucoup travaillé sur les fibres multimodes et j'avais senti l'importance de travailler sur des fibres monomodes. Cette équipe était à la pointe dans ce domaine. J'ai appliqué ma modélisation aux différentes fibres réalisées puis j'ai déterminé analytiquement le couplage par champ évanescent entre ces fibres. En parallèle, j'ai participé à la réalisation de coupleurs puis j'ai mis au point une technique de fabrication de polariseurs à partir de fibres de type « bow-tie ». Pour ceci j'ai exploité la propriété du

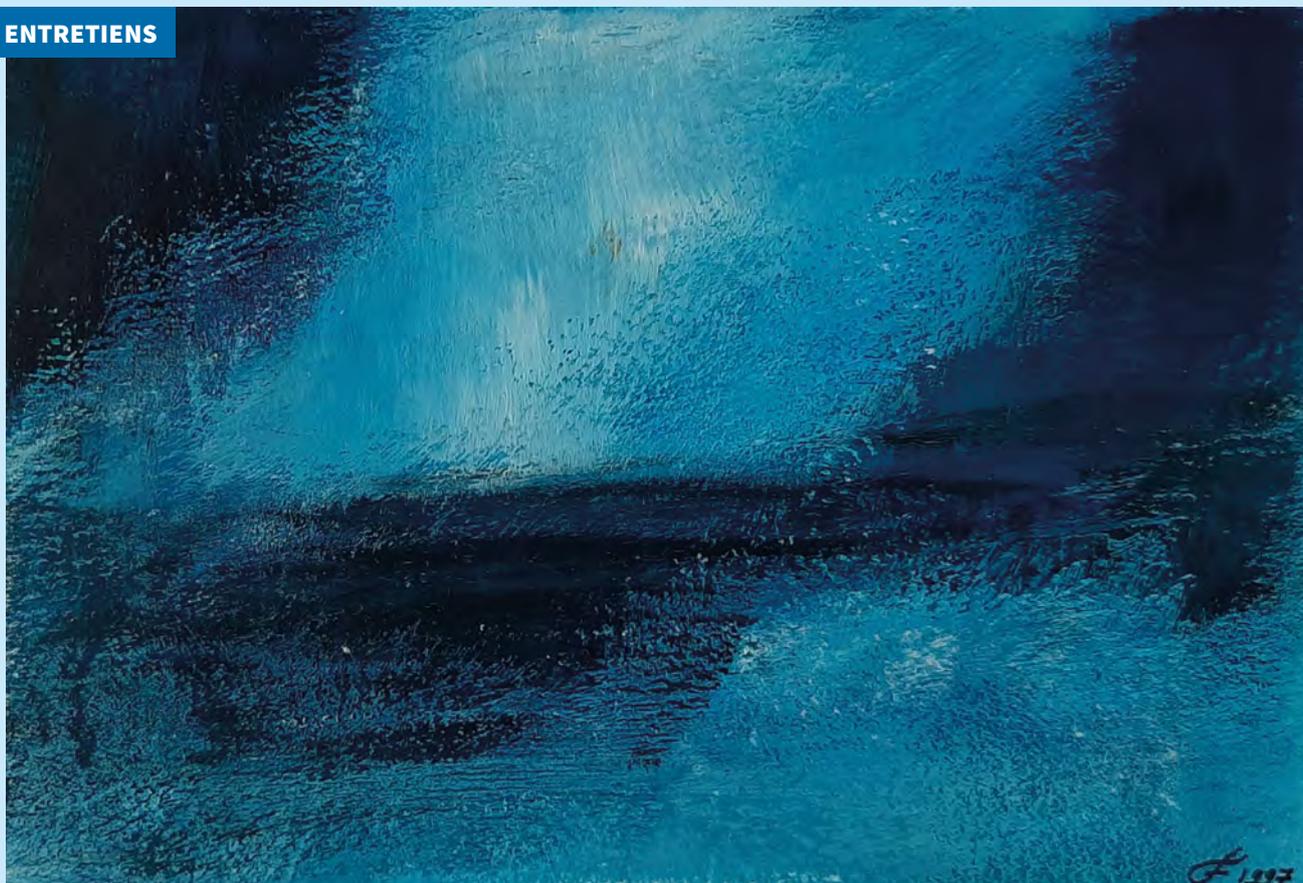
mode fondamental qui n'a pas la même fréquence de coupure suivant sa polarisation. De retour à l'IRCOM en 1984, j'ai développé une plateforme de fabrication de coupleur par chauffage microonde, pour réaliser des multiplexeurs démultiplexeurs modaux. Nous avons pu transférer ce procédé, breveté, à une entreprise. C'est à cette époque que j'ai co-encadré avec Paul Facq mon premier doctorant, Dominique Pagnoux.

POURQUOI DÉCIDEZ-VOUS ALORS DE REJOINDRE L'UNIVERSITÉ DE BOURGOGNE ?

Mon mari avait obtenu un poste de chercheur dans une entreprise pharmaceutique à Dijon. Après une année de congés parental pris après la naissance de notre troisième enfant, j'ai rejoint l'équipe alors dirigée par Jean-Pierre Goudonnet à l'université de Bourgogne. J'ai été séduite par l'idée de travailler sur les plasmons de surface dans cette équipe qui avait une expertise forte dans ce domaine. Ce changement thématique s'est accompagné d'un changement de section CNRS, de la section 08 à la 04.

ET VOUS DÉCOUVREZ ALORS LA MICROSCOPIE EN CHAMP PROCHE OPTIQUE

À cette époque, les microscopies en champ proche connaissent un essor international. L'équipe de Dijon avait une collaboration avec Thomas Ferrell, du Oak Ridge National Laboratory qui avait commencé des travaux dans ce domaine. Nous avons alors développé plusieurs microscopes en champ proche optique dont un sur la base d'un PSTM (photon scanning tunneling microscope) où une fibre amincie vient collecter par effet tunnel optique le champ au voisinage de l'échantillon. Nous avons obtenu nos premières images en 1989.



L'équipe de Daniel Courjon, à Besançon, à une centaine de kilomètres de là, développait une technique de champ proche similaire. Et c'est lors d'une rencontre en 1989 à une conférence que nous nous sommes rendus compte que nous travaillions sur des sujets similaires. Nous avons reçu le prix Fabry de Gramont de la SFO pour nos travaux respectifs sur ce sujet de la microscopie optique en champ proche.

VOUS VOUS INVESTISSEZ ALORS PLEINEMENT DANS CE SUJET DE RECHERCHE

Nous avons continué à faire évoluer nos microscopes. Il fallait fabriquer des pointes de champ proche, étudier le couplage avec la fibre, rechercher les échantillons de référence... Bref, il y avait beaucoup de sujets à défricher. Ces travaux ont été réalisés avec Laurent Salomon dans le cadre de sa thèse. Nous avons étudié le champ proche de réseaux de diffraction et Michel Nevière du Laboratoire d'Optique Electromagnétique à Marseille nous a apporté son expertise pour l'analyse d'images de réseaux. Je connaissais cette équipe de Marseille car Roger Petit fut mon parrain durant mes toutes

Représentation artistique des ondes évanescentes, vignette de l'ouvrage Ondes évanescentes peinte par D. de Fornel.

premières années au CNRS et j'avais « planché » devant les membres de son laboratoire lorsque j'étais rentrée au CNRS.

COMMENT SE SONT DÉROULÉES VOS EXPÉRIENCES PIONNIÈRES SUR L'OBSERVATION DE PLASMONS DE SURFACE ?

Les plasmons de surface ont la propriété d'avoir leur champ électromagnétique fortement exalté à l'interface où ils existent. Ils étaient tout naturellement des objets d'étude pour le PSTM. Avec Laurent Salomon, nous avons détecté et étudié ces plasmons de surface mais avec Paul Dawson, nous avons excité localement un tel plasmon et avons pu étudier sa propagation. Les premières mesures ont été faites avec une technique qui n'est plus utilisée actuellement, car les techniques d'asservissement « shear force » n'étaient pas matures à l'époque, et nous devions asservir à une autre longueur d'onde (voir l'article Photoniques **113**, 32 (2022)).

QUELS ONT ÉTÉ PAR LA SUITE VOS PRINCIPAUX DOMAINES DE RECHERCHE ?

Le sujet du champ proche optique est très riche en soi mais également très riche par les domaines où il peut être étudié. Un sujet qui m'intéressait particulièrement était celui de la cohérence en champ proche. Des mesures en fonction de la cohérence de la source, ont été menées. Jean Jacques Greffet et ses étudiants de l'époque, Anne Sentenac et Rémi Carminati, ont effectué des simulations correspondantes qui ont validé nos observations. Nous avons également travaillé sur les images d'émission de fluorescence, Patrick Chaumet et Adel Rahmani ont développé des modélisations numériques correspondantes. En 1996, après la création de mon équipe, nous avons continué avec Laurent Salomon l'étude de plasmons. Il a ainsi réalisé une très belle étude théorique sur les tamis à photons avec Anatoly Zayats actuellement au King's college à Londres. Je me suis beaucoup intéressée aux composants optiques, par exemple à la génération de seconde harmonique dans des guides de tantalate de lithium ou sur le vieillissement des fibres optiques en milieux sévères,

thèse de Lotfi Berguiga qui a également développé pour les mesures en champ proche un asservissement de type « shear force ». Ceci nous a permis d'étudier au mieux les structures à cristaux photoniques pour la plasmonique ou l'optique intégrée. L'observation de modes de cavité à cristaux photonique, thèse de Davy Gérard a été faite avec une équipe de Lyon, notamment Xavier Letartre, Christian Seassal et Ségolène Callard. À ce moment, Benoit Cluzel a rejoint l'équipe durant sa thèse puis comme membre permanent. Nous avons établi alors une collaboration forte avec le CEA à Grenoble pour travailler sur les guides en silicium et les cavités Si à cristaux photoniques. Nous avons monté un laboratoire de recherche commun, LRC, avec le CEA sur ce sujet. Un sujet qui m'a toujours intéressée est celui de l'interaction entre la sonde de champ proche et l'objet que l'on observe. La question qui se posait ici était la suivante : est-ce qu'un objet de taille nanométrique peut modifier les conditions de résonance d'une cavité ? Nous avons ainsi pu montrer que l'on peut accorder l'émission d'une cavité en jouant sur la position de la sonde. Par la suite, nos microscopes en champ proche se sont vu adjoindre la mesure hyperspectrale, développée dans le cadre de la thèse de Jean Dellinger. Je ne peux citer tous les travaux menés dans mon équipe mais je voudrais rappeler l'observation en champ proche de la refocalisation au travers d'une lentille parfaite et la démonstration en champ proche d'un tapis d'invisibilité. Ces travaux ont été réalisés en collaboration avec Olivier Vanbesien l'IEMN à Lille et Boris Gralak de l'institut Fresnel à Marseille.

VOUS VOUS ÊTES BEAUCOUP IMPLIQUÉE DANS L'ORGANISATION ET L'ANIMATION DE RECHERCHE

Je pense en effet qu'il est important de s'impliquer pour la communauté scientifique en s'investissant dans des activités d'organisation de la recherche. Outre la création de mon équipe (1996),

je me suis impliquée dans le CNU où j'ai effectué 3 mandats. Une activité qui m'a beaucoup plu a été l'animation du GDR Ondes (sous-directeur de 2006 à 2010, directeur de 2010 à 2016). J'admire le travail qu'a fait Daniel Maestre et l'ouverture d'esprit dont il a fait preuve pour monter ce GDR qui se base sur le concept de l'onde, de l'acoustique à l'optique. Dès la conception de ce GDR, un club des partenaires a été créé. J'ai pris 8 brevets au cours de ma carrière et je suis sensible à l'aspect valorisation et aux applications de nos recherches. Cette ouverture vers le monde industriel est bénéfique pour tous et en premier lieu pour les étudiants. Cela a été un honneur de prendre le relai de Daniel Maestre et de Dominique Lesselier en 2010. Cette époque correspond aussi à mon mandat de présidente d'URSI France.

VOUS VOUS ÊTES ÉGALEMENT INVESTIE DANS LA POLITIQUE SCIENTIFIQUE DU CNRS ET DE PLUSIEURS UNIVERSITÉS

En 2016, le CNRS m'a proposé de m'impliquer dans la politique de site. J'ai occupé un poste de DAS à l'Institut de Physique où j'avais en charge la politique de site de l'institut, la CID54 et l'interface Physique-Vivant. En même temps, j'ai été ADSR sur les sites de Grenoble, de Paris Saclay, de Polytechnique et sur celui de l'université de Paris. Cette activité était très intéressante car nous interagissions avec beaucoup d'interlocuteurs, parfois aux avis contraires, afin de faire avancer les projets et de créer des centres universitaires de premier plan. Je me suis investie dans ces missions jusqu'à l'été 2019 durant lequel j'ai pris ma retraite. J'ai poursuivi mon activité en tant que chargée de mission à l'INP jusqu'en 2021.

VOUS AVEZ ÉGALEMENT UNE FORTE ACTIVITÉ ÉDITORIALE

Je considère que la diffusion des sciences est une activité très importante pour les métiers de la recherche. En 1997, j'ai publié un premier ouvrage sur les ondes évanescentes aux éditions

Eyrolles, puis publié par Springer en anglais (figure). J'ai participé à l'écriture de plusieurs autres livres. Actuellement, je fais partie du comité éditorial des CRAS physique et du comité éditorial d'ISTE-Wiley pour le domaine des « Ondes ». Initialement nous étions deux en charge du domaine « Ondes » Pierre-Noël Favennec et moi-même. Depuis son décès en 2021, je suis seule à gérer ce domaine pour les ouvrages comme pour le projet d'encyclopédie « Sciences » (cf note). C'est un travail de longue haleine, j'apprécie les échanges avec les auteurs qui viennent de domaines variés et qui appréhendent la physique de façons différentes.

QUELS SONT LES ASPECTS DE VOTRE ACTIVITÉ QUE VOUS AIMERIEZ VOIR SE RENFORCER DANS L'AVENIR ?

L'éméritat me permet de poursuivre mes activités, qu'elles soient éditoriales ou de recherche. Je participe, pour l'aspect champ proche optique, au projet Equipex « Smartlight » porté par Benoit Cluzel.

Nous avons une grande liberté de recherche au CNRS. Même si le problème des financements persiste, je pense avoir trouvé, tout au long de ma carrière, l'équilibre pour gérer ma recherche avec beaucoup de liberté. On peut prendre réellement plaisir en y menant des recherches aussi bien fondamentales qu'appliquées. J'ai eu le plaisir d'enseigner durant de nombreuses années, j'ai apprécié le contact avec les étudiants et l'acte de transmettre un peu de connaissance. La formation par la recherche est aussi une notion dans laquelle je me suis beaucoup investie. J'ai encadré et co-encadré 22 thèses qui ont largement contribué à faire avancer les projets de recherche. Les résultats obtenus avec mes collègues et les étudiants l'ont été grâce aux échanges que nous avons eus tous ensemble. Cet aspect coopératif fait la beauté de notre travail. Je n'ai pas pu citer tous ceux que j'ai croisés et avec qui j'ai échangé tout au long de ma carrière, j'espère qu'ils se reconnaîtront et je les remercie. ●

La photonique : de la deeptech à la filière structurée



La photonique est omniprésente dans notre vie quotidienne : des fibres optiques jusqu'aux écrans haute résolution de nos téléphones, en passant par les lasers qui révolutionnent la médecine et l'industrie. Elle est le moteur de nombreuses avancées technologiques. La science de la lumière progresse et rassemble ses forces pour passer du statut de deep tech à celui d'une véritable filière.

<https://doi.org/10.1051/photoni/202412420>

**Thierry GEORGES, Thierry DUPOUX, Thierry CHARTIER,
Elisabeth BOÉRI**

Photonics France, 60 avenue Daumesnil, 75012 Paris

contact@photonics-france.org

Au fil des découvertes, la science de la lumière s'est développée au-delà du domaine de l'optique et a élargi son champ d'action, incluant maintenant les lasers, les fibres optiques, les capteurs d'images et de lumière, la réalité augmentée, la réalité virtuelle, les LEDs et le photovoltaïque. La photonique englobe toutes les applications liées à la lumière, qu'elle soit visible ou invisible, du spectre infrarouge aux rayons X. Les technologies de la photonique sont présentes dans de nombreux domaines de notre quotidien, tels que les communications, la mobilité, la santé, l'habitat, l'alimentation et la protection de l'environnement mais aussi la sécurité, l'industrie, les technologies quantiques.

La photonique compte en France près de 1230 entreprises qui rassemblent 20 milliards de chiffre d'affaires. Le secteur représente 84 000 emplois et devrait créer 8 000 nouveaux emplois par an. La France se place parmi les 5 leaders mondiaux de l'industrie photonique. L'Union Européenne place la photonique comme l'une des 6 technologies-clés du 21^e siècle.

Une deeptech essentielle pour notre industrie

La photonique est une « deeptech » au service des autres marchés applicatifs. C'est même souvent une deeptech au service des autres deeptech. Pour réaliser des nanostructures, il faut de la photonique. Pour créer les processeurs de demain avec des communications ultra haut débit, il faut de la photonique.

Certains marchés applicatifs travaillent déjà avec la photonique depuis très longtemps notamment les télécommunications, la recherche, la mobilité, la santé et la défense. Ce sont des technologies en fort développement : dans cinq ans sortiront des solutions qui ne sont pas imaginées en produit aujourd'hui. La filière photonique doit se structurer et continuer à évoluer dans ces domaines pour ne pas être devancée par les autres pays.

« FAIRE DE LA FRANCE UN HUB D'INNOVATION MONDIAL EN PHOTONIQUE »



Discours d'Éric Bothorel, député des Côtes-d'Armor, à l'ouverture de la journée de la photonique, organisée le 22 juin à Paris par Photonics France.

La photonique est un secteur d'avenir pour nos emplois et notre industrie. Il est essentiel de mettre en lumière l'importance de ce secteur. Les investissements dans la recherche et le développement de la photonique doivent être soutenus et encouragés. En favorisant la collaboration entre les universités, les entreprises et le gouvernement, nous pouvons accélérer l'innovation et créer des écosystèmes dynamiques propices à sa croissance.

Dans le contexte actuel de réindustrialisation impulsé par la France et par le président de la République, la photonique joue

un rôle essentiel en permettant le développement de technologies de pointe, en favorisant l'automatisation des processus de production et en améliorant l'efficacité énergétique.

La photonique est au carrefour d'un certain nombre des enjeux et des challenges que nous avons à relever pour les années à venir. Le plan France 2030 nous a déjà permis de renforcer la dynamique du secteur. Aujourd'hui, nous devons accélérer pour faire de la France un hub d'innovation mondial en photonique.

L'Union européenne constitue également une bonne échelle pour ce combat. La Commission européenne a signé par le passé un partenariat public-privé avec la plateforme technologique européenne Photonics21. Cette dernière regroupe les principales industries photoniques et des acteurs de la recherche et du développement, concernés tout au long de la chaîne de valeur économique, et ce dans toute l'Europe.

Nous devons poursuivre cette stratégie de partenariat public-privé pour continuer à financer la recherche et l'innovation et ainsi cimenter le leadership industriel de l'Europe en photonique. C'est indispensable pour nos emplois, notre croissance et notre souveraineté.



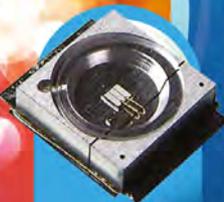
**LA FLEXIBILITÉ ET L'EXPERTISE
AU SERVICE DE L'INNOVATION**

LED UV

**LED / MODULES LED
VERSION STANDARD ET CUSTOM
POUR PETITES À GRANDES SÉRIES**







- De 237 à 405 nm
- Large choix de puissances et d'angles
- Boîtiers CMS ou traversants

*Large gamme de **Photodiodes UV** également disponible*

APPLICATIONS

Décontamination - Stérilisation surfaces, fluides et air -
Analyse de gaz - Spectroscopie - Curing - Fluorescence -
Effets spéciaux - Forensic - Détection de contrefaçon...

Suivez nous !



www.htds.fr
info@htds.fr

« NOUS APPELONS DE NOS VŒUX LA RÉINDUSTRIALISATION »

François Houbre, trésorier de Photonics France, directeur général de SAVIMEX



SAVIMEX est une PME spécialisée dans les composants optiques polymères. Nous produisons des millions de composants par an.

Avant de parler de réindustrialisation, nous devons parler de la désindustrialisation que nous avons connu au tournant des années 2007 à 2010. Nous avons vu partir un à un tous nos fabricants, tous nos clients et nos industriels qui faisaient du capteur. Ils sont tous partis produire ou se fournir en Chine pour baisser les coûts.

Pour faire face, nous nous projetons dans des composants à plus haute valeur ajoutée. Nous réussissons dans les composants pour affichage tête haute. Nous faisons des visières de pompiers avec des protections intelligentes. Et demain, nous ferons des composants pour la réalité virtuelle.

Nous appelons de nos vœux la réindustrialisation. Nous sommes prêts et nous avons parfaitement la capacité de produire de façon compétitive des composants ou des produits de très haut niveau. Il y a évidemment un certain nombre de conditions pour y arriver. Les questions d'innovation, la capacité à proposer un meilleur produit, un meilleur service à un meilleur coût ne peuvent se concrétiser que si notre filière se renforce.

Une structuration indispensable pour évoluer



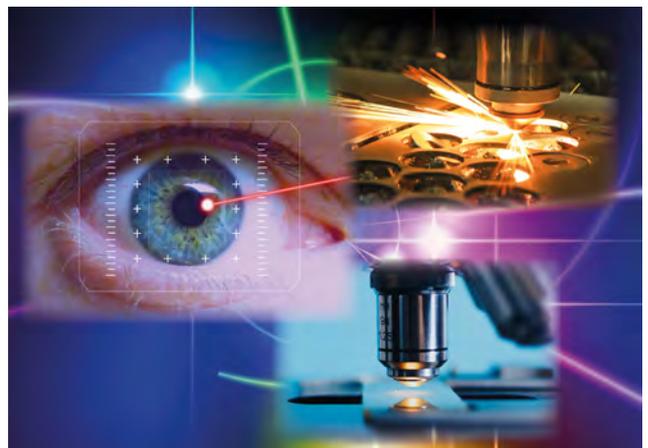
Né de cette volonté de faire parler la filière d'une seule voix auprès des pouvoirs publics Photonics France s'est donné pour mission de promouvoir, animer et défendre la filière française de la photonique. Près de 200 adhérents industriels et académiques constituent la fédération qui s'agrandit progressivement.

D'autres grands acteurs d'envergure nationale comme la Société Française d'Optique contribuent à une représentation large des besoins de la filière, sans oublier le renfort de clubs spécialisés comme le Club Laser et Procédés et de tous les établissements d'enseignement qui agissent pour l'excellence académique et l'attractivité des métiers. La France cumule les Prix Nobel de physique récents en photonique parmi ses chercheurs : on peut citer notamment Gérard Mourou (2018), Alain Aspect (2022), Anne L'Huillier et Pierre Agostini (2023).

La structuration passe également par un maillage organisé de la filière sur tout le territoire. Les pôles Systematic (Ile-de-France), Photonics Bretagne, Alpha-RLH (Nouvelle-Aquitaine), Minalogic (Auvergne-Rhône-Alpes), Optitec (Provence-Alpes-Côte-d'Azur) stimulent le paysage photonique dans chaque région et au-delà.

La photonique est en pleine dynamique et pour poursuivre son essor, elle doit convaincre l'ensemble de ses partenaires et les pouvoirs publics pour construire une véritable stratégie nationale concertée qui garantisse la souveraineté industrielle française.

Souveraineté industrielle et enjeux sociétaux, la photonique répond présent



Les sciences et technologies de la lumière offrent des solutions immédiates à la souveraineté industrielle et aux enjeux de société contemporains. La filière photonique française répond à ces enjeux avec des solutions concrètes que peuvent soutenir les décideurs publics.

La photonique englobe toutes les sciences et les technologies de la lumière. C'est un domaine avec des applications présentes dans le quotidien de chacun : de l'éclairage aux images en passant par les communications par fibre optique ou l'usage de l'énergie photovoltaïque. Ses champs d'application sont immenses.

Allier une recherche foisonnante et des objectifs appliqués

Si la photonique est au cœur de tant d'applications, c'est grâce à la recherche fondamentale qui a permis tous ces développements technologiques et donc toutes ces applications. Le plan « France 2030 » et l'Agence nationale de la recherche (ANR) contribuent financièrement à l'alliance d'une recherche foisonnante et d'objectifs appliqués. Elles valorisent ainsi le potentiel de l'industrie photonique française.

Ces projets sont menés au sein de laboratoire de recherche dans les universités et des organismes tels que le CEA, le CNRS, l'Inserm (santé), l'Inria (numérique) et beaucoup d'autres. Ils sont souvent réalisés en partenariat avec des industriels.

Le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche (MESRI) finance et soutient des grandes infrastructures de recherche tel que les grands télescopes pour l'astronomie, l'astrophysique, les lasers de puissance ou les synchrotrons.

Lors des missions martiennes de la NASA, le rover Perseverance de la mission mars 2020 ainsi que la SuperCam, issus tous deux des laboratoires du CNRS et du CNES, combinent plusieurs technologies d'analyse optique basées sur les lasers et l'imagerie pour étudier la composition des roches.

Des initiatives comme le prix Jean Jerphagnon porté aujourd'hui par la SFO incitent nos chercheurs à extraire des laboratoires leurs idées répondant à des besoins applicatifs. Des centres de maturation tels Alphanov ou Photonics Bretagne augmentent les chances de succès de ces projets issus des laboratoires, mais n'aident qu'un trop petit nombre de projets. L'accès au financement privé reste cependant un frein majeur qu'il faudra corriger.

La stratégie nationale pour les technologies quantiques a été lancée en janvier 2021 dans le cadre du plan « France 2030 ». Un grand programme de recherche fondamentale doté de près de 150 millions d'euros vise à préparer les solutions quantiques de demain dans le domaine à la fois du calcul, des communications, des capteurs. Celui-ci est déjà bien en route, il inclut largement les approches photoniques et va se poursuivre sur les six ou sept prochaines années.

Répondre aux enjeux de société contemporains

La photonique a révolutionné les diagnostics médicaux avec l'imagerie. On la retrouve également dans la miniaturisation extrême en électronique, dans la robotique et le contrôle de mouvement. Tous les capteurs optiques utilisés dans les activités humaines font appel à la photonique : détection des polluants dans l'environnement, sécurité alimentaire, navigation des véhicules autonomes, reconnaissance faciale.

La photonique permet aussi des progrès en médecine et en biologie avec des instruments toujours plus performants en résolution, pour explorer en particulier l'intérieur des organes ou des cellules vivantes, et des applications en endoscopie, en chirurgie ou en thérapie photodynamique. Le projet européen SCANnTREAT, lancé en 2020, propose de diagnostiquer et de traiter une ●●●

**NEW
DESIGN**



OEC

**ENHANCED
OPTICAL
ENGINEER
COMPANION**

Metrology on-the-go

Modular system

Upgradable

VIS-NIR / SWIR



www.imagine-optic.com

sales@imagine-optic.com
+33 1 64 86 15 60

imagine  optic

« UN MARCHÉ EN CROISSANCE QUI CRÉE DES EMPLOIS EN FRANCE »

John Lopez, président du Club Laser et Procédés



L'essor du laser industriel a lieu dans les années 1995. Aujourd'hui, cette technologie a une réalité industrielle qui est omniprésente dans de nombreux secteurs de l'industrie et source d'innovation. Au niveau mondial, elle représente 22 milliards d'euros.

La technologie laser est une partie de la filière photonique. Nos utilisateurs relèvent de différents secteurs : automobile, aéronautique, cartes électroniques, sécurité, naval, ferroviaire, batteries, lunetterie... Ainsi qu'environ 1 000 sociétés qui font de la découpe à plat pour la tôlerie fine.

Ces procédés ont un faible impact environnemental : nous n'utilisons pas de chimie, pas de revêtement et pas d'effluent. Elles contribuent à retrouver une certaine souveraineté industrielle.

Les technologies laser sont un marché en croissance qui créent des emplois en France. Elles permettent de relocaliser des outils de production en Europe et en France, par exemple dans l'automobile, les semi-conducteurs et l'électronique. En se donnant les moyens, nous pouvons obtenir des innovations de rupture dans l'usage des composants et également dans les technologies propres au laser.

tumeur cancéreuse, en combinant une imagerie par scanner et une thérapie photodynamique activée par rayon X.

La photonique est à la fois un magnifique sujet de recherche et un puissant outil pour de nombreuses applications concrètes. La recherche française y apporte une brique importante aussi bien au niveau national qu'international.

La photonique en Europe et à l'international



L'Union européenne constitue une bonne échelle pour l'essor de la filière photonique. La recherche et l'innovation est l'une de ses priorités. Dès 2009, la photonique a été identifiée comme l'une des six technologies clés pour l'Europe.

Pour y contribuer, l'Union européenne a lancé Horizon Europe : un programme-cadre qui concrétise sa volonté de se démarquer dans un contexte de forte compétition internationale, d'offrir une meilleure visibilité à la recherche et à l'innovation, et enfin d'attirer les meilleurs talents, notamment grâce à la mise en œuvre de financements compétitifs. Le programme a permis la signature d'un partenariat public-privé (PPP) entre la Commission européenne et Photonics21. Aujourd'hui, Photonics21 représente plus de 3 000 membres de toute l'Europe qui s'engagent activement pour développer une stratégie photonique commune pour la recherche et l'innovation futures en Europe. La France, grâce à l'implication de plus en plus importante, y est très bien représentée. C'est un lieu d'influence important pour définir les appels à projets. Photonics France agit aussi auprès de l'Etat pour influencer sur le programme photonique d'Horizon Europe.

À l'international, la France se place parmi des 5 leaders mondiaux de l'industrie photonique, avec les États-Unis, l'Asie et l'Allemagne. Elle est pourtant confrontée à de fortes contraintes d'exportation pour répondre à une sévère compétition internationale. Bon nombre des technologies exploitées relèvent de biens à double usage (civil et militaire) ou de brevets qui touchent la souveraineté industrielle française. La filière photonique française fait face au double enjeu d'être compétitive à l'international et de défendre la fuite de ses savoir-faire vers des pays à main d'œuvre bon marché.



ISP SYSTEM est un fabricant de machine Français. Nous proposons des équipements de packaging photonique et de bobinage de fibre optique pour l'industrie et la recherche.

PHOTOMATIQ®

Automatiser la production de lasers



Produire en automatique avec répétabilité et à la cadence industrielle est maintenant possible avec Photomatiq®.

Photomatiq® est la nouvelle plateforme d'assemblage 3D d'ISP System. Sa flexibilité associée à un logiciel de paramétrage « no code » permettent de créer des recettes d'assemblage sur une large gamme de produits photoniques.

F-WINDER

Production de bobines de fibres optiques



Les machines de bobinage peuvent inclure les fonctions de débobinage, de bobinage, de trancannage, de pré torsion, de contrôle de tension et de guipage. Les motifs de bobinage réalisable sont droits, croisés ou quadripolaire.

www.isp-system.fr
contact@fr-ispgroup.com

Formation et emploi en photonique



Depuis plusieurs années, les industriels de la photonique sont confrontés aux difficultés de recrutement de main-d'œuvre qualifiée. Les PME et ETI sont touchés de plein fouet par ces pénuries de recrutement.

La photonique est un domaine technologique en plein essor avec une forte croissance. Beaucoup d'entreprises créent des produits qui sont conçus, fabriqués et développés en France et nous sommes présents sur l'ensemble de la chaîne de valeur. L'évolution des besoins en qualification est représentative de la maturité de la filière.

Un besoin croissant d'opérateurs et de techniciens

Une enquête, réalisée par un cabinet indépendant auprès des entreprises de la photonique, montre que dans les cinq prochaines années, environ 8 000 emplois par an devront être pourvus. On compte notamment une proportion croissante de besoins sur des métiers d'opérateurs et de techniciens.

Photonics France a travaillé durant 2 années avec l'Éducation nationale et ses établissements porteurs pour la création d'un bac professionnel dédié à la photonique. Ce bac pro est maintenant officiel et ouvrira ses 10 premières classes en 2024. Les travaux ont également abouti à la réforme du BTS Systèmes photoniques, à travers l'actualisation du référentiel compétence.

Photonics France agit également auprès de France Travail (anciennement Pôle Emploi) pour que la photonique soit mieux référencée dans ses fiches métiers et ses offres d'emploi.

Un Appel à manifestation d'intérêt - Compétences et métiers d'avenir (AMI-CMA) a été lancé par le gouvernement. Il va renforcer toutes ces actions sur la formation initiale et continue, avec un accent particulier sur les opérateurs et les techniciens.

Attirer les jeunes vers la photonique

Photonics France a travaillé ces trois dernières années sur un projet EDEC (Engagement, Développement, Emploi Compétences) en partenariat avec le ministère du Travail et l'OPCO 2i. Il représente un budget de 550 000 euros pour quantifier les besoins de la filière, analyser l'offre de formation sur le territoire national et réaliser des outils de promotion.

Parmi ces outils on peut citer le site orientation-photonique.org, qui présente la photonique et ses métiers auprès du grand public, et le Zoom métier de l'ONISEP sur les métiers de l'électronique et de la photonique qui met en valeur les différents métiers de la filière. On y trouve également une cartographie nationale de toutes les formations en photonique.

Les formations supérieures (BAC+5 et plus) ne sont pas épargnées par le manque d'engagement. Des actions de sensibilisation à la photonique sont régulièrement organisées par les entreprises, les pôles de compétitivité et les associations scientifiques. Les écoles d'ingénieurs et les universités sont très actives pour créer de nouveaux diplômés et augmenter le flux d'ingénieurs et de chercheurs en photonique. Tous ces outils sont à la disposition de la filière. Ils apportent des réponses aux besoins de recrutement sur les différents niveaux, de l'opérateur à l'ingénieur. Cette action de sensibilisation spécifique à la photonique rejoint une démarche plus large de promotion des métiers scientifiques. ●

Quand l'imagerie accompagne la restauration d'œuvres picturales : le cas Soulages

**Mathieu HÉBERT^{1,*}, Lionel SIMONOT², Benjamin BRINGIER³,
Mathieu THOURY⁴, Pauline HÉLOU-DE LA GRANDIÈRE⁵**

¹ Institut d'Optique Graduate School et Université Jean Monnet Saint-Étienne, UMR 5516 Laboratoire Hubert Curien, 18 rue Benoît Lauras, 42000 Saint-Étienne

² Université de Poitiers, UPR 3346 Institut Pprime, 2 Bd des Frères Lumière, 86360 Chasseneuil-du-Poitou

³ Université de Poitiers, UMR 7252 Institut Xlim, Bât. H1, 11 Bd Marie et Pierre Curie, 86362 Futuroscope Chasseneuil Cedex

⁴ CNRS, Laboratoire Institut Photonique d'Analyse Non-destructive Européen des Matériaux Anciens (IPANEMA), Site du Synchrotron SOLEIL, BP48 Saint-Aubin, 91192 Gif-sur-Yvette.

⁵ CY Cergy université, UMR 9022 Héritages : Culture/s, Patrimoine/s, Création/s, 33 boulevard du Port, 95011 Cergy-Pontoise Cedex

* mathieu.hebert@institutoptique.fr



Enregistrer l'apparence des œuvres d'art moderne est un enjeu majeur car celle-ci évolue dans le temps, et un défi qui exige le développement de nouveaux principes d'imagerie ou d'adapter les principes existants car la couleur n'est pas le seul attribut visuel exploité par les peintres : le brillant, le relief, la texture jouent aussi un rôle essentiel, en témoigne l'analyse en mars 2023 d'une toile de Pierre Soulages.

<https://doi.org/10.1051/phonon/20412426>

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.

Voilà un phénomène auquel on pense peu lorsqu'on revisite un musée : l'œuvre que l'on regarde n'est pas tout à fait la même que celle que l'on avait déjà appréciée quelques années plus tôt. La mémoire visuelle n'étant pas suffisante pour comparer de si faibles changements à deux moments temporellement éloignés, nos sens se laissent principalement impressionner par la capacité de ces œuvres à traverser les âges. Pourtant, les matériaux évoluent.

La vitesse et l'extension de ces variations sont particulièrement suivies par les restaurateurs qui contrôlent l'état de conservation des œuvres et interviennent quand cela s'avère nécessaire pour freiner les dégradations dont les symptômes sont notables - des opérations peu connues du grand public sauf dans de rares cas médiatisés, qui nécessitent cependant une grande expertise et une bonne connaissance des œuvres afin de restituer au mieux leur apparence d'origine.

Pour accompagner ces actions délicates, les sciences de la lumière prennent peu à peu leur place aux côtés des sciences de la matière. D'un côté, il aura fallu du temps aux scientifiques et savants pour réaliser que c'est bien la lumière, sa distribution spectrale, spatiale et angulaire, qui véhicule le signal que notre cerveau analyse comme objet pourvoyeur d'émotions. D'un autre côté, les technologies photoniques, en particulier les techniques d'imagerie,

connaissent un essor fulgurant pour caractériser *in situ* les matériaux d'artistes. Néanmoins, ces approches sont encore peu utilisées pour le suivi des œuvres. Leur potentiel est grand car elles permettent un enregistrement spatialisé et quantifié des propriétés optiques de tout ou partie des œuvres. Aussi, elles peuvent être des outils extrêmement utiles pour assister les conservateurs-restaurateurs dans leurs missions, et suscitent de grandes attentes, non seulement pour diagnostiquer des dégradations, mais aussi simplement pour documenter l'apparence de l'œuvre à un instant donné – information précieuse pour son suivi dans le temps long.

Numériser une peinture moderne : un défi

Même si la notion de restauration évoque en premier lieu les actions menées sur des œuvres anciennes, la peinture moderne révèle aussi de nouvelles typologies de problèmes à résoudre. A partir de la fin du XIX^e siècle, les peintres ont cessé de vernir leurs toiles pour donner à voir des variations de brillances, qui les rendent cependant plus vulnérables aux agressions extérieures et aux dégradations. Ils ont aussi diversifié les techniques, les matériaux, les formats, et les phénomènes optiques employés pour « faire image ». La couleur, qui était quasiment le seul attribut visuel exploité par les peintres classiques, est dès lors accompagnée d'effets de relief et de brillant bien plus difficiles à quantifier.

Pierre Soulages (1919-2022) est un exemple emblématique de ces évolutions. Sa technique picturale, qui n'a cessé d'évoluer au cours de ses 80 années de carrière, a pris un tournant révolutionnaire à partir de 1979 lorsqu'il crée les « Outrenoirs », excluant la couleur comme principe de lecture de l'œuvre au profit exclusif du brillant et du volume de la matière.



Figure 1. Peinture 202 × 129,5 cm, 15 décembre 1959 (Les Abattoirs, Musée - Frac Occitanie à Toulouse) À gauche : toile entière. À droite : un détail présentant des zones matifiées, détournées par Pauline Hélou-de La Grandière.

Deux décennies auparavant, il appliquait de la peinture à l'huile noire sur fond blanc ou partiellement coloré, comme dans *Peinture 202 × 129,5 cm, 15 décembre 1959* conservée dans les réserves des Abattoirs, Musée - Frac Occitanie à Toulouse, reproduite en Fig. 1. Cette peinture présente des décollements et des ramollissements de matière qui exigent un suivi régulier et parfois des interventions de restauration. Consigner l'apparence de l'œuvre aussi précisément que possible est d'autant plus nécessaire et urgent que les évolutions chimiques de la matière, et donc les changements de formes et d'apparence, ont une cinétique rapide, notables d'une année sur l'autre. Mais cela représente un défi qu'aucun outil d'imagerie classique n'est apte à relever. Exit l'imagerie en couleur ou spectrale qui ont tant occupé les scientifiques du patrimoine ces quinze dernières années : la couleur est un noir bien noir ! L'information utile ne peut donc provenir que d'autres technologies innovantes permettant d'enregistrer brillant, relief, et états de la matière.



Une combinaison de trois techniques d'imagerie

Pauline Hélou de La Grandière, restauratrice et spécialiste de l'œuvre de Pierre Soulages, s'intéresse aux techniques permettant d'augmenter le contrôle et l'examen des œuvres de Soulages dans le cadre de son doctorat à CY Cergy Paris université, UMR Héritages, encadrée par Mathieu Thoury du CNRS et de Lionel Simonot de l'université de Poitiers. L'assistance par imagerie est un des points essentiels de ses recherches : l'objectif est de tester le potentiel de technologies innovantes à fournir un contrôle sur les processus de dégradation en cours et une information quantitative sur le résultat de ses interventions. Elle a retenu trois techniques en particulier : **l'imagerie en relief**, qui se développe depuis une vingtaine d'années ; **l'imagerie de brillant**, qui n'existait pas et dont la réalisation du tout premier prototype est esquissée ici ; et **l'imagerie de luminescence**, ●●●

connue depuis longtemps pour son aptitude à révéler des changements d'état de la matière mais dont le potentiel reste encore largement à exploiter. Ces trois techniques ont été mises en œuvre en mars 2023 lors d'une expérimentation au musée sur *Peinture 202 × 129,5 cm, 15 décembre 1959*, financée par l'Université de Poitiers à travers un projet PEP4 « nuit-NOIRoES ».

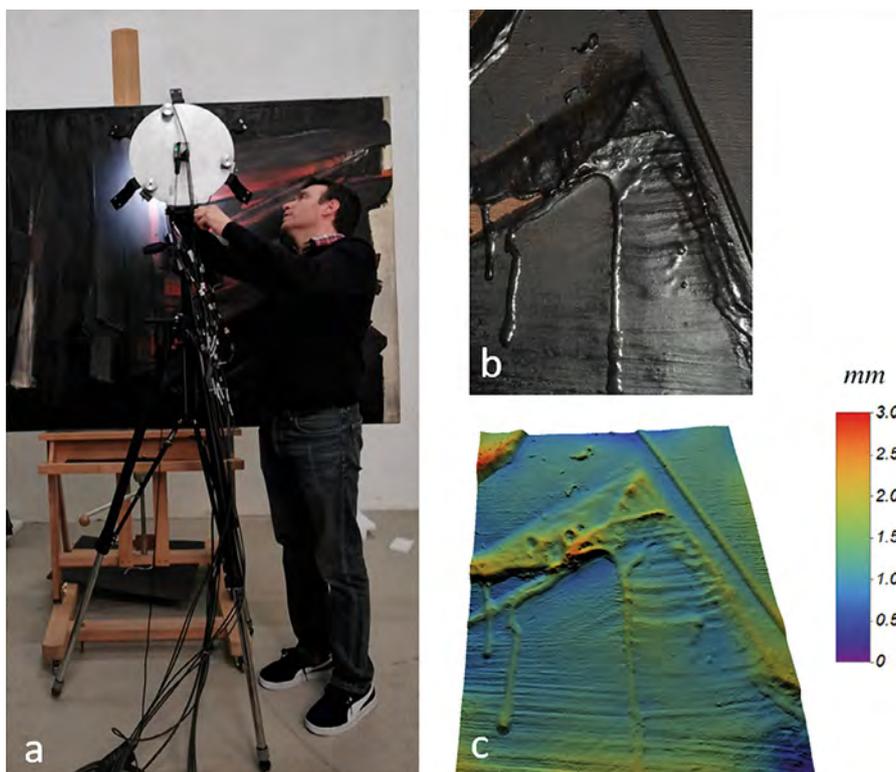
L'imageur de microtopographie utilisé est un système développé par Benjamin Bringier à l'Institut Xlim à Poitiers (Fig. 2). Il se base sur les principes de la stéréo-photométrie et permet d'analyser une zone de 10 × 15 cm, éclairée successivement par 11 sources quasi-ponctuelles réparties sur deux disques. Une image HDR (*High Dynamic Range*) en couleur est acquise sous l'éclairage de chaque source. Un post-traitement informatique qui utilise une analyse par réseau de neurones et des mesures de BRDF (*Bi-directional Reflectance Distribution*

Function) permet d'obtenir une carte des normales de la surface à partir des onze images HDR acquises. La topologie 2.5D à une résolution de 70 μm est obtenue par intégration numérique 2D (voir exemple Fig. 2c sur une zone montrée Fig. 2b). La partie diffuse de l'apparence est estimée grâce aux images HDR et à la carte des normales pour simuler une version colorée virtuelle de la surface sous diverses nouvelles géométries d'éclairage.

Concernant le brillant, effet visuel majeur dans l'œuvre de Pierre Soulages qui a tendance à évoluer par endroit sur certains tableaux, il n'existe à ce jour aucun dispositif permettant de le mesurer en chaque point sur une grande étendue, ni même de l'estimer. L'instrument de mesure le plus répandu aujourd'hui, le brillancemètre ou glossmeter, se focalise sur le « brillant spéculaire », qui se mesure en *gloss units* (GU) comme la quantité de lumière réfléchie dans un petit cône autour de la direction spéculaire quand

la surface est éclairée par un faisceau collimaté à incidence de 60°. La quantité de lumière mesurée est maximale sur une surface polie miroir et quasi nulle sur une surface très mate. Des expériences psychophysiques ont permis d'établir une courbe de correspondance (bijective mais non linéaire) entre ces valeurs en GU et le brillant perçu par des observateurs humains. Le brillancemètre présente cependant des inconvénients empêchant son usage pour l'analyse d'œuvres peintes : l'instrument doit être placé en contact avec la surface, ce qui est impossible sur une œuvre fragile ; la mesure donne une valeur moyenne sur 1 cm² environ, ce qui représente une résolution spatiale beaucoup trop grossière ; et enfin, il donne des valeurs erronées sur des surfaces courbées, et donc *a fortiori* sur les œuvres de Soulages qui contiennent des empâtements. Pour pallier ces inconvénients, un prototype de scanner de brillant (Fig. 3a) a été conçu par Mathieu Hébert à l'Institut d'Optique et au laboratoire Hubert Curien à Saint-Etienne. Le dispositif est basé sur une caméra vidéo fixe et une source lumineuse ponctuelle mobile : la caméra enregistre en chaque pixel la variation de luminance réfléchie liée au déplacement de la source. De l'allure du signal temporel en chaque pixel est déduit un score physique, que l'on transforme en valeur de brillant spéculaire (en GU) grâce à un étalonnage sur un nuancier de surfaces noires dont le brillant spéculaire est connu. On obtient ainsi une carte de brillant, correspondant à une aire de 20 cm de côté environ, comme montrée en Fig. 3c. L'exemple donné ici montre à quel point la photographie peine à rendre la brillance d'une surface : les reflets dépendent des conditions particulières d'éclairage sous lesquelles la photographie a été prise, invisible dans l'image, alors que la perception du brillant nécessite en général un mouvement de la surface, de l'observateur, ou de la source. Les bandes verticales sont en effet beaucoup plus brillantes que les zones environnantes (valeurs élevées de

Figure 2. a) Imageur en relief en cours d'installation devant l'œuvre de Soulages. **b)** Photographie d'une des zones observées, et **c)** topologie 2.5D de cette zone issue de l'imageur en relief.



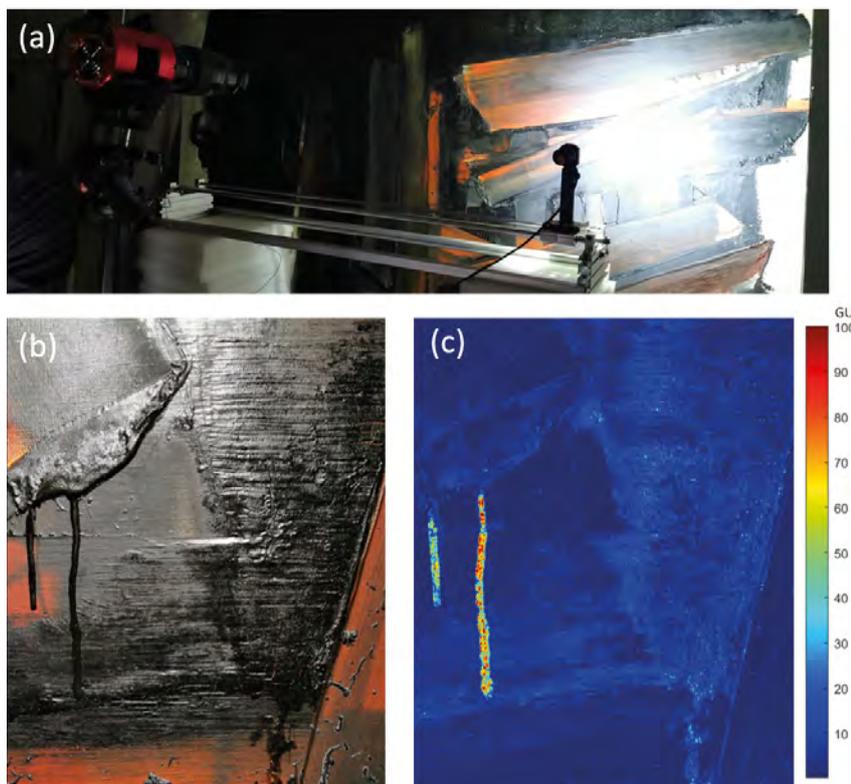


Figure 3. a) Imageur de brillant en cours de mesure ; la source ponctuelle, à droite, est placée sur un rail et se déplace en ligne droite. b) Photographie couleur d'une zone observée et c) carte de brillant spéculaire de cette zone.

brillant spéculaire en GU indiquées par des points jaunes à rouges), contrairement à ce que la photographie en couleur tend à laisser penser.

L'imageur multispectral de luminescence est un prototype développé par Mathieu Thoury au laboratoire IPANEMA localisé sur le site du synchrotron SOLEIL. Il consiste à éclairer l'œuvre de manière spatialement homogène avec diverses sources spectralement définies

dont l'émission peut s'étendre de l'ultra-violet au proche infrarouge, et d'enregistrer des images à niveaux de gris dans des bandes spectrales elle aussi définies, de l'UV au proche IR. Ce « découpage spectral » offre une certaine versatilité d'analyse pour identifier la contribution de matériaux spécifiques au sein de mélanges ou discriminer différents états de la matière dans une œuvre. En assignant à trois images de fausses couleurs ●●●

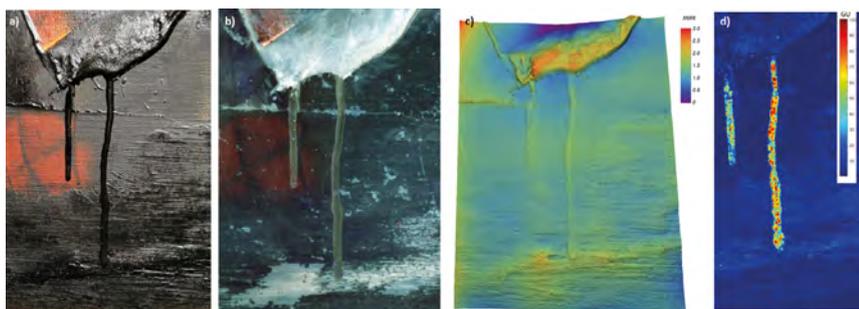


Figure 4. a) Photographie en couleur, b) image en fluorescence, c) image en relief et d) carte de brillant de la zone de l'œuvre.

power.

Power boost for all wavelengths



ALS-VIS Fiber Lasers & Amplifiers

**Industrial grade performances
for highly demanding applications**

- High power up to 10 W
- Ultra-low intensity noise
- High pointing and beam quality stability
- Turnkey, maintenance free, reliable systems



TOPTICA

rouge, verte et bleue et en les superposant, on crée une première visualisation des variations de composition chimique de la peinture. Dans ce cas précis, les pigments noirs utilisés par l'artiste n'étant pas luminescents, cela permet d'exacerber les hétérogénéités chimiques du liant dont on cherche précisément à comprendre l'évolution. Un exemple d'image en fausses couleurs est montré Fig. 4b, correspondant à des excitations de 708 ± 37 nm (canal rouge), 571 ± 36 nm (canal vert) et 472 ± 15 nm (canal bleu). Les zones les plus lumineuses, correspondant aux couleurs claires dans l'image, correspondent aux résidus d'un vernis partiellement supprimé au cours d'une restauration antérieure, et aux zones contenant davantage de liant dégradé.

Évaluer l'impact d'un acte de restauration

Durant l'étude, les trois systèmes d'imagerie ont été utilisés sur certaines mêmes zones de l'œuvre, permettant ainsi de révéler des informations relatives à la composition chimique, le relief ou le brillant de la peinture (Fig. 4). L'interprétation des images en termes d'éventuelles anomalies dues à des dégradations ou à un vieillissement relève du travail des restaurateurs, et ne peut se faire qu'à la lumière de leur connaissance des matériaux et de la technique du peintre – c'est en partie l'objet des recherches en cours de Pauline Hérou-de La Grandière. Procéder à des acquisitions similaires au cours du temps, à intervalle régulier, présenterait pour elle un très grand intérêt pour observer les processus dynamiques de dégradation, ce qui n'a jamais été entrepris jusqu'ici. S'ajoutant à ce contrôle, durant la campagne de mesures de mars 2023, des acquisitions de relief ont été faites avant et après un refixage sur des parties où la peinture présentait des soulèvements (Fig. 5, colonne de gauche), permettant à la restauratrice d'observer la qualité

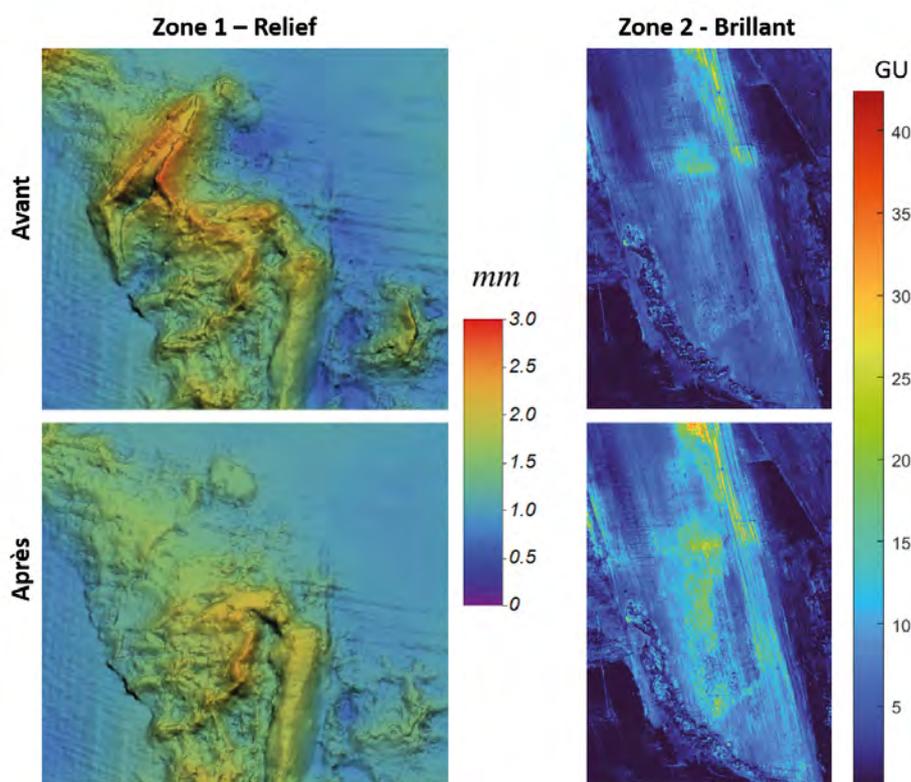


Figure 5. Acquisitions réalisées sur deux zones avant et après restauration. Colonne de gauche : images en relief sur une zone présentant un décollement de la couche picturale. Colonne de droite : cartes de brillant sur une zone dépolie.

de recollement, ainsi que la préservation des zones non atteintes par ces soulèvements. Une autre zone où un dépolissage a été entrepris voit son brillant augmenter légèrement, conformément aux attentes, sans non plus révéler d'effet de lustrage tant redouté par les restaurateurs (Fig. 5 colonne de droite).

Un projet en devenir

Si le champ applicatif de ces dispositifs d'imagerie dépasse de loin le simple domaine du patrimoine artistique, leur mise à l'épreuve sur les peintures de Pierre Soulages met en valeur des spécificités importantes. Cartographier l'hétérogénéité topographique, chimique et d'apparence visuelle de manière quantitative et sans contact avec une haute définition est un facteur clé pour permettre le suivi des œuvres. Les informations données par ces trois imageurs étant

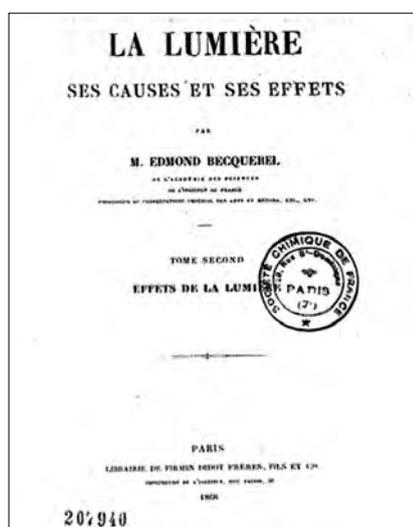
de natures très complémentaires, leur intercomparaison fine à travers une fusion des images est la prochaine étape, moyennant un recalage précis corrigeant les largeurs de champs et angles de vue légèrement différents. Un mode de représentation de données fusionnées dans une seule image, ou bien des algorithmes de segmentation pourront être entrepris. La campagne de mesures de mars 2023 constitue un premier pas dans cette direction, que la chaire « Soulages et la lumière » en cours de création, portée par la Fondation Paris-Saclay et la Fondation Université Jean Monnet, devrait permettre d'explorer pleinement avec plusieurs thèses (analyse optique des peintures, bien sûr, mais aussi des vitraux) et un volet de médiation scientifique. Nous espérons revenir dans quelques années rendre compte de ces recherches interdisciplinaires autour d'œuvres uniques et inspirantes de l'artiste. ●

BECQUEREL ET LA PHOTOGRAPHIE COULEUR EN 1848

Marie-Angélique LANGUILLE*, Théa DE SEAUVÉ, Bertrand LAVÉDRINE

Centre de Recherche sur la Conservation [CNRS – MNHN – ministère de la Culture], Paris, France

*marie-angelique.languille@cnrs.fr



En 1848, Edmond Becquerel (1820-1891) introduit un procédé de photographie capable de reproduire les couleurs naturelles. Ces images dites « photochromatiques » ne connaîtront pas d'applications pratiques parmi les photographes ; elles susciteront cependant un long débat au sein de la communauté scientifique pour expliquer l'origine des couleurs.

<https://doi.org/10.1051/photoniq/20412431>

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'objectif de cet article est de retracer la genèse des premières photographies couleur réalisées par Edmond Becquerel. Il abordera le contexte qui a conduit à l'invention de ce procédé, tout en examinant le débat scientifique qui a émergé quant à l'origine des couleurs de ces images.

EDMOND BECQUEREL, DE SON INTÉRÊT POUR LA LUMIÈRE À LA PHOTOGRAPHIE

L'intérêt de Becquerel réside dans l'étude de la lumière, comme en témoigne le titre de sa thèse soutenue en 1840 à la faculté des sciences de Paris, intitulée « Des effets chimiques et électriques produits sous l'influence de la lumière ». Ses travaux s'appuient tout naturellement sur les réactions photochimiques mis en œuvre dans une photographie naissante

et en pleine effervescence. En 1842, il propose une alternative à l'étape de développement aux vapeurs de mercure du daguerréotype, en y substituant une exposition à une lumière rouge, qu'il nomme « rayons continueurs ».

E. Becquerel est alors aide naturaliste, assistant de son père Antoine César titulaire de la chaire de physique appliquée au Muséum d'Histoire naturelle. Ses travaux sur la lumière exploitent la sensibilité spectrale de la plaque daguerrienne afin d'explorer la continuité entre les rayonnements ultraviolets et visibles [1]. L'idée novatrice de Becquerel consiste à évaluer l'interaction entre la lumière et la surface photographique en mesurant l'intensité des courants induits par la réaction photochimique. Il démontre ainsi la continuité du spectre solaire au-delà du violet dès 1843. Cette photographie qui est devenue pour lui

un objet de recherche lui permet des avancées en physique expérimentale et également des découvertes empiriques comme celle, en 1848, de l'enregistrement du spectre solaire avec ses couleurs naturelles sur une plaque d'argent sensibilisée par l'action du chlore [3].

L'IMAGE PHOTOCHROMATIQUE, LE PROCÉDÉ

Le procédé, simple, commence par la préparation d'une couche sensible à la lumière sur une plaque argentée semblable à celle du daguerréotype. Becquerel s'appuie sur les premières tentatives photographiques avec le chlorure d'argent de Nicéphore Niépce ou de William Henry Fox Talbot. Les observations du chimiste Thomas Johann Seebeck qui rapporte en 1810 qu'un papier imprégné de chlorure d'argent – et pré-exposé à la lumière blanche – ●●●

prend des teintes différentes en fonction de la couleur de la lumière et que ces teintes apparaissent semblables à celles des lumières d'exposition, l'auront également probablement inspiré. En 1840, Robert Hunt et John Frederick William Herschel étudient les propriétés photochromiques du chlorure d'argent en entrevoyant une application à la photographie en couleurs. Becquerel s'inscrit dans cette lignée de travaux sur le chlorure d'argent qu'il prépare « par tous les procédés possibles ». Il propose deux méthodes : soit il sensibilise le plaqué d'argent par immersion dans une solution de chlorure de cuivre soit il la sensibilise par une méthode électrochimique qui lui permet d'obtenir des couches sensibles plus homogènes et un rendu des couleurs plus répétable. Becquerel

obtient un spectre solaire en réfléchissant la lumière du soleil à l'aide d'un héliostat puis en la dispersant à travers un prisme et en concentrant la lumière sur la plaque sensible pendant plusieurs heures. Il reproduit par ailleurs des estampes colorées par contact avec la plaque sensible. Il réalise enfin des prises de vue dans une chambre photographique ; « eu égard à la paresse de la substance », c'est-à-dire sa faible sensibilité, les durées d'exposition sont longues. Le procédé souffre cependant de deux inconvénients majeurs : d'une part, les temps d'exposition dans la chambre photographique restent longs, d'autre part l'image n'est pas fixée et disparaît lentement à la lumière. Becquerel indique que les images peuvent se conserver à l'obscurité.

de fleurs, d'une poupée, de minéraux et de vitraux, en quinze minutes au soleil. Il tente de fixer les couleurs de ses images en ajoutant au procédé une étape d'application d'un vernis. Alphonse Poitevin (1819-1882), Edmond de Saint Florent (1830-après 1904), René Colson (1853-1941) s'appliquent à améliorer le procédé dans une variante sur support papier, sans plus de succès [4]. Quelques images photochromatiques sont à ce jour conservées à l'obscurité dans les réserves du Conservatoire national des arts et métiers, du musée Nicéphore Niépce, du Muséum national d'histoire Naturelle ou encore de la Société française de photographie.

DÉBAT SUR L'ORIGINE DES COULEURS

La nature de la couche sensible issue de la réaction du chlore et de l'argent restait jusqu'à peu indéterminée ainsi que l'origine des couleurs qui s'y forment. Pour Becquerel, elles sont « en dehors de tout ce que l'on sait sur l'optique » [5]. L'origine des couleurs de ces images a animé un large débat au 19^e siècle, débat polarisé entre les tenants d'une origine chimique des couleurs -les couleurs seraient dues à l'absorption sélective de la lumière par un composé coloré de la couche image, et ceux d'une origine physique -les couleurs seraient dues à un phénomène d'interférences lumineuses.

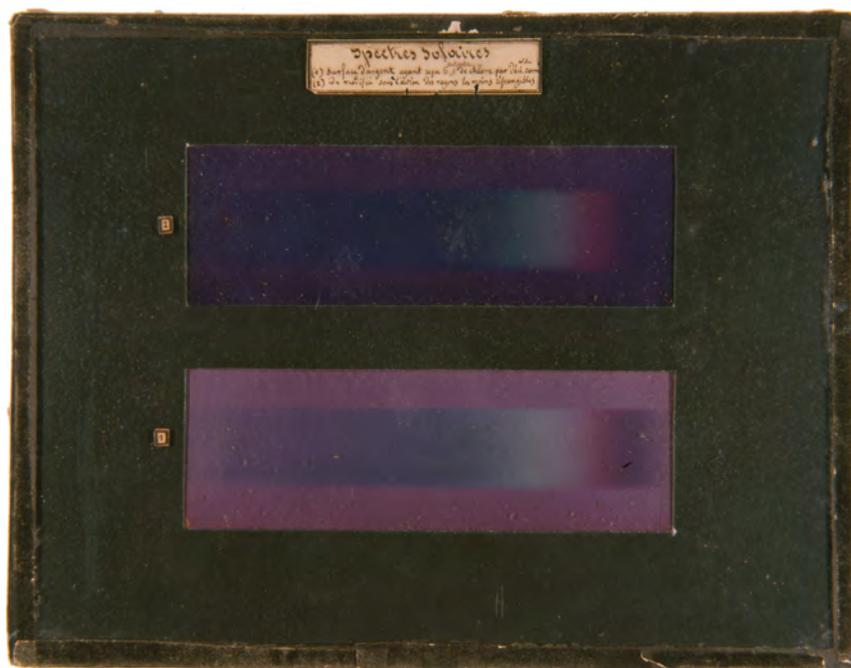
Becquerel tente une explication à partir du caractère vibratoire de la lumière : « La lumière étant le résultat de vibrations transmises des corps lumineux jusqu'à la rétine, et chaque rayon du spectre correspondant à une vitesse de vibration différente, il peut se faire que la substance sensible qui a été impressionnée par un rayon, c'est-à-dire par des vibrations d'une certaine vitesse, ait acquis la faculté de vibrer plus facilement ensuite sous l'action des vibrations de même vitesse que celle de ce rayon. Ainsi il se produirait dans cette circonstance le même phénomène que celui qui se passe quand une réunion de sons vient frapper une corde tendue... » [3]. Mais il ne s'explique pas que seule la substance sensible qu'il a préparée ait une telle capacité.

Figure 1. Edmond Becquerel, Spectres solaires, 1848, images photochromatiques, musée Nicéphore Niépce, Chalon-sur-Saône. Ces deux reproductions de spectres solaires ont été obtenues sur deux plaques sensibles préparées par électrochimie : celle du haut n'a pas subi d'étape de préexposition aux rayons infrarouges, contrairement à celle du bas comme décrit dans le cartouche.

© Musée Nicéphore Niépce.

DES TENTATIVES POUR AMÉLIORER LE PROCÉDÉ

Claude Félix Abel Niépce de Saint Victor (1805-1870) prend la suite des travaux de Becquerel avec le double objectif de réduire le temps d'exposition et de fixer ces images photochromatiques. Pour cela, il teste de nombreuses solutions de sensibilisation de chlorures. Il travaille à produire des images dans la chambre photographique ; il réalise des prises de vue de gravures colorées,



Certains ont répliqué les expériences de Becquerel, d'autres ont apporté une explication théorique, d'autres enfin ont réfuté des hypothèses. Parmi eux, Gustav Friedrich Wilhelm Zenker (1829-1899) propose une explication interférentielle des couleurs des images photochromatiques, tout en donnant tort à ceux qui expliquent les couleurs par des épaisseurs variables de couches minces. Selon lui des plans de particules d'argent métallique seraient formés à intervalles réguliers dans la couche sensible lors de l'exposition à la lumière colorée, induisant des interférences constructives et destructives. Pour le chimiste et photographe William de Wiveleslie Abney (1843-1920), les images du spectre solaire qu'il produit sur un support transparent ont les mêmes couleurs en réflexion et transmission. Il s'oppose ainsi à une origine interférentielle et pense que les couleurs seraient dues à des produits d'oxydation et de réduction du sel d'argent constituant la couche sensible. Gabriel Lippmann (1845-1921), qui reçut le prix Nobel de physique en 1908 pour le procédé photographique couleur interférentiel, se positionne contre une origine interférentielle des images de Becquerel dans sa conférence de remise du prix. Depuis lors, l'hypothèse d'une origine physique des couleurs semblent pour autant avoir dominé la littérature. Récemment, une nouvelle hypothèse a été proposée, celle d'une origine plasmonique des couleurs. La caractérisation par spectroscopies et microscopies électroniques d'images photochromatiques répliquées en laboratoire a montré que les couches sensibles et colorées sont composées d'une matrice de grains de chlorure d'argent décorés de nanoparticules d'argent métallique. Les couleurs trouveraient leur origine dans les cortèges de nanoparticules métalliques, qui varient, en taille, forme et localisation selon les couleurs, du fait de leurs propriétés d'absorption plasmonique particulières [6, 7].

CONCLUSION

Edmond Becquerel s'inscrit ainsi dans une période foisonnante de recherche sur la lumière et d'innovations photographiques tout aussi marquantes. Sa

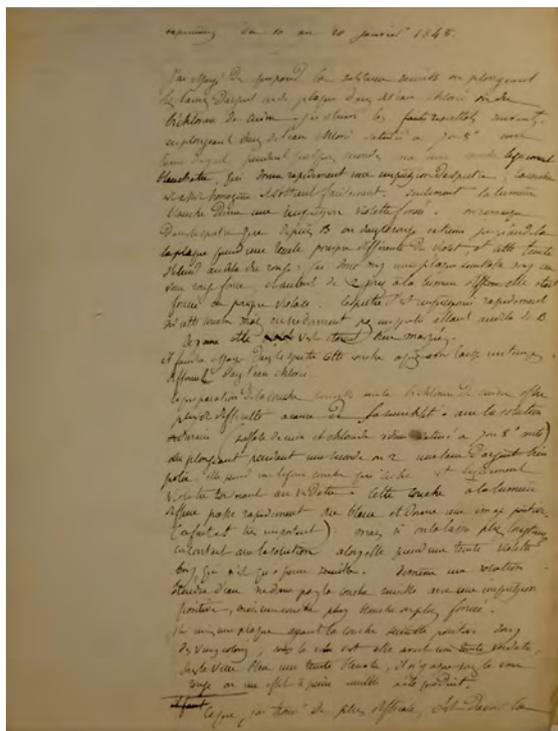


Figure 3. Edmond Becquerel, extrait de notes et expériences, feuillet daté du 20 janvier 1848. Description de la préparation de la plaque sensible et des teintes que celle-ci prend. Manuscrits du fonds Becquerel, bibliothèque centrale du Muséum national d'Histoire naturelle. © M.-A. Languille.

création continue d'intriguer jusqu'à nos jours. Souvent confondues avec les plaques interférentielles de Gabriel Lippmann, voire négligées depuis l'avènement de la photographie couleur trichromatique, les images photochromatiques demeurent la première réussite notable de la photographie en couleur. Bien que les récentes études

sur l'origine des couleurs de ces images semblent écarter les hypothèses pigmentaires et interférentielles, cet objet photographique continue d'exercer une certaine fascination auprès des scientifiques, des artistes photographes et des plasticiens et plasticiennes, notamment en raison de la nature éphémère de ces images [6]. ●

REFERENCES

[1] J. Fatet, « Les recherches d'Edmond Becquerel sur la nature de la lumière entre 1839 et 1843, histoire d'une interaction réussie entre science et photographie. », Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1, 2005.
 [2] B. Lavédrine, Support-Tracé **20**, 43 (2021).
 [3] E. Becquerel, « Chapitre IV. Reproduction des couleurs par l'action de la lumière », in La lumière, ses causes et ses effets. Tome second : Effets de la lumière. Livre III : Photographie, Paris: F. Didot frères, fils et Cie, 1867, p. 209-234.
 [4] E. de Saint-Ours, La photochromie : réception critique et développements (1848-1895), Mémoire de stage, Centre de Recherche sur la Conservation, Paris, 2015.
 [5] E. Becquerel, Comptes Rendus Hebd. Séances Académie Sci. **26**, 181 (1848).
 [6] T. de Seauve, « À l'origine des couleurs des images photochromatiques d'Edmond Becquerel : étude par spectroscopies et microscopies électroniques », Thèse de doctorat, Université Paris Sciences et Lettres, 2018.
 [7] V. Seauve et al., Angew. Chem. **132**, 9198 (2020).

DE L'IMPACT DU DÉSORDRE SUR L'APPARENCE VISUELLE DE SURFACES NANOSTRUCTURÉES

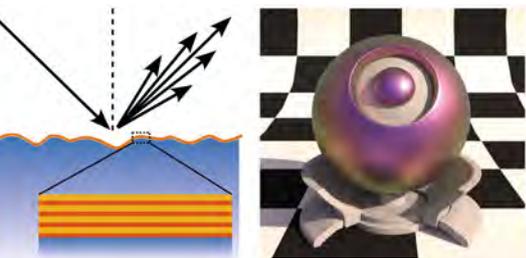
Kevin VYNCK^{1,*}, Gary FOURNEAU², Romain PACANOWSKI², Pascal BARLA², Philippe LALANNE³

¹ Institut Lumière Matière (iLM), Université Claude Bernard Lyon 1, CNRS, 69100 Villeurbanne, France

² Laboratoire Bordelais de Recherche en Informatique (LaBRI), Université de Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, INRIA, 33400 Talence, France

³ Laboratoire Photonique Numérique et Nanosciences (LP2N), Université de Bordeaux, Institut d'Optique Graduate School, CNRS, 33400 Talence, France

*kevin.vynck@univ-lyon1.fr



La compréhension des effets visuels créés par des nanostructures repose aujourd'hui largement sur des concepts acquis en optique des milieux stratifiés, périodiques et nano-objets résonants, négligeant souvent les irrégularités et les imperfections. En combinant modèles électromagnétiques et synthèse d'images, nous montrons ici que le désordre structural est essentiel à l'apparence visuelle d'un objet et que son ingénierie ouvre de nouvelles possibilités en termes de conception d'apparence.

<https://doi.org/10.1051/photon/202412434>

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

La nature nous offre de magnifiques apparences visuelles. Les plus resplendissantes d'entre elles, de l'iridescence des opales et des ailes de certains papillons aux couleurs vives de certains oiseaux et de certains fruits, proviennent pour la plupart d'effets d'interférences créées par des nanostructures. Ces dernières décennies ont assisté à l'émergence de nouvelles thématiques de recherche multidisciplinaire, visant à comprendre l'origine microscopique des effets visuels produits dans la nature, à reproduire ces effets en

structurant artificiellement la matière, et à en créer de nouveaux. L'apparence visuelle des milieux nanostructurés est aujourd'hui un champ de recherche au spectre applicatif large, allant de l'étude fondamentale des interactions visuelles entre espèces biologiques à la conception de matériaux produisant des effets visuels inédits.

Dans ce cadre, la préoccupation principale de la communauté en photonique a porté sur la capacité de surfaces nanostructurées à créer une large palette de couleurs structurales. Deux familles de nanostructures présentent un intérêt particulier : (i) les

milieux stratifiés planaires, composés de matériaux diélectriques ou métalliques, isotropes ou anisotropes, et dont les propriétés optiques reposent sur des interférences de couches minces ; et (ii) les métasurfaces, à savoir, des nano-objets à fort indice de réfraction arrangés souvent périodiquement sur un substrat, qui exploitent en premier lieu les résonances photoniques ou plasmoniques des nano-objets. Aujourd'hui, la compréhension des effets colorés obtenus se base essentiellement sur des concepts qui supposent que les nanostructures sont ordonnées, parfaites.

Le désordre, que l'on caractérise par des variations aléatoires des paramètres structurels, est pourtant omniprésent dans les structures naturelles et s'avère essentiel à leur apparence visuelle à l'échelle macroscopique [1].

Les effets attendus du désordre sont, d'une part, d'élargir le pic de réflectance spéculaire et, d'autre part, de produire une composante diffuse dans l'intensité réfléchi ou transmise, se traduisant ainsi par un aspect trouble ou mat des surfaces. Ce comportement a été mis en évidence dans le cadre d'études sur la diffusion des ondes par des surfaces rugueuses aléatoires [2]. Cependant, peu de travaux se sont intéressés jusqu'à présent à l'interaction entre phénomènes cohérents et désordre dans les nanostructures. Il s'avère que les outils de modélisation en photonique sont souvent peu adaptés à l'étude de structures spatialement étendues et désordonnées. Ceci est d'autant plus regrettable que l'ingénierie du désordre a récemment montré un fort potentiel pour améliorer la fonctionnalité de certains composants photoniques (e.g., l'absorption de lumière dans les cellules photovoltaïques) [3]. La physique des ondes dans les milieux complexes pourrait ouvrir de nouvelles perspectives en conception de l'apparence visuelle.

L'apparence visuelle d'un objet est difficile à quantifier en pratique, car celle-ci dépend non seulement de la réponse optique complète (spectrale et angulaire) du matériau en réflexion et en transmission, mais également de la forme macroscopique de l'objet et de son environnement [4]. La synthèse d'images, lorsqu'elle repose sur des lois physiques de l'interaction lumière-matière, offre la possibilité de prédire l'impact de tel ou tel paramètre du matériau sur l'apparence visuelle d'un objet et d'étudier comment cette apparence varie avec l'environnement lumineux et les conditions d'observation [5].

Cet article montre, par le biais d'exemples concrets sur des milieux stratifiés et des metasurfaces, l'impact du désordre structurel sur l'apparence visuelle de surfaces nanostructurées.

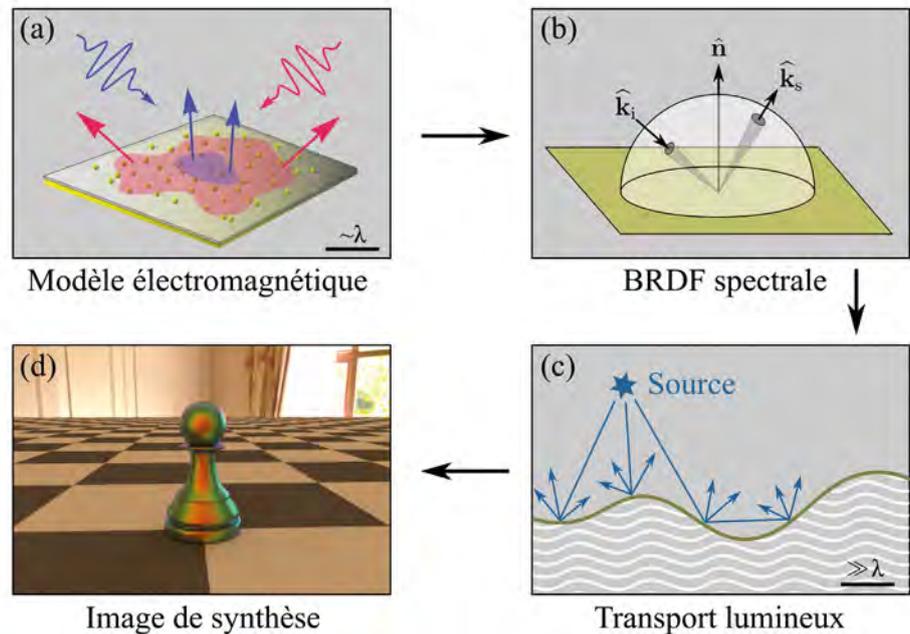


Figure 1. Illustration d'une approche directe pour la prédiction de l'apparence visuelle d'un objet macroscopique nanostructuré. Le problème est multi-échelle (la longueur d'onde est notée λ). (a) Un modèle électromagnétique est utilisé pour prédire les propriétés optiques d'une surface nanostructurée en prenant en compte les effets cohérents. (b) Une BRDF spectrale intégrant ces propriétés cohérentes pour la réflectance de la surface est définie, (c) puis utilisée dans un moteur de rendu spectral simulant le transport lumineux (incohérent) dans une scène virtuelle contenant l'objet macroscopique d'intérêt. (d) L'image de synthèse spectrale est convertie dans l'espace de couleur sRGB pour visualisation.

Modèles électromagnétiques et synthèse d'images sont combinés pour générer des rendus physico-réalistes d'objets macroscopiques nanostructurés en surface. La Fig. 1 illustre l'approche utilisée. La quantité radiométrique permettant de faire le lien entre les échelles microscopique et macroscopique est la fonction de distribution de la réflectivité bidirectionnelle (BRDF), une fonction multidimensionnelle qui décrit comment une surface redistribue angulairement une puissance incidente en réflexion. Pour des milieux désordonnés, la BRDF est obtenue par une moyenne statistique de la réponse électromagnétique du matériau [6].

MIROIRS DE BRAGG RUGUEUX

Les miroirs de Bragg sont des nanostructures qui présentent une modulation périodique de l'indice de réfraction dans une direction de

l'espace. Cette modulation périodique a pour conséquence d'ouvrir des bandes interdites photoniques dans le diagramme de dispersion. Dans des milieux composés de 2 matériaux d'indices de réfraction n_1 et n_2 et d'épaisseurs d_1 et d_2 , ceci se traduit par une réflectance forte autour de certaines longueurs d'onde λ_B (dites "de Bragg"), données par $m\lambda_B = 2(n_1d_1\cos\theta_1 + n_2d_2\cos\theta_2)$, où $m \in \mathbb{N}^*$ ($m = 1, 2, \dots$) est l'ordre de la bande interdite et θ_1 et θ_2 sont les angles de propagation dans les couches par rapport à la normale. On suppose généralement que les interfaces sont parfaitement planes et parallèles entre elles, mais il est commun dans la nature que celles-ci ne le soient pas.

Comme premier cas d'étude, nous considérons donc un miroir de Bragg dont la surface possède une rugosité aléatoire, décrite par une hauteur h qui fluctue dans le plan [Fig. 2(a)]. ●●●

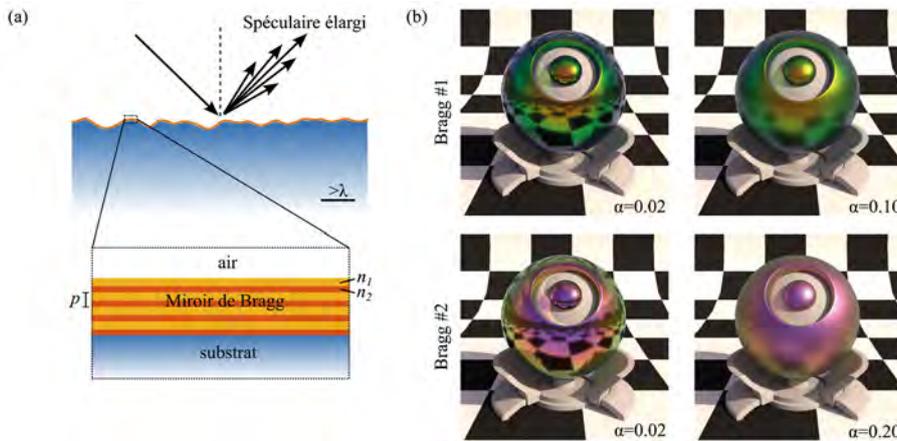


Figure 2. Impact d'une rugosité aléatoire sur l'apparence visuelle d'un miroir de Bragg. (a) Schéma simplifié de la structure considérée. La rugosité tend à élargir angulairement le pic de réflexion spéculaire. (b) Rendus prédictifs de l'apparence visuelle d'un objet sphérique, dont la surface est un miroir de Bragg rugueux de périodes (de périodicité $p = d_1 + d_2$) sur un substrat absorbant, en fonction du niveau de rugosité $\alpha \in [0, 1]$. L'environnement lumineux de l'objet est une scène extérieure en plein jour par temps clair (lumière directive). Les indices de réfraction et épaisseurs des couches sont, respectivement, $n_1 = 1,6$ et $n_2 = 1,5$, $d_1 = 93$ nm et $d_2 = 100$ nm pour le Bragg #1 (ligne du haut), et $n_1 = 1,4$ et $n_2 = 2,0$, $d_1 = d_2 = 200$ nm pour le Bragg #2 (ligne du bas).

Nous supposons que l'amplitude des variations de h est très inférieure à la distance d'auto-corrélation de h (approximation des faibles pentes), et que cette dernière est elle-même bien plus grande que la longueur d'onde. L'effet principal d'une telle rugosité est facile à intuitiver : à mesure que l'amplitude des fluctuations de la normale à la surface augmente, le pic de réflexion spéculaire, qui est une fonction δ de Dirac en l'absence de toute rugosité, s'élargit angulairement. Qu'en est-il donc de l'apparence visuelle de miroirs de Bragg rugueux ?

Faisons appel à la synthèse d'images pour répondre à cette question. Dans le cadre de l'approximation des faibles pentes, localement, les interfaces du miroir de Bragg restent parallèles entre elles et les épaisseurs des différentes couches invariées ; seule la normale à la surface subit une variation aléatoire, que l'on distribuera selon une distribution dite de Trowbridge-Reitz (GGX) dont la largeur est décrite par un paramètre de rugosité $\alpha \in [0, 1]$. Dans sa forme la plus élémentaire, qui néglige les inter-réflexions entre

différentes parties de la surface rugueuse, la théorie des microfacettes fournit une expression analytique de la BRDF [5]

$$f_r^{(\text{Bragg})}(\hat{\mathbf{k}}_s, \hat{\mathbf{k}}_i) = \frac{R(\hat{\mathbf{k}}_s, \hat{\mathbf{k}}_i)G(\hat{\mathbf{k}}_s, \hat{\mathbf{k}}_i)D(\hat{\mathbf{k}}_s, \hat{\mathbf{k}}_i)}{4\cos\theta_s\cos\theta_i}$$

où R est le terme de réflectance de la surface plane, G décrit un phénomène d'ombrage dû à la géométrie et D décrit la distribution des normales $\hat{\mathbf{n}}$ de la surface rugueuse. $\hat{\mathbf{k}}_s$ et $\hat{\mathbf{k}}_i$ sont respectivement les vecteurs d'onde unitaires pour les ondes incidente et diffusée, voir la Fig. 1(b), et la dépendance en longueur d'onde (ou fréquence) est implicite. Dans l'Eq. (1), les effets d'interférences de couches minces sont pris en compte directement dans la fonction R , qui peut être évaluée avec une méthode matricielle classique. Des images de synthèses spectrales sont obtenues par un algorithme Monte Carlo simulant les trajectoires de rayons lumineux à chaque longueur d'onde, puis sont converties dans l'espace de couleur sRGB pour visualisation.

Les rendus sont donnés en Fig. 2(b) pour un même objet sphérique placé

dans un environnement lumineux permettant d'apprécier distinctement les effets d'interférences de couches minces et l'effet de la rugosité, et ce dans plusieurs cas. On modélise deux miroirs de Bragg à faible et fort contraste d'indice de réfraction, d'épaisseur finie, sur un substrat absorbant, et pour différents niveaux de rugosité. Du fait des différents paramètres de structure, les couleurs structurales produites par les miroirs de Bragg sont très distinctes et leur variation angulaire (appréciable en observant les différentes parties de l'objet courbé) est loin d'être triviale. Tout d'abord, la rugosité produit l'effet de flou attendu ; l'environnement de l'objet observé en réflexion spéculaire sur celui-ci est de plus en plus difficile à percevoir à mesure que la rugosité augmente. Plus intéressant, la rugosité affecte le nombre de franges de couleur ainsi que leur saturation, agissant comme un filtre passe-bas qui rend la réponse de l'objet moins sensible à l'angle d'incidence. Nous montrons ainsi que la rugosité de surface, même de faible amplitude, a un impact significatif sur l'apparence visuelle d'un objet et devrait être pris en compte dans les études sur le sujet.

MÉTASURFACES DÉSORDONNÉES

Les métasurfaces sont traditionnellement des arrangements planaires et ordonnés de nano-objets à fort indice de réfraction. Leurs propriétés optiques reposent souvent sur les résonances (photoniques, plasmoniques) de nano-objets individuels, qui produisent des réponses généralement piquées spectralement et angulairement, conduisant ainsi naturellement à des couleurs structurales en réflexion et transmission. Les résonances sont modifiées par l'interaction électromagnétique entre nano-objets voisins. Dans le cas de structures périodiques avec des cellules élémentaires simples (comptant un ou quelques nano-objets), des calculs numériques avec des outils classiques en nanophotonique

(RCWA, FDTD, etc.) peuvent être menés sans difficulté majeure pour prédire ces mêmes spectres.

Le cas d'ensembles désordonnés de nano-objets résonants dans un milieu planaire [Fig. 3(a)] est bien plus difficile à traiter par des simulations rigoureuses et la réponse optique de telles surfaces est plus difficile à intuitiver en raison du processus de diffusion multiple entre nano-objets [3]. Comme nous le verrons ci-dessous, un arrangement planaire désordonné de nano-objets se traduit par l'émergence d'une réponse optique diffuse significative, au comportement spectral et angulaire très différent de la réponse observée pour un empilement de couches minces rugueuses.

Le point essentiel pour aborder le problème est le développement d'un modèle théorique de BRDF pour des métasurfaces désordonnées. Nous utilisons ici un modèle approché développé dans [7], qui s'avère toutefois suffisamment précis pour obtenir une prédiction fiable de l'apparence visuelle d'objets macroscopiques nanostructurés. Dans le modèle, l'intensité diffusée par une métasurface est séparée en deux contributions distinctes : une contribution spéculaire avec une réponse angulaire décrite

par une distribution de Dirac, et une contribution diffuse avec une réponse angulaire couvrant l'hémisphère en réflexion. Cette dernière peut s'écrire

$$f_{r,diff}^{(metasurface)}(\hat{\mathbf{k}}_s, \hat{\mathbf{k}}_i) = \rho \frac{d\sigma_s^{(1)}}{d\Omega}(\hat{\mathbf{k}}_s, \hat{\mathbf{k}}_i) \times S(\hat{\mathbf{k}}_s, \hat{\mathbf{k}}_i) \frac{C(\hat{\mathbf{k}}_s, \hat{\mathbf{k}}_i)}{\cos\theta_s \cos\theta_i}$$

où ρ est la densité surfacique de nano-objets (en μm^{-2}), $d\sigma_s^{(1)}/d\Omega$ est la section efficace différentielle de diffusion d'un nano-objet individuel, S est le facteur de structure statique, qui décrit l'effet des corrélations spatiales entre paires de nano-objets sur la diffusion, et C est un facteur lié à l'interaction électromagnétique entre nano-objets. La force d'un tel modèle approché vient du fait qu'il sépare explicitement les contributions des nano-objets individuels (via $d\sigma_s^{(1)}/d\Omega$) et d'un désordre possiblement corrélé (via S), facilitant grandement la compréhension physique.

Des rendus pour le même objet sphérique dans le même environnement sont générés pour des arrangements désordonnés de particules sphériques sur un substrat de verre absorbant. On considère, en Fig. 3(b), des particules de silicium (Si) pour deux rayons, $r = 60$ nm et $r = 90$ nm, et sans contrôle de la

corrélacion structurelle, et en Fig. 3(c), des particules d'argent (Ag) à un rayon fixe mais avec un contrôle de la corrélacion structurelle.

Notons tout d'abord que l'image de l'environnement observée en réflexion spéculaire est nette, contrairement au cas des miroirs de Bragg rugueux, en raison du caractère angulairement piqué (distribution de Dirac) du terme spéculaire. L'effet principal du désordre est d'ajouter à la composante spéculaire une composante diffuse, qui se traduit, dans le cas des métasurfaces de la Fig. 3(b), par une coloration de fond de l'objet. On observe également que la couleur de la composante spéculaire diffère sensiblement de la couleur de la composante diffuse. Cela est dû au fait que la monocouche de particules se comporte comme une couche effective homogène pour la composante spéculaire, donnant lieu à des interférences de couches minces, alors que la composante diffuse est essentiellement donnée par la réponse optique d'une particule (via $d\sigma_s^{(1)}/d\Omega$). La variation de la couleur diffuse avec la taille des particules s'explique par le décalage en fréquence des résonances (de Mie) des particules individuelles.

SPECTROGON

State of the art products

Filtres Interférentiels

De 200 à 15000 nm

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



Réseaux Holographiques

De 150 à 2000 nm

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



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

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

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

www.spectrogon.com

Pour les métasurfaces de la Fig. 3(c), la résonance (plasmonique) des particules d'argent est spectralement large. Cela produit une couleur diffuse grisâtre. Toutefois, un contrôle de la corrélation structurale à courte portée, obtenue en définissant une distance minimale de séparation des particules entre elles, produit un effet spectaculaire sur la composante diffuse. Dû aux corrélations structurales, cette dernière est fortement diminuée pour des angles d'observation proches de la direction spéculaire, et amplifiée à des angles plus élevés. La position angulaire de ce lobe de diffusion dépend de la longueur d'onde, ce qui conduit à un dégradé « arc-en-ciel » autour du spéculaire. Plus impressionnant encore, la zone sombre entourée d'un halo diffus coloré suit, sur l'objet, la position de la source lumineuse en réflexion spéculaire. Cet effet, prédit théoriquement et démontré expérimentalement dans [7], illustre parfaitement le potentiel d'une ingénierie du désordre pour créer des apparences visuelles nouvelles.

CONCLUSION

Évaluer l'impact du désordre dans les surfaces nanostructurées sur leur apparence visuelle à l'échelle macroscopique est essentiel tant pour comprendre la fonctionnalité des structures photoniques naturelles dans la faune et la flore que pour réaliser des matériaux produisant de nouveaux effets visuels. Le rendu prédictif, basé sur une description électromagnétique de l'interaction lumière-matière, s'avère être un outil précieux pour investiguer cette problématique. Nous avons présenté ici de premiers cas d'études montrant l'effet de deux types de désordre distincts – (i) une rugosité de surface avec une corrélation latérale très supérieure à la longueur d'onde et (ii) un ensemble désordonné de particules résonantes déposées sur une surface plane avec un désordre corrélé – sur leur apparence visuelle. Une telle méthodologie pourrait être développée pour

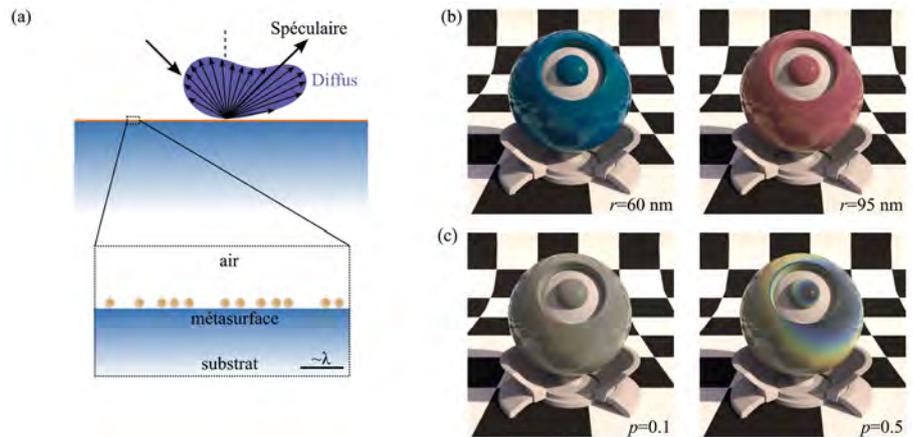


Figure 3. Impact du désordre sur l'arrangement des nano-objets résonants sur l'apparence visuelle des métasurfaces. (a) Schéma simplifié de la structure considérée. L'intensité réfléchie peut être décomposée en une composante spéculaire et une composante diffuse. (b)-(c) Rendus prédictifs de l'apparence visuelle d'un objet sphérique dont la surface est une métasurface désordonnée, consistant en un ensemble désordonné de particules sphériques sur un substrat de verre absorbant. L'environnement lumineux de l'objet est le même que dans la Fig. 2. La métasurface en (b) est composée de particules de Silicium de rayon r que l'on fait varier, déposées à un taux de recouvrement surfacique $f = 0,10$ avec un degré de corrélation structurale $p = 0,1$. La métasurface en (c) est composée de particules d'argent de rayon $r = 90$ nm déposées à un taux de recouvrement surfacique $f = 0,10$ et avec un degré de corrélation structurale p que l'on fait varier.

traiter d'autres cas de grand intérêt aujourd'hui, tels que les structures désordonnées corrélées observées chez certains oiseaux et insectes, ou encore les matériaux cholestériques à base de cellulose. Une compréhension solide du lien étroit entre nanostructuration et apparence visuelle pourrait permettre, à terme, de considérer des

problèmes de conception inverse, à savoir déterminer une nanostructuration permettant d'obtenir une apparence visuelle désirée. Cette voie, dans laquelle nous nous engageons, nécessitera cependant l'élaboration de modèles de BRDF plus intuitifs et qui dépendent de moins de paramètres que ceux présentés ici [3]. ●

RÉFÉRENCES

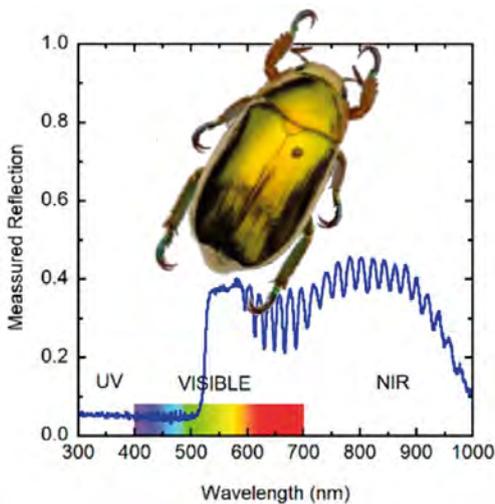
- [1] S. Kinoshita, S. Yoshioka, *Chem. Phys. Chem.* **6**, 1442 (2005).
- [2] P. Beckmann, A. Spizzichino, *The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces* (Norwood, 1987).
- [3] P. Lalanne *et al.*, arXiv preprint, arXiv:2310.14349 (2023).
- [4] P. Boulenguez, L. Simonot, S. Carré, Apparence visuelle : quelques clés pour comprendre, in *Quand la matière diffuse la lumière*, eds. L. Simonot, P. Boulenguez (Presses des Mines, 2019).
- [5] M. Pharr, W. Jakob, G. Humphreys. *Physically based rendering: from theory to implementation*, 4th ed. (MIT Press, 2023).
- [6] P. Chavel *et al.*, *J. Phys.: Conf. Ser.* **2149**, 012013 (2022).
- [7] K. Vynck *et al.*, *Nat. Mater.* **21**, 1035 (2022)

LES COULEURS STRUCTURELLES DES CRISTAUX LIQUIDES BIOLOGIQUES

Michel MITOV*

Université Côte d'Azur, CNRS – INPHYNI, Institut de Physique de Nice, 17 rue Julien-Lauprêtre, 06200 Nice

*michel.mitov@univ-cotedazur.fr



Chitine, collagène et cellulose peuvent s'organiser en cristal liquide cholestérique. Sa structure torsadée confère aux carapaces des scarabées, écailles de poissons, plantes et fruits irisés des propriétés de réflexion sélective et de polarisation circulaire dépendantes des caractéristiques physiques de la torsion.

<https://doi.org/10.1051/photon/202412439>

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

La couleur dans la nature a trois principales origines : les pigments, la structure et la bioluminescence. Les couleurs pigmentaires sont les plus répandues. Des pigments absorbent une partie de la lumière et les couleurs complémentaires sont observées, par réflexion diffuse généralement. Les couleurs structurelles sont des couleurs interférentielles provenant de la dispersion sélective de la lumière par une structure périodique. Parmi ces arrangements figurent les organisations torsadées de nanofibrilles de chitine, collagène et cellulose rencontrées dans des carapaces d'insecte, majoritairement des scarabées, des écailles de poisson, la surface de

plantes et fruits (Figure 1a–d) [1, 2]. Tous ces objets biologiques, appartenant à des phylums éloignés, possèdent une propriété commune : l'iridescence. L'iridescence, ou irisation, est propre à un matériau dont la teinte change avec l'angle de vue ou l'orientation de l'éclairage. C'est le cas d'une bulle de savon, de l'aile d'un papillon du genre *Morpho*, du plumage d'un oiseau et de ces organisations torsadées qui sont celles des cristaux liquides cholestériques, découverts en 1888 dans des dérivés du cholestérol extraits de la carotte. Dans un cholestérique synthétique, les molécules, généralement de forme allongée, s'organisent sans ordre de position et avec un ordre moyen d'orientation. Cette orientation tourne

continûment selon un axe perpendiculaire au grand axe des molécules en décrivant une hélice (Figure 1e). La structure présente deux sélectivités optiques. Elle réfléchit sélectivement la lumière (réflexions de Bragg). A incidence normale, la longueur d'onde de réflexion est le produit de l'indice optique moyen du milieu par le pas hélicoïdal. Régler le pas revient à régler la couleur. La seconde sélectivité est liée à la polarisation circulaire de la lumière réfléchie. Lorsqu'une lumière non polarisée éclaire à incidence normale un cholestérique, la moitié du flux est au maximum réfléchi et polarisée circulairement avec un sens identique à celui de l'hélice. L'autre moitié est transmise et polarisée avec un sens inverse. À la réflexion, ●●●

il n'y a donc pas de renversement du sens de l'onde circulaire, comme ce serait le cas avec un miroir ordinaire, ce qui est spécifique aux miroirs cholestériques. A incidence oblique, la longueur d'onde est décalée vers les basses longueurs d'onde (*blueshift*) et la lumière est polarisée elliptiquement. Un cholestérique est en même temps un filtre, un miroir semiréfléchissant, un polariseur circulaire par séparation de faisceau et, hors de la bande de Bragg, un rotateur optique. Ces propriétés sont présentes dans les cholestériques biologiques. Une différence réside dans la nature de l'objet élémentaire dont une assemblée s'organise en hélice : ce ne sont pas des molécules mais des nanofibrilles constituées, en faisceau, d'un grand nombre de macromolécules. La figure 2 illustre les six niveaux de l'organisation hiérarchique avec l'exemple du squelette externe, ou cuticule, du homard américain — du motif de N-acétylglucosamine à l'échelle macroscopique. La structure torsadée est au sixième niveau. Elle porte le nom de *contreplaqué torsadé*, selon le modèle dû en 1965 au biologiste Yves Bouligand (1935-2011) qui consacra sa vie scientifique aux cristaux liquides de la nature et à la morphogenèse. L'organisation cholestérique, dans les cristaux liquides biologiques comme synthétiques, est continue. La schématiser sous forme de couches distinctes, une couche subissant une rotation d'un angle constant par rapport à ses voisines, est un artéfact, une commodité de représentation. Les couches n'ont pas de réalité physique.

SCARABÉES

Les scarabées irisés du genre *Chrysina* présentent une organisation torsadée des fibrilles de chitine, avec un spectre de couleurs vives du vert brillant à des teintes métalliques or ou argent, ces dernières étant des miroirs spéculaires large bande résultant d'un gradient de pas hélicoïdal dans l'épaisseur de la cuticule (Figure 3). La réflexion peut couvrir tout le spectre visible, en provenance de la partie supérieure

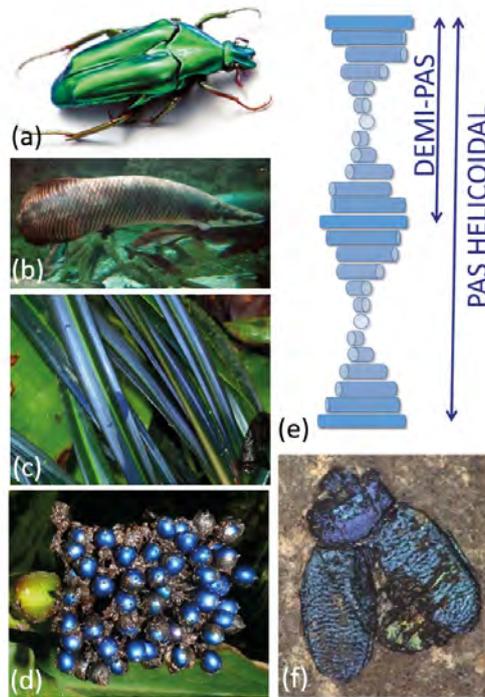


Figure 1. (a) *Chalcothea smaragdina* (© B. D. Wilts, Univ. of Salzburg, Austria). (b) *Arapaima gigas* (Shizao, CC BY-SA 3.0). (c) *Mapania caudata* (© P. Blanc, verticalgardenpatrickblanc.com). (d) *Pollia condensata* (J. Costa, CC BY-SA 3.0). (e) Structure hélicoïdale d'un cristal liquide cholestérique fait de molécules-bâtonnets. (f) Fossile de scarabée de la famille des *Chrysomelidae* (© 2011 The Royal Society. E. McNamara et al., Proc. R. Soc. B **279**, 1114, 2012).

de la cuticule (exocuticule), jusqu'à l'infrarouge pour la partie inférieure (endocuticule) [3]. Pour cette dernière, l'hypothèse d'une fonction de régulation thermique est avancée. Pour le camouflage, le scarabée ne serait pas vu en réfléchissant son environnement. Un réflecteur large bande présente une moindre dépendance de sa signature en fonction de la direction d'observation lorsque la réflexion s'opère sur un spectre entier de longueurs d'onde. L'éblouissement d'un réflecteur métallique pourrait également aveugler temporairement un prédateur et permettre au coléoptère de s'échapper. L'aposématisme, nom donné aux techniques adoptées par l'animal pour éviter son prélèvement par un prédateur, relève d'une coloration d'avertissement : le consommateur sera désagréable ou toxique — ce qui

est parfois un leurre. Lorsque la dépendance angulaire de la couleur réfléchie est présente, elle ralentit ou entrave le processus de reconnaissance par un prédateur. Le contraste élevé résultant des variations rapides de la couleur au moment où le scarabée s'envole lui permet de s'échapper. Formuler une hypothèse de fonction doit être accompagné de l'étude du système visuel de l'animal et de ses prédateurs, et des conditions d'éclairage et caractéristiques optiques de l'habitat (sol, feuillage). Les humains ont une vision trichromatique. Les insectes ont une vision tétrachromatique ou pentachromatique. Leur système visuel et leur cerveau sont capables de percevoir la lumière polarisée. La sensibilité à la polarisation circulaire pourrait permettre aux coléoptères de communiquer avec leurs congénères tout en se cachant de prédateurs dont la vision ne serait pas capable de détecter la lumière polarisée circulairement. Alors que la lumière polarisée linéairement est présente dans la nature, la production de lumière polarisée circulairement est limitée à seulement quelques groupes d'organismes comme les scarabées et les stomatopodes (ordre de crustacés nageurs). Sa perception pourrait jouer un rôle dans la signalisation animale, servir de canal de communication sélectif vers des cibles spécifiques qui y sont sensibles, tels des partenaires sexuels, et être utilisée pour la navigation et l'orientation. Qu'il n'existe pas d'angle préférentiel sous lequel la polarisation doit être détectée est un avantage. Les animaux peuvent envoyer et recevoir des signaux quelle que soit leur orientation respective, la directionnalité de la lumière polarisée linéairement représentant un défi : les orientations de l'émetteur et du récepteur doivent être coordonnées. La lumière réfléchie par les cholestériques biologiques est circulaire gauche, à une exception près, traitée ci-après, comportant simultanément la gauche et la droite.

Les insectes et les humains ont des préoccupations communes en termes de régulation énergétique, de communication optique et de camouflage.

Concernant les deux dernières fonctions, la fabrication d'échantillons biomimétiques est pertinente pour concevoir des tags dans le domaine de la cryptographie, du chiffrement et les technologies anti-contrefaçon (billets de banque, œuvres d'art, médicaments en ayant recours à des tags cellulose comestibles). De nombreux insectes irisés présentent une variété de couleurs et de motifs (stries, spots, pixels) résultant de la variation du pas hélicoïdal en amplitude et dans l'espace, à des échelles nanométrique et mésoscopique. Chercher à reproduire ces torsions complexes permettrait de fabriquer des composants optiques pour, à petite échelle, rediriger, réfracter, réfléchir, diffuser, polariser la lumière et contrôler la phase de l'onde réfléchie en fonction de la phase spatiale de l'hélice.

Puisque la couleur peut être modifiée en changeant le pas et l'orientation de l'axe hélicoïdal sans avoir à sécréter un nouveau matériau, la pression sélective est plus faible en retour, ce qui pourrait expliquer le succès de la structure cholestérique au fil de l'évolution. Des fossiles de scarabées irisés datant de 40 à 50 millions d'années ont été retrouvés (Figure 1f). Les premiers réflecteurs identifiés dans la matière vivante — des réseaux de

diffraction — ont 515 millions d'années. Les couleurs structurelles dans le monde vivant sont permanentes, elles ne se dégradent pas en blanchissant rapidement comme les couleurs pigmentaires. Les conditions de fossilisation et la conservation doivent être exceptionnelles. C'est le cas du site de Messel, en Allemagne, connu à ce titre. L'arrivée de la vision a provoqué l'explosion cambrienne, autour de 539 millions d'années, marquant l'apparition des premiers animaux possédant des pattes articulées et un squelette. La vision aurait constitué une pression de sélection. L'évolution de l'œil pourrait expliquer le changement d'apparence des animaux au Cambrien inférieur. Ils se seraient dotés de réflecteurs colorés pour être visuellement adaptés.

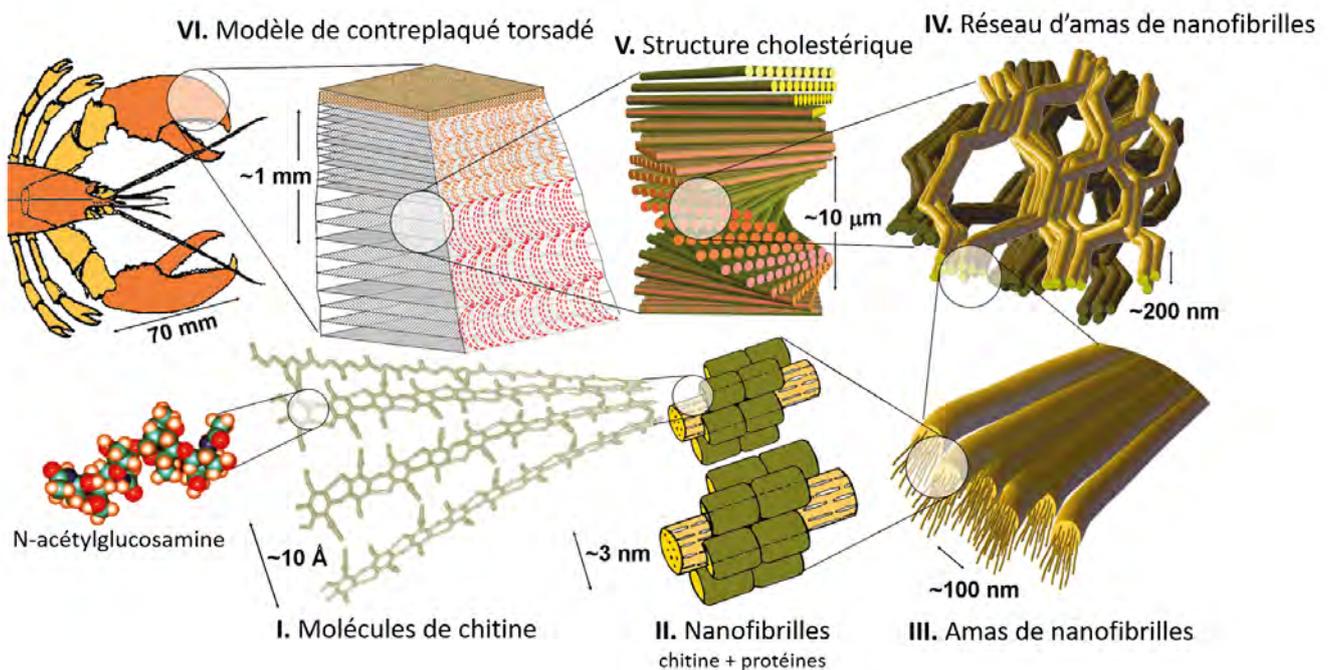
Au-delà de ces hypothèses de fonctions, ne manquons pas de rappeler qu'il est des auteurs considérant que la

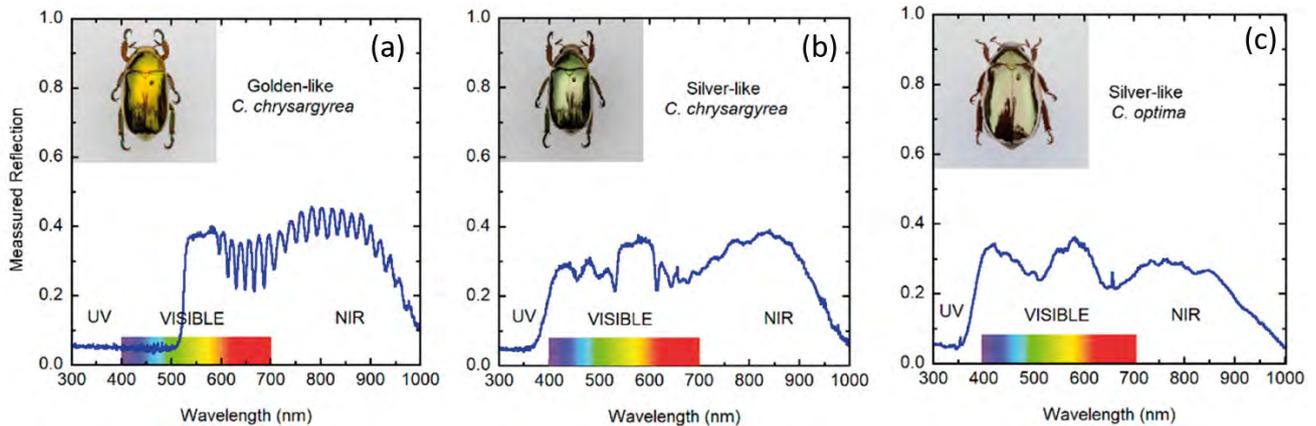
coloration structurelle dans la nature ne pourrait être qu'une conséquence fortuite de l'évolution d'une structure périodique.

POISSONS ET CRUSTACÉS

Les structures réfléchissantes des écailles en collagène cholestérique de certains poissons pourraient permettre de communiquer avec leurs congénères des informations sur les positions relatives, les orientations et les mouvements entre voisins au sein d'un banc. Les taches argentées sur la queue et les nageoires pectorales peuvent devenir claires ou foncées selon le mouvement, et les couleurs des flancs ventraux changer du rouge vif au bleu selon la direction de visualisation. L'armure argentée jouerait un rôle dans le camouflage en eau claire, la réflexion large bande l'assurant dans des conditions de lumière diffuse. Les études sur le rôle et les propriétés du ●●●

Figure 2. Organisation hiérarchique de la carapace de *Homarus americanus* révélant six principaux niveaux. (I) Ensemble de molécules de chitine ayant une orientation parallèle moyenne. (II) Arrangements de 18 à 25 molécules autour desquels s'enroulent des protéines, formant des nanofibrilles de 2 à 5 nm de diamètre et 300 nm de longueur. (III) Amas de nanofibrilles en fibres longues de 50 à 300 nm de diamètre. (IV) Réseau planaire en nid d'abeille de ces amas. L'espace entre les brins est rempli de protéines et de minéraux. Ce réseau est le motif de base formant la structure cholestérique. (V) Structure cholestérique. (VI) À l'échelle millimétrique : modèle de contreplaqué torsadé avec motifs d'arcs vus en coupe oblique. Adapté de : D. Raabe *et al.*, *Acta Mater.* **53**, 4281 (2005). © 2005 Elsevier Ltd.





collagène cholestérique dans le monde marin restent peu nombreuses comparativement à celui des insectes.

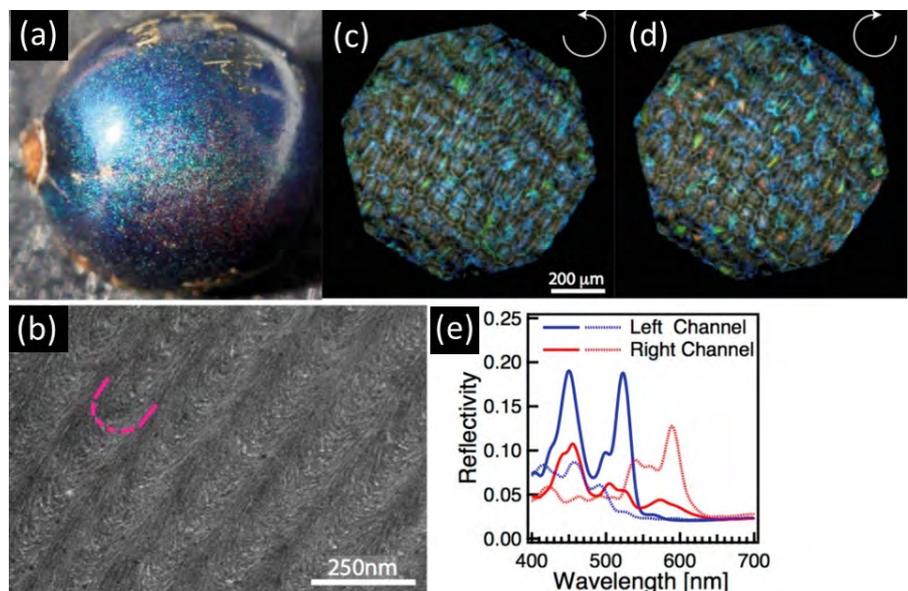
Les carapaces des crustacés ne sont généralement pas irisées car l'arrangement torsadé des fibrilles de chitine n'est pas suffisamment ordonné. Quelques couleurs légèrement irisées dans une exocuticule terne sont visibles chez le Crabe royal. L'endocuticule a une structure torsadée avec un degré d'ordre meilleur que l'exocuticule, mais l'organisation des fibres devient progressivement moins ordonnée de l'intérieur vers l'extérieur.

PLANTES ET FRUITS

La couleur structurelle a été principalement étudiée dans le règne animal et peu dans le règne végétal où les recherches se sont concentrées sur l'analyse des pigments produisant la coloration soustractive. Les plantes irisées se trouvent souvent dans les forêts sombres et sous les latitudes tropicales. L'irisation des feuilles, des fruits et des pétales se produit sur différentes gammes spectrales perceptibles par une variété d'animaux, UV inclus. La structure cholestérique rend les plantes attrayantes pour les pollinisateurs. Les bourdons pourraient utiliser l'irisation comme un signal de détection des fleurs. L'affichage coloré des fruits attire oiseaux et mammifères et leur fera disperser ailleurs les graines, en assurant la perpétuation de l'espèce. *A contrario*, des herbivores peuvent être dissuadés de consommer;

Figure 3. Spectres expérimentaux de la réflectance des miroirs de scarabées du genre *Chrysina* en lumière incidente non polarisée : (a) *C. chrysargyrea* or. (b) *C. chrysargyrea* argent. (c) *C. optima* argent. L'élytre dorée de *C. chrysargyrea* présente une large bande de réflexion de 525 à 1000 nm, incluant des oscillations périodiques à partir de 600 nm (reliées à la variation quasi-parabolique du pas dans l'épaisseur de la cuticule). La réflexion débute dans l'UV et s'étale de 350 à 1000 nm pour les scarabées argentés. Plusieurs pics sont présents au début du visible pour l'élytre argentée de *C. chrysargyrea*, avec un plateau entre 540 et 610 nm, signe d'un pas hélicoïdal variant peu dans une partie de l'épaisseur de la cuticule. Le spectre de *C. optima* présente deux pics élargis dans le domaine visible. La réflexion s'évanouit progressivement pour les trois scarabées à l'approche de 1000 nm. Adapté de : W. E. Vargas *et al.*, *Biomimetics* **3**, 30 (2018). © 2018 by the authors (CC BY 4.0).

Figure 4. (a) Fruit *Pollia condensata* (diamètre moyen = 5 mm). (b) Image de microscopie électronique à transmission d'une section transversale montrant la texture périodique en arcs emboîtés (un arc est rehaussé en rose), tels que ceux représentés au niveau VI de la figure 2, révélatrice de l'organisation cholestérique de la cellulose. (c, d) Images de microscopie à épi-illumination (l'épicarpe est éclairé à travers l'objectif servant à l'imager, lequel joue également le rôle de condenseur) en utilisant un polariseur circulaire gauche (c) ou (d) droit. La coloration pointilliste provient de motifs cellulaires ayant différentes couleurs. (e) Spectres de réflexion de deux cellules différentes (lignes continues et interrompues) collectés dans deux canaux correspondant à une lumière incidente polarisée circulairement gauche et droite. © 2014 The Royal Society [4].



la variation de couleur avec l'angle de vue pouvant corrompre l'identité de l'objet. La coloration pourrait également n'être visible que par certaines espèces d'insectes. Une aide à la gestion lumineuse serait offerte aux plantes pour la photo-protection ou, a contrario, en focalisant le flux sur les chloroplastes. Les feuilles de *Selaginella willdenowii* produisent une irisation entre spectres UV et visible. Elle pourrait faciliter la capture de longueurs d'onde actives pour la photosynthèse dans des conditions de faible luminosité, en agissant comme un revêtement antireflet. Celui-ci produirait des interférences constructives pour certaines longueurs d'onde en exaltant leur transmission, et d'autres seraient réfléchies lors d'interférences destructrices.

Mapania caudata est une plante d'une forêt tropicale humide de Malaisie qui fournit un cas inhabituel de cellulose cholestérique enrichie de nanoparticules de silice. Encapsulées dans une structure hélicoïdale à gradient de pas, elles produisent une irisation bleue, supprimée lors de leur élimination chimique en laboratoire.

La couleur brillante, métallique, des fruits de la plante africaine *Pollia condensata* (Figure 1d et Figure 4a) provient de la cellulose cholestérique (Figure 4b). L'épicarpe, la peau du fruit la plus externe, présente des motifs cellulaires au microscope (Figure 4c et d) [4]. L'irisation pixellisée du fruit, avec des taches bleues, vertes et rouges, est révélée par épi-illumination à l'aide de filtres à polarisation circulaire (Figure 4e). Chaque pixel est en fait doublé en deux pixels ayant l'un une structure gauche et l'autre une structure

droite, ce qui dépasse la limite de 50% de l'intensité réfléchie pour chaque coloration. Cette double hélicité ajoutée à l'existence de différentes couleurs fait de *Pollia condensata* l'organisme terrestre le plus brillant connu à ce jour. L'intense brillance se maintient des décennies après la chute du fruit, augmentant dans le temps la probabilité d'attirer un animal, en lui offrant néanmoins un gain nutritif faible par rapport à ses espérances visuelles si le fruit est anciennement détaché.

La lumière joue un rôle majeur dans la vie végétale. Les couleurs structurelles y sont probablement fréquentes, mais nous ne disposons que d'une connaissance limitée sur leur distribution, leur développement et leur fonction. La photonique des plantes [5] est certainement un domaine de recherche à approfondir.

CONCLUSION

L'organisation torsadée est une conception récurrente dans les règnes animal et végétal. Les scarabées utiliseraient les propriétés uniques des cholestériques pour la signalisation sociale intra- ou inter-espèces, se camoufler ou avertir les prédateurs, perturber leur système visuel lors de leur fuite. Une thermorégulation IR pour les coléoptères diurnes et les crabes séjournant sur la plage est évoquée. Un rôle de communication optique également est avancé pour les poissons et faciliter leur navigation en banc. La photo-protection serait accordée aux plantes adaptées aux faibles luminosités, et l'attractivité visuelle des plantes en général leur assure d'être pollinisées et consommées. ●

RÉFÉRENCES

- [1] R. R. da Rosa, S. N. Fernandes, M. Mitov, M. H. Godinho, Adv. Funct. Mat., 2304286 (2023).
- [2] M. Mitov, Soft Matter, 13, 4176 (2017).
- [3] A. C. Neville, "Biology of the Arthropod Cuticle", Springer-Verlag (1975).
- [4] B. D. Wilts, H. M. Whitney, B. J. Glover, U. Steiner, S. Vignolini, Mat. Today: Proc. 15, 177 (2014).
- [5] D. Lee, "Nature's Palette: The Science of Plant Color", The University of Chicago Press (2007).

SCIENTEC
La Solution à vos mesures

PHOTOMÉTRIE

Colorimétrie - Radiométrie

MESURE ET ÉVALUATION DE TOUTES
LES SOURCES LUMINEUSES

Éclairage, luminance, chromaticité,
indice de rendu des couleurs IRC,
température de couleur, valeurs
spectrales, longueurs
d'ondes crête et
dominante, pureté
d'excitation...

APPAREILS
PORTABLES
DE HAUTE
QUALITÉ
À PRIX
ABORDABLE

► Luxmètre
Chromamètre
CL-200A
Polyvalent & léger,
R&D et production...

► Luxmètre
spectroradiomètre
CL-70F
Économique &
performant. Tactile et
portable. Tête de mesure
rotative...

► Photomètre
Chromamètre
CS-150/160
Précision et convivialité,
luminance et couleur,
contrôle qualité...

► Photomètre
Chromamètre
à réseau CS-200
Luminance et
chromaticité
compact et précis



ScienTec c'est aussi,
du SAV, de la formation, de la
calibration et la distribution de :
Analyseur d'écran, Photogonio-
mètres, Vidéocolorimètres,
Sources de référence...

info@scientec.fr 01 64 53 27 00 www.scientec.fr

TROIS IMAGES EN UNE : COMMENT LA NANOPHOTONIQUE RÉVOLUTIONNE LE CONCEPT D'IMAGE IMPRIMÉE

Nicolas DALLOZ¹, Mathieu HEBERT², Nathalie DESTOUCHES^{2,*}

¹ HID Global CID SAS, 31-33 rue de Verdun, 92150 Suresnes

² UJM-Saint-Etienne, CNRS, Institut d'Optique Graduate School, Laboratoire Hubert Curien UMR 5516, Saint-Etienne, France

*nathalie.destouches@univ-st-etienne.fr



Le traitement par laser de films photosensibles contenant des nanoparticules métalliques permet de produire de manière contrôlée des centaines de milliers de nanostructures, affichant chacune une palette de couleurs variées suivant l'angle de vue et d'éclairage. Un choix judicieux parmi ces nanostructures permet d'afficher différentes images au même endroit d'un support, une révolution dans le domaine de l'impression qui intéresse l'industrie des documents sécurisés.

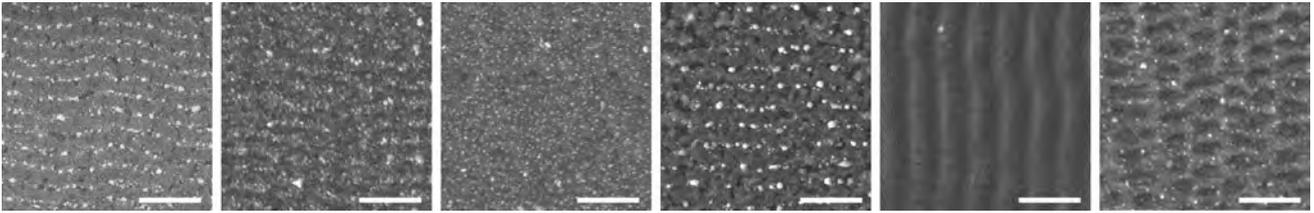
<https://doi.org/10.1051/photon/202412444>

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.

Depuis des millénaires, les techniques permettant de produire des images en couleur (dessin, peinture, gravure, estampe, impression, etc.) reposent presque toutes sur le principe d'appliquer des matières colorantes sur un support opaque, ce dernier étant chargé de réfléchir la lumière colorée vers l'observateur. On trouve quelques exceptions comme le vitrail, où

l'image se produit plutôt par transmission de la lumière à travers des pièces colorées juxtaposées, mais dans tous les cas, l'objet est conçu pour afficher une image unique aux couleurs restant relativement stables quel que soit l'angle de vue ou d'éclairage. Poussées par une industrie de l'impression sécurisée en quête d'effets visuels marquants pour des documents difficiles à contrefaire, de nouvelles technologies ont émergé au XXI^e siècle. Les images peuvent désormais

être changeantes, prendre des teintes variables, ou révéler des motifs invisibles sous un éclairage particulier. Ceci est rendu possible par l'usage en certains endroits de l'image d'encres métalliques qui brillent à un certain angle, d'encres fluorescentes qui luminescent sous un éclairage UV, d'effets diffractifs qui font apparaître des images sous des angles particuliers, de réseaux de micro-lentilles qui réfractent des images dont les trames sont entrelacées, ou encore d'hologrammes



qui encodent des images en trois dimensions. Récemment, le Laboratoire Hubert Curien a mis au point une technique d'impression d'image basée sur la nanostructuration par laser de couches très fines semi-transparentes. Cette technique présente plusieurs atouts pour l'impression sécurisée au travers de singularités physiques et optiques que nous allons présenter dans cet article.

DESCRIPTION DES CONTENUS ATTENDUS

Un besoin industriel

C'est en 2015 que la société HID (Arjo Systems à l'époque) s'est rapprochée du Laboratoire Hubert Curien après avoir lu ses travaux sur la création de couleurs pérennes par traitement laser dans des couches inorganiques composées de dioxyde de titane (TiO_2) et de solution argentique. Un travail collaboratif a alors été initié avec comme objectif de parvenir à inscrire par laser nanoseconde des images couleurs sécurisées à l'intérieur de cartes en plastique. Les lasers nanosecondes sont aujourd'hui utilisés pour inscrire en niveaux de gris les informations personnelles et la photographie du porteur dans les documents d'identité grâce la calcination contrôlée d'un type de polycarbonate conçu pour réagir à la longueur d'onde de 1064 nm au sein de la carte. Des techniques pour l'impression d'images en couleur ont aussi été développées et sont basées sur la décoloration par laser d'encre rouge, vert et bleu insérées dans les cartes en plastique. L'idée de cette collaboration était de développer une solution innovante sans encre, n'utilisant

Figure 1. Images de microscopie électronique à balayage de métasurfaces créées par traitement laser sur un film mince de TiO_2 mésoporeux contenant une solution argentique. Barre d'échelle de 1 μm .

qu'un seul laser nanoseconde pour l'impression d'images présentant des effets visuels permettant d'authentifier le marquage, à l'œil nu, en quelques secondes.

Des nanostructures contrôlées par laser

Le traitement par laser de films minces de TiO_2 mésoporeux, dont

les pores contiennent de l'argent, génère des phénomènes contrôlés à la fois par la distribution d'intensité lumineuse dans le film et par le profil local de température. Lors du balayage laser, dont le spot d'une vingtaine de μm de large, à 532 nm, se déplace typiquement de 0.01 à 4 m/s lors de l'inscription d'une image, la lumière est absorbée par l'argent, présent sous forme de nanoparticules (<10 nm initialement) qui font office de nano-sources de chaleur et de nano-diffuseurs. La lumière diffusée peut être piégée dans le film ●●●

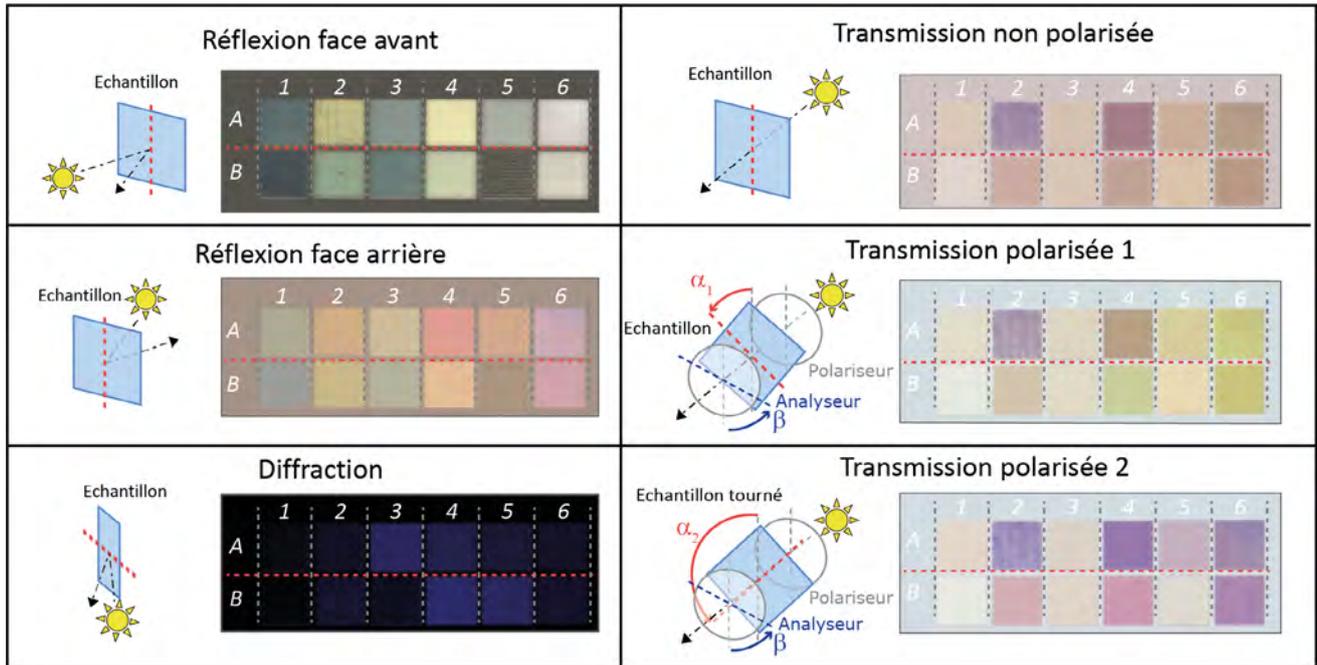
**Votre partenaire pour
l'optique de précision et
pour vos systèmes optiques.**

SPECTROS SA 4107 Ettingen Suisse Tel.+41 61 726 20 20

**HAAG-STREIT
SPECTROS**

www.spectros.ch

Look closer. See further.



et se propager parallèlement à sa surface, interférant alors avec le faisceau incident. Ce phénomène d'interférence crée une modulation périodique sub-longueur d'onde de l'intensité déposée dans le film et peut générer, lorsque la combinaison des paramètres laser, énergie

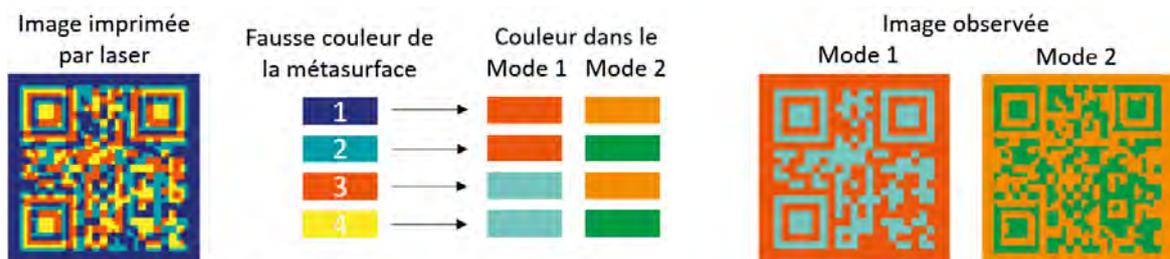
Figure 2. Couleurs de 12 métasurfaces observées dans 6 modes d'observation-éclairage différents

par impulsion, taux de répétition et vitesse de balayage, n'induit pas trop d'accumulation thermique dans le film, une modulation locale de la température avec la même

période que l'intensité lumineuse [1]. L'élévation de température induit quant à elle des phénomènes thermo-chimiques qui tendent à faire grossir les nanoparticules. Il

PRINCIPE DU MULTIPLEXAGE DE DEUX IMAGES IMPRIMÉES

Pour pouvoir imprimer une image multiplexée par laser qui affichera 2 images bicolores distinctes dans deux modes d'observation (QR codes à droite), il est nécessaire et suffisant de trouver 4 métasurfaces dont les couleurs affichées dans les deux modes satisfont l'arbre logique de couleurs représenté au centre de l'image. L'image imprimée par laser contient donc 4 types de métasurfaces différents. Le principe s'étend pour n modes et p couleurs par mode en trouvant p^n métasurfaces constituant un arbre logique de couleurs pour les n modes.



peut ainsi résulter du balayage de la surface par un faisceau légèrement focalisé la formation de nanostructures organisées contenant des nanoparticules d'argent. La distribution de taille de ces nanoparticules, leur densité, leur degré d'organisation, leur position moyenne dans l'épaisseur du film de TiO_2 , qui constituent des paramètres statistiques, dépendent des paramètres laser précédemment cités ainsi que du nombre de passages successifs du faisceau laser au même endroit. L'orientation des nanostructures est quant à elle dépendante de la polarisation du faisceau incident. Chaque jeu de paramètres laser définit ainsi un ensemble de paramètres statistiques pour le film que l'on appellera à ce stade métasurface (Figure 1).

Des couleurs goniochromatiques

Ces métasurfaces ont des propriétés optiques reproductibles pour un jeu de paramètres laser donné, bien qu'à l'échelle nanométrique, chaque métasurface soit unique. Chaque métasurface peut être caractérisée par une couleur qui change en fonction de l'angle de vue et d'éclairage. La Figure 2 montre 12 métasurfaces différentes et leurs couleurs respectives dans 6 modes d'éclairage-observation différents. On est donc loin du précepte qui associe une couleur à une matière déposée sur le support : ici, la matière initialement transparente est structurée point à point sous l'impact du laser et affiche un ensemble de couleurs dans des modes choisis qui en constitue une signature. Cette signature résulte d'une combinaison d'effets optiques qui structurent le spectre de la lumière, incluant l'absorption par les modes de résonance plasmon des nanoparticules métalliques, parfois exaltée par du couplage en champ proche entre nanoparticules, l'hybridation entre des modes plasmoniques localisés et les modes photoniques associés à une propagation de la lumière parallèlement au film, et des interférences de type Fabry-Pérot. Ces effets peuvent être mis en évidence lors de l'étude électromagnétique de structures particulières [2]. Mais, l'hétérogénéité et le désordre apparent des nanoparticules à l'échelle nanométrique, tous deux inhérents au procédé laser mis en œuvre, rendent la prédiction des couleurs impossible à ce jour par des modèles physiques.

De la métasurface à l'image imprimée

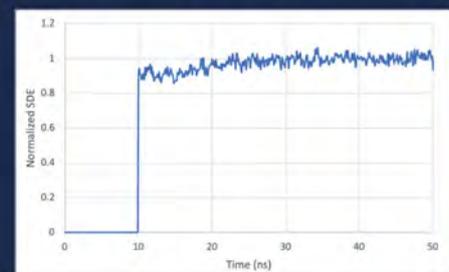
La variation des paramètres laser permet de créer des centaines de milliers de métasurfaces présentant des signatures différentes. Ces signatures ne pouvant être prédites, l'obtention des couleurs pour chaque jeu de paramètres laser est donc à déterminer expérimentalement – comme c'est d'ailleurs le cas pour les imprimés classiques sur papier dans l'industrie – en produisant des milliers de métasurfaces correspondant à la variation incrémentale des 5 paramètres laser, et en les mesurant chacune dans les divers modes d'éclairage-observation. Cette étape fastidieuse a été grandement accélérée ●●●



Enabling your science with ultra-fast, photon-number resolving SNSPDs

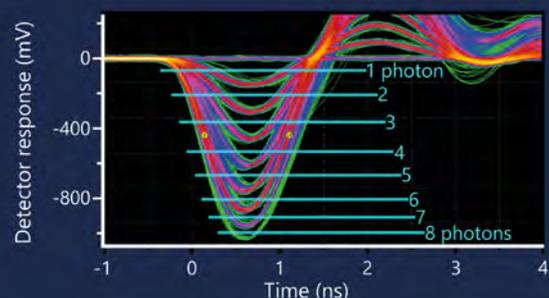
Ultrafast Detection

Recovery times below 10 ns, and count rates > 100 Mcps, while maintaining true latch-free operation.



Photon-Number Resolution

Discriminate up to 8 photons at a time with each 8-pixel ID281 detector, up to 16 detectors in one system.



Find out more



www.idquantique.com



Figure 3. Image imprimée multiplexée éclairée en lumière blanche dont les deux images sont observées simultanément en réflexion sur la lame de verre servant de support d'impression et en transmission par projection sur le fond blanc. Crédits : Nicolas Dalloz, Images n°21 et 23 de la Kodak Lossless True Color Image Suite <https://r0k.us/graphics/kodak/>

en imprimant des métasurfaces très petites sur un support unique, et en utilisant un système d'imagerie permettant de mesurer toutes les métasurfaces à la fois dans chaque mode. Il ressort de cette étape une base de données liant les paramètres de commande du laser et les couleurs reproductibles dans chaque mode d'éclairage-observation, maillon essentiel du « pilote » permettant de convertir les images voulues en commande du laser.

Deux, trois images indépendantes au même endroit du support

Il est alors possible de rechercher dans cette base de données des métasurfaces qui satisfont les conditions requises pour imprimer des images multiplexées (encart 1). Pour afficher deux images bicolores distinctes dans deux modes différents, il faut ainsi chercher des ensembles de 4 métasurfaces qui forment à elles 4 toutes les

combinaisons de 2×2 couleurs dans les 2 modes d'observation considérés. Lorsque l'une des images contient 6 couleurs et l'autre 2, comme illustré en Figure 3, il s'agit de trouver 12 métasurfaces

qui permettent de réaliser toutes les combinaisons possibles de 2×6 couleurs dans les deux modes d'observation. On notera que deux couleurs sont considérées comme identiques dans un mode d'observation dès lors qu'il est impossible de les distinguer visuellement, et non lorsque leurs spectres sont identiques ou que leurs coordonnées RGB sont identiques. A ce jour, jusqu'à 3 images différentes ont pu être multiplexées et observées sous éclairage ambiant à l'œil nu par cette technique [3]. Les travaux, initialement réalisés sur substrat de verre ont été transférés à l'intérieur de cartes en plastique avec un démonstrateur impliquant deux images observées en réflexion et en transmission respectivement. Ce procédé est ainsi en cours de développement au sein du laboratoire commun UJM-CNRS-HID en vue d'une industrialisation par HID.

CONCLUSION

Le multiplexage est un concept particulièrement intéressant pour la sécurisation des cartes et documents, notamment les éléments de personnalisation, en particulier les portraits, qui doivent rester parfaitement authentiques. Puisqu'on inscrit les deux images avec les mêmes métasurfaces, ces deux images sont impossibles à séparer. Si on essaie de modifier l'image 1, alors on modifie toutes les métasurfaces qui ne seront plus à même d'afficher l'image 2. Les documents inscrits avec cette technologie seront donc infalsifiables, et l'identité du porteur sera protégée. ●

RÉFÉRENCES

- [1] B. Eles *et al.*, *Nanophotonics* **11**, 10, 2303 (2022)
- [2] V. D. Le *et al.*, *Nanoscale* **15**, 19339 (2023)
- [3] N. Dalloz *et al.*, *Adv. Mater.* **34**, 2104054 (2022)

LA COULEUR BLEUE : DES PIGMENTS À L'AUTO-ASSEMBLAGE



Vinodkumar SARANATHAN^{1,*}, Annu JALAI²

¹ Division of Sciences, School of Interwoven Arts and Sciences, Krea University, Sricity, India

² Division of Social Sciences, School of Interwoven Arts and Sciences, Krea University, Sricity, India

* Vinodkumar.Saranathan@aya.yale.edu

Le pigment bleu a une histoire riche et fascinante dans le monde artistique et artisanal. Mais, dans le règne animal, les pigments bleus sont très rares. Les bleus organiques sont en revanche omniprésents dans le vivant et sont surtout des couleurs « structurelles » produites par l'interaction de la lumière avec des structures submicroniques. Nous examinons ici comment les matériaux photoniques vitreux et les cristaux dans les plumes pourraient permettre de manière biomimétique la synthèse facile et durable de bleus.

<https://doi.org/10.1051/photon/202412449>

Les humains ont une fascinante histoire avec les pigments, et en particulier avec le bleu [1] (voir §2 ci-dessous). Alors que les couleurs des organismes sont principalement basées sur des pigments, les pigments bleus sont rares dans le règne animal [2, 3]. Les tons vivants et saturés des bleus, des violets et même des ultraviolets (perceptibles par la plupart des animaux à l'exception des mammifères) sont des couleurs « structurelles » produites physiquement, tandis que les verts résultent généralement

d'une combinaison des deux modalités, pigments et structures [2, 3].

Les couleurs structurelles résultent de l'interférence de la lumière diffusée par des nanostructures photoniques avec une variation de composition (c'est-à-dire un contraste d'indice de réfraction) à une échelle de longueur d'environ 100-350 nm [2,3]. Elles peuvent être classées selon le type de diffusion : incohérente, c'est-à-dire que ces couleurs proviennent de diffuseurs spatialement indépendants (régimes de Rayleigh, Tyndall ou Mie en fonction de la taille des particules), ou cohérente, du fait

de l'interférence constructive d'une variation spatiale périodique (longue portée) ou quasi-périodique (courte portée) du matériau dans 1, 2 ou 3 dimensions [3]. Les couleurs structurelles des animaux (par exemple, Fig. 1) sont produites par une diversité stupéfiante de nanostructures photoniques tégmentaires [2-5]. Elles constituent un aspect très important de l'apparence des animaux car elles sont souvent utilisées dans la communication sociale et sexuelle, comme pour attirer les partenaires, avertir les rivaux et les prédateurs, ou se camoufler, etc. [2].

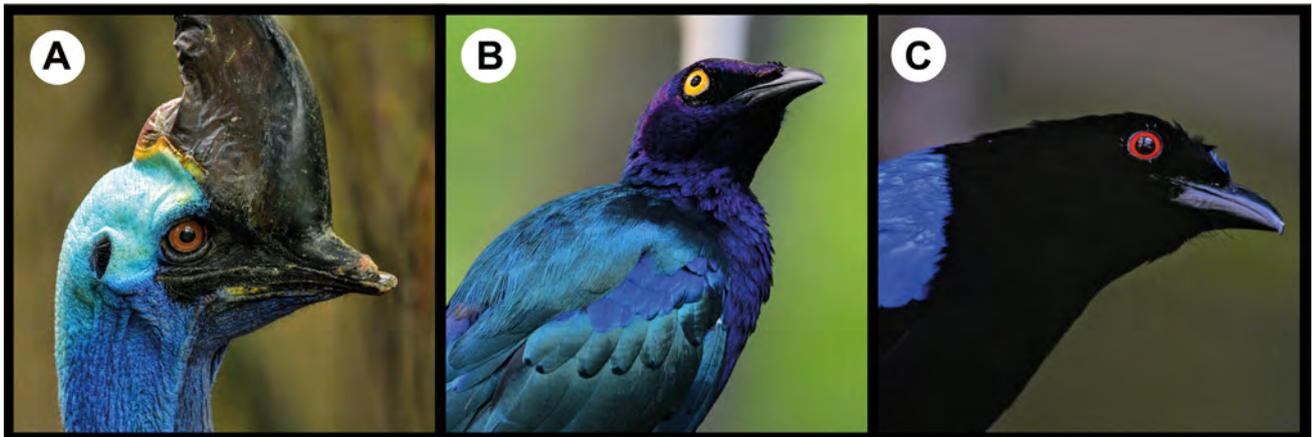


Figure 1. Diversité de la coloration structurale du tégument aviaire. Peau non iridescente : (A) Casoar à casque (*Casuarus casuarius*) ; barbules de plumes iridescentes : (B) Choucador royal (*Lamprotornis regius*) ; barbes de plumes non iridescentes : (C) Irène vierge (*Irena puella*). Crédits photos : Vinodkumar Saranathan.

Ces couleurs organiques hautement saturées et stables, ainsi que les nanostructures photoniques sous-jacentes qui ont évolué au cours de millions d'années d'optimisation sélective, sont de plus en plus étudiées par les physiciens optiques, les spécialistes des matériaux et les ingénieurs, qui y voient un réservoir inexploité pour la conception et la synthèse bio-inspirées de matériaux fonctionnels avancés, compte tenu des défis actuels en matière d'ingénierie à des échelles de longueur visible (mésoscopiques) difficiles à atteindre. Malgré l'étendue de la biodiversité, ces études sont réalisées de manière incrémentale et fragmentaire, et se concentrent sur une ou deux espèces charismatiques (comme le papillon Morpho, le calamar, le caméléon, etc.) avec des réflecteurs plutôt simples (films minces et lamellaires) ou, si ce n'est pas le cas, dans l'infrarouge proche jusqu'aux fréquences des micro-ondes, mais pas dans le domaine visible. En outre, la conception ou la

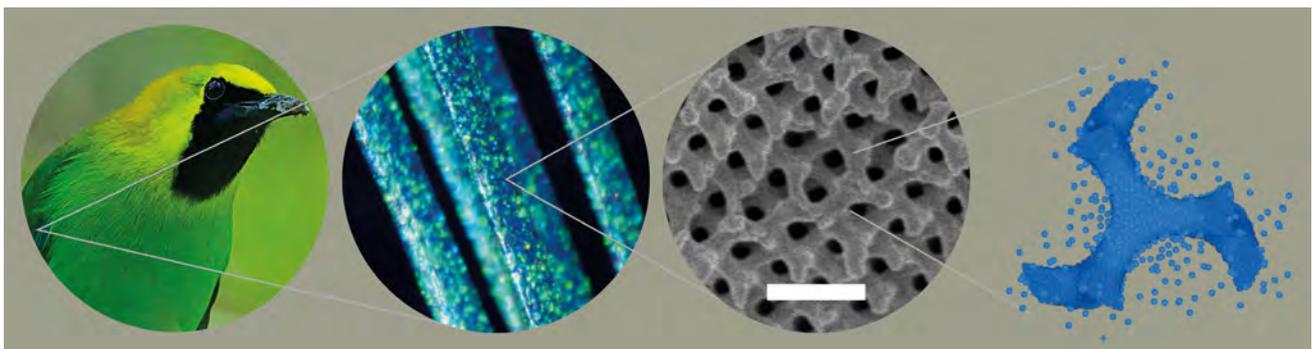
synthèse biomimétique de matériaux fonctionnels est très rare, ou bien seul un aspect restreint des nanostructures biophotoniques est reproduit. Le manque de diagnostics nanostructuraux précis des morphologies biophotoniques 3D complexes constitue un défi supplémentaire.

En effet, la coloration structurale bleue biologique a été synonyme à

tort de diffusion de Rayleigh pendant plus d'un siècle [3]. Pire encore, on sait très peu de choses sur la manière dont les organismes produisent des nanostructures photoniques dans leur tégument (peau, plumes, écailles, etc.), car nombre de ces systèmes 3D complexes ne se trouvent que dans des organismes non modèles, ce qui les rend difficiles à étudier [4]. Ce n'est que récemment, grâce à l'application de techniques de pointe pour la caractérisation des matériaux, telles que la diffusion synchrotron des rayons X aux petits angles (SAXS) [5], que d'énormes progrès ont été réalisés pour sonder et révéler les topologies 3D particulièrement complexes des nanostructures biophotoniques, dissipant ainsi des décennies d'incertitudes structurales.

Dans les sections suivantes, nous présentons d'abord une brève histoire humaine de la couleur bleue (§2). Ensuite, dans la section §3, nous examinons comment les matériaux photoniques vitreux à séparation de

Figure 2. Morphologie fonctionnelle des cristaux photoniques à mono gyroïde à séparation de phase dans les barbes des plumes du Verdin à ailes bleues (*Chloropsis cochinchinensis moluccensis*). Barre d'échelle pour microscopie électronique : 500 nm. Crédits photos et images : Vinodkumar Saranathan.



phase et les réseaux mono gyroïdes dans les plumes d'oiseaux pourraient inspirer la synthèse facile et durable de bleus et d'autres couleurs accordables.

UNE BRÈVE HISTOIRE DE LA COULEUR BLEUE

Bleu, écrit Pastoureau dans son livre passionnant de [1] : « La couleur n'est pas tant un phénomène naturel qu'une construction culturelle complexe, rebelle à toute généralisation, sinon à toute analyse ». Pour lui, il n'y a pas de « prétendues vérités universelles ou archétypales » ce n'est pas l'artiste ou le savant dit-il, encore moins « l'appareil biologique de l'être humain ou le spectacle de la nature » (p. 9) des couleurs mais « l'histoire mouvante des savoirs ». Cela contraste avec la perception des couleurs dans la nature [2].

Le lexique des bleus est, du moins en Europe et dans les langues latines, imprécis et instable. Ce n'est pas que les Romains ne voyaient pas le bleu (la vision humaine n'a pas changé) mais que cette couleur est « silencieuse », c'est-à-dire non intégrée à un système de valeurs et plutôt associée aux barbares, Celtes et Germains [1, p. 27].

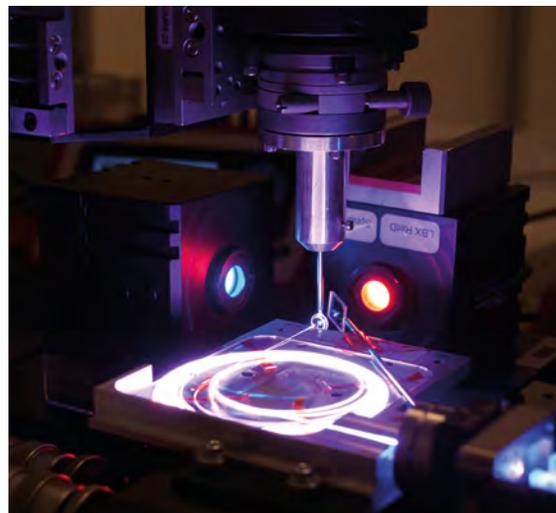
Ce n'est qu'au 11^e siècle que le bleu est investi d'un certain statut. Il se fixe dans l'iconographie Chrétienne comme couleur du manteau de la Vierge. Cette couleur qui ainsi prend un sens religieux commence à apparaître dans les vitraux gothiques [1, p. 52]. Puis, le bleu devient politique : les armoiries familiales des Capet (fleurs de lys sur fond d'azur) deviennent l'emblème du roi de France vers le 12^e siècle [1, p. 60]. Vers 1200, l'azur n'est présent que dans 5% des armoiries et deux cents ans plus tard, la proportion est de 30% [1, p. 57]. Entre les 15^e et 17^e siècles, le bleu devient une couleur « morale ». Les lois prolifèrent, qui régissent entre autres le vêtement, « premier support de signes dans une société alors en pleine transformation » [1, p. 88]. Contrairement aux autres couleurs, le bleu n'est pas stigmatisé : ni prescrit ni interdit, il est libre [1, p. 93]. Si la Réforme protestante assure la promotion du noir vestimentaire et rend tout « chromoclaste » [1, p. 100], le bleu, lui, en profite et devient une couleur « honnête ».

Avec l'époque coloniale, la guerre des différents bleus commence (pastel européen, indigo exotique, bleu de Prusse, etc.) puisque l'apparition de plus en plus présente de l'indigo en provenance du sous-continent indien, pose un problème pour les bleus européens qu'il remplace. Si l'indigo existait déjà en Europe, inspirant même Newton à donner son nom à une couleur spectrale, il commence au 17^e siècle à être interdit futillement en France, sous peine de mort, par plusieurs édits royaux. Puis vers 1710, le bleu de Prusse apparaît et le commerce de l'indigo commence à disparaître tout doucement.

Avec la révolution française, le bleu passe des armoiries aux emblèmes, des emblèmes aux drapeaux et aux uniformes. En Europe, le bleu romantique est lancé, celui de la « petite fleur bleue » de Novalis, couleur de la mélancolie et du rêve qui aboutira vers 1870 au « blues » ●●●

Oxxius: innovation et performance dans le monde des lasers visibles

PUBLI-RÉDACTIONNEL

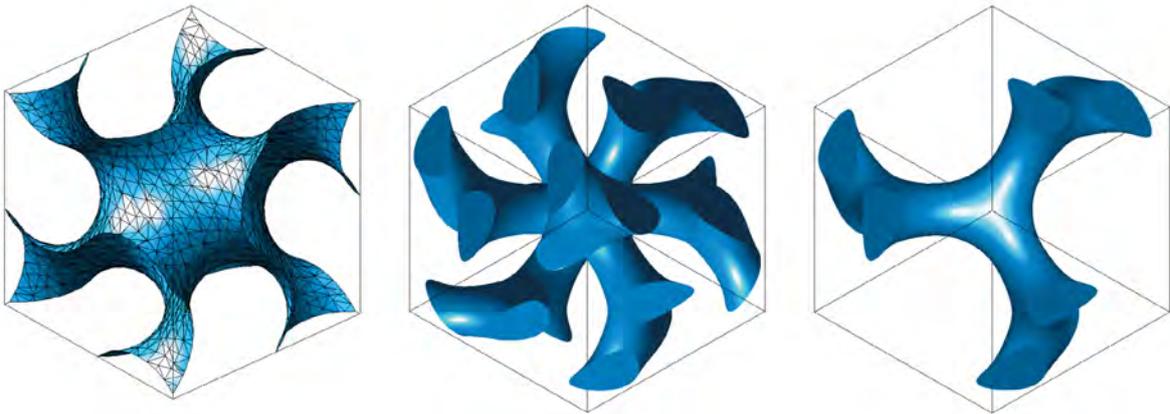


Oxxius, seul fabricant français de lasers visibles, excelle dans le secteur de la photonique depuis plus de 20 ans grâce à ses innovations en biotechnologies et sciences du vivant. Notre gamme produit composée de modules à diodes laser et de lasers DPSS, permet de couvrir l'intégralité du spectre visible de façon discrète entre 375nm et 1064nm. Nos modules lasers compacts intègrent une électronique leur permettant de fonctionner de façon autonome tout en ayant une des consommations les plus faibles du marché. Notre gamme variée répond aux besoins diversifiés de nombreux secteurs. En biophotonique, nos solutions lasers à faible bruit sont adaptées pour des applications telles que l'imagerie par fluorescence, le séquençage génétique, la microscopie confocale et 3D et l'optogénétique, entre autres. Nous développons également des combineurs de longueurs d'onde pour la microscopie, solutions customisables, pouvant être utilisées sur l'ensemble des microscopes existants. Dans le domaine de la mesure et de la spectroscopie, nos lasers monofréquences répondent aux spécifications spectrales étroites qu'imposent des applications dans l'interférométrie, l'holographie, la spectroscopie Raman ou Brillouin par exemple. Pour les utilisations industrielles, ils se prêtent au durcissement par laser, à la reprographie et au contrôle de qualité alimentaire. Oxxius s'engage à fournir des solutions de pointe, alliant innovation, performance et fiabilité. Notre objectif est de continuer à impacter le domaine de la photonique, en apportant des contributions significatives tant dans les milieux scientifiques qu'industriels. ●

CONTACT

David Assous - 06 43 86 18 01 - dassous@oxxius.com

Le gyroïde ou la surface « G » (à gauche) est une surface minimale cubique triplement périodique (courbure moyenne nulle) basée sur un réseau centré sur le corps, qui divise la cellule unitaire en deux moitiés égales. La surface gyroïde possède la double symétrie ($Ia-3d$), ce qui est facilement visible si l'on rétrécit les régions de part et d'autre de la surface pour obtenir des réseaux double gyroïde (au centre). Si nous brisons la double symétrie en supprimant l'un des deux réseaux, nous obtenons un réseau mono gyroïde qui est chiral avec la symétrie $I4_132$ (à droite).



anglo-américain. Du 18^e siècle à nos jours, le bleu est devenu omniprésent : des bleues d'Oxford, de Yale, de l'ONU, de l'UE et jusqu'à la couleur identitaire des Dalits opprimés en Inde.

La recherche d'un bleu vibrant et sûr se poursuit aujourd'hui dans les peintures, les textiles, les cosmétiques ou les colorants alimentaires (par exemple, les M&Ms). De nouveaux colorants bleus sont rarement découverts, sauf par hasard (comme le bleu Oregon). Néanmoins, l'utilisation de couleurs structurales saturées et résistantes à la décoloration comme alternatives aux pigments toxiques et non durables reste pratiquement inexplorée.

Morphologie fonctionnelle des nanostructures photoniques aviaires auto-assemblées

Chez les oiseaux, les organisations 2D quasi-périodiques de fibres de collagène parallèles dans la matrice mucopolysaccharidique du derme de la peau faciale nue (Fig. 1A), des becs et des pattes produit des couleurs structurales non iridescentes ou indépendantes de l'angle. Elles

se développent par auto-assemblage hiérarchique des molécules de collagène en milieu aqueux [4]. Les couleurs structurales iridescentes des barbules des plumes (branches secondaires) (Fig. 1B) sont produites par des analogues biologiques des cristaux photoniques 1D [3, 4] : des films minces ou lamellaires de mélanosomes (granules remplis de mélanine) solides ou creux, remplis d'air (pour augmenter le contraste), sont intégrés dans la kératine des plumes. On pense que ces réseaux de mélanosomes s'auto-assemblent par le biais du mécanisme de déplétion-attraction [4].

Contrairement aux barbules, les couleurs structurales des barbes à plumes (branches primaires) ne sont généralement pas iridescentes (Fig. 1C). Elles sont produites normalement par deux classes principales de nanostructures 3D quasi-périodiques dans les cellules médullaires des barbes spongieuses : les réseaux nanoporeux de kératine de plume avec des canaux d'air interconnectés, et les réseaux aléatoires et rapprochés de vides d'air sphériques dans une matrice de kératine. On

suppose que ces matériaux biophotoniques vitreux s'auto-assemblent dans les cellules des barbes par séparation de phase entre la kératine des plumes et le cytoplasme au cours du développement des plumes [4]. Les nanostructures des barbes d'espèces étroitement apparentées présentent une invariance d'échelle (même forme fondamentale) quelle que soit la taille de la nanostructure, ce qui constitue souvent une caractéristique révélatrice des systèmes de séparation de phases [5].

Récemment, Saranathan *et al.* [5] ont découvert des transitions entre le désordre et l'ordre : depuis des nanostructures quasi-périodiques chez les espèces sœurs jusqu'aux cristaux photoniques mono gyroïdes chez les verdins à ailes bleues (Fig. 2). Ces transitions semblent être motivées par la préférence des femelles pour les couleurs bleues très saturées (spectralement pures) plutôt que pour les signaux iridescents directionnels, car la présentation des domaines polycristallins réduit l'iridescence dans le champ lointain, comme un tableau de Seurat (Fig. 2) [2, 5].

Ce résultat est très surprenant, car la théorie actuelle ne prévoit pas de phases mono gyroïdes. Un tel état n'a jamais été synthétisé directement sans intermédiaire (double gyroïde) dans aucun système expérimental d'auto-assemblage (copolymères à blocs, système lipides-eau, phases tensioactifs), et encore moins à des échelles de longueur d'onde optique difficiles à atteindre, jusqu'à présent chez les verdins à ailes bleues (Fig. 2)!

CONCLUSION

L'interaction de la lumière avec des milieux complexes est une question fondamentale en optique. En étudiant la transition du désordre à l'ordre chez les ailes bleues des verdins, nous disposons pour la première fois d'un modèle prêt à l'emploi pour mieux comprendre cette question du transport de la lumière en fonction de l'ordre dans le régime visible, *car il n'est pas facile de synthétiser à cette échelle de longueur.*

L'étude de la séparation de phase de colloïdes irrégulières comme les kératines et la reproduction de l'origine structurelle des transitions désordre-ordre dans les verdines pourraient offrir des voies véritablement biomimétiques, écologiques et faciles pour la synthèse de matériaux multifonctionnels tels que les gyroïdes à des échelles de longueur d'onde mésoscopiques ou visibles que l'auto-assemblage synthétique ne peut actuellement pas atteindre. Cela peut répondre aux besoins de nos concepteurs en termes de teinte, de dépendance angulaire, de saturation, etc.

Le mono gyroïde est une structure « merveilleuse » très recherchée en physique et en ingénierie [5], par exemple en photovoltaïque, car il présente une chiralité et certaines des plus grandes bandes interdites photoniques complètes à un contraste d'indice de réfraction élevé, avec des propriétés électroniques désirables déterminées par les matériaux constitutifs (par exemple Si/Au), et une résistance élevée à la compression. Percer les secrets de l'auto-assemblage direct de mono gyroïde à l'échelle visible dans les plumes bleues est donc très pertinent, car cela bouleversera notamment les industries de la photonique, du photovoltaïque, de la catalyse et de l'électronique flexible. ●

RÉFÉRENCES

- [1] M. Pastoreau, *Bleu. Histoire d'une couleur*. (Média Diffusion, Paris, 2016)
- [2] I. C. Cuthill *et al.*, *Science* **357**, eaan0221 (2017)
- [3] R. O. Prum in *Bird Coloration, Vol. 1 : Mechanisms and Measurements*, G. E. Hill and K. J. McGraw Eds. (Harvard Univ. Press, Cambridge, 2005)
- [4] V. Saranathan, C. Finet, *Curr. Opin. Genet. Dev.* **69**, 56 (2021)
- [5] V. Saranathan, *et al.*, *PNAS* **118**, e2101357118 (2021)



Discover our range of Optical Spectrum Analyzers

World-class optical performance for wellbeing, biomedical, and environmental sensing applications.

In cooperation with:



www.wavetel.fr
about@wavetel.fr

Discover it here:



COMPRENDRE LA TOPOLOGIE PHOTONIQUE

Alberto AMO^{1,*} et Gaëtan LÉVÈQUE²

¹ Laboratoire de Physique des Lasers, Atomes et Molécules (PhLAM), CNRS UMR 8523 – Université de Lille, France

² Institut d'Électronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie (IEMN), CNRS UMR 8520 – Université de Lille, France

*alberto.amo-garcia@univ-lille.fr



La topologie décrit les propriétés d'un objet qui ne changent pas quand il est déformé. En photonique elle permet de classer les bandes de fréquence d'un matériau structuré selon leurs symétries locales. À l'interface entre deux matériaux optiques de topologie distincte apparaissent des modes guidés de propagation très robuste. Nous donnons ici les notions fondamentales pour en comprendre les propriétés.

<https://doi.org/10.1051/phys/202312454>

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

La topologie est un concept originaire des mathématiques qui permet de classer des objets à partir de propriétés qui ne changent pas quand ils sont soumis à des déformations douces (sans les couper ni les coller). Ces propriétés sont connues sous le nom d'invariants topologiques, et permettent de grouper, par exemple, les surfaces fermées à trois dimensions selon leur nombre de trous ou les champs vectoriels selon le nombre et signe de leurs singularités (points autour desquels le champ de vecteurs tourne). Depuis les années 1980, les invariants topologiques sont aussi utilisés pour classer les bandes électroniques de conduction et de valence de certains semi-conducteurs. Les découvertes qui en ont découlé ont été récompensées par deux prix Nobel de physique en 1985 (K. von Klitzing) et 2016 (D. Thouless, D. Haldane et M. Kosterlitz).

L'un des éléments les plus remarquables de l'approche topologique en physique du solide est qu'elle permet d'expliquer l'apparition de canaux de conduction électronique à l'interface entre des cristaux dont les bandes présentent des invariants topologiques de valeurs différentes. La figure 1 montre le schéma de deux solides dont les bandes de valence et de conduction sont séparées par une bande interdite. Pour le solide de gauche,

dit *trivial*, ces bandes sont caractérisées par un invariant topologique C de valeur nulle, tandis que le solide de droite, *non trivial*, possède des bandes dont l'invariant est non-nul. L'interprétation topologique des bandes électroniques implique que la valeur de l'invariant C reste strictement inchangée pour toute déformation du cristal qui ne referme pas la bande interdite. Si l'on examine l'évolution de la structure de bande lors du passage du solide trivial jusqu'au solide non-trivial, leurs bandes interdites doivent donc se refermer à la traversée de l'interface, les modes propres des deux solides s'y restructurant pour donner lieu au bon invariant topologique de chaque côté. De cette façon apparaissent des états confinés le long de l'interface, pour les énergies situées dans les bandes interdites des deux solides. Ces états forment des canaux topologiques permettant une propagation électronique sans rétrodiffusion, même en présence de désordre.

Les mêmes principes s'appliquent en photonique, cette fois-ci pour caractériser les bandes de fréquences d'un solide structuré périodiquement, par exemple un cristal photonique ou un réseau de guides d'onde ou de résonateurs photoniques couplés [1]. La formation de canaux topologiques possède des applications potentielles fort intéressantes pour la conception de circuits topologiques intégrés et à faibles pertes. Le but de

cet article est de présenter les notions fondamentales permettant de comprendre la formation de ces canaux topologiques.

LE MODÈLE SU-SCHRIEFFER-HEEGER À UNE DIMENSION

Une configuration utile pour se familiariser avec la notion d'invariant topologique et d'état topologique d'interface est le modèle de Su-Schrieffer-Heeger (SSH). Ce modèle décrit la propagation de la lumière dans un réseau unidimensionnel de résonateurs photoniques en interaction. La figure 2a montre un réseau de ce type composé d'une chaîne de micropiliers. Chaque micropilier confine la lumière dans un mode photonique fondamental qui se couple aux deux piliers voisins avec une probabilité de saut d'autant plus importante que leur distance centre-à-centre est faible [2]. L'alternance entre distances courtes et longues induit une alternance des constantes de couplage t et t' entre deux piliers successifs : le réseau périodique est donc décrit par une cellule unitaire composée de deux micropiliers A et B dont la répétition permet de reconstituer la chaîne infinie.

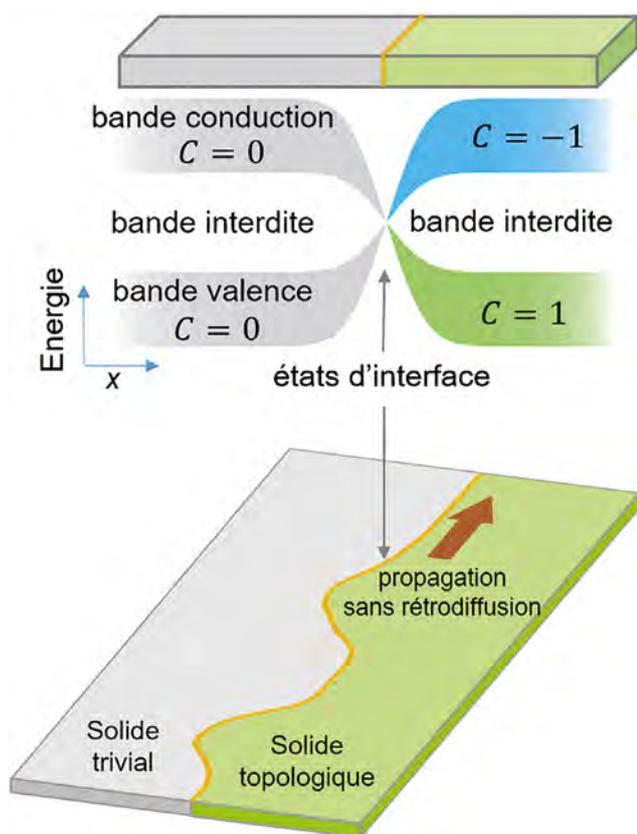


Figure 1. Schéma d'une interface topologique. Le solide à gauche présente de bandes électroniques à la topologie dite triviale (invariant égal à zéro). Celui de droite a des bandes caractérisées par un invariant non nul. À l'interface entre les deux, le gap se ferme donnant lieu à des états d'interface topologique.

L'OPTIQUE EST NOTRE AVENIR



NOUVEAU **TECHSPEC®**

Objectifs Série UAV Edmund Optics®

Conçus pour les véhicules autonomes et les drones
Compacts | Légers | 24,6 mégapixels

- Compacts et légers avec une faible distance de l'échantillon au sol (GSD)
- 24,6 mégapixels, ouverture f/2,8 pour une haute résolution
- Idéaux pour la cartographie et l'arpentage par drone, l'imagerie aérienne et la photométrie

Pour en savoir plus :

www.
edmundoptics.fr/
imaging



+33 (0) 820 207 555
sales@edmundoptics.fr

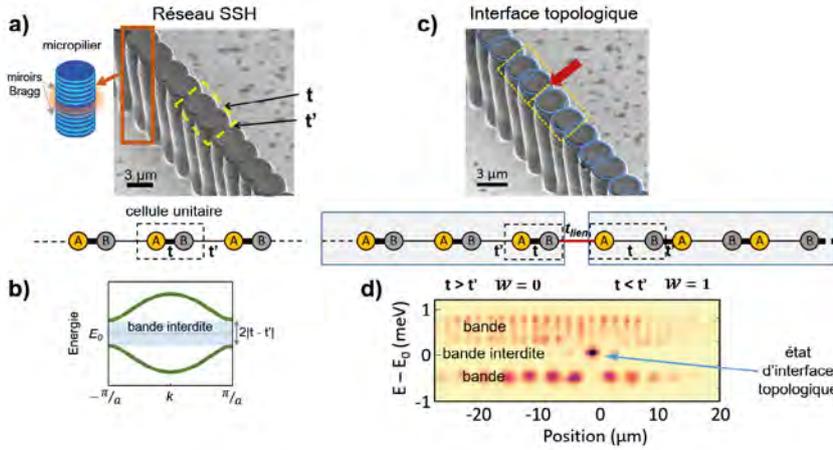


Figure 2. a) Réseau de micropiliers couplés avec des couplages alternants t et t' (réseau dit SSH). b) Les modes propres se distribuent sur deux bandes séparées par une bande interdite. c) Chaîne formée par deux réseaux de micropiliers de topologie différente, couplés par l'interface marquée par une flèche rouge. d) Le spectre de photoluminescence montre un état d'interface à l'intérieur de la bande interdite. Données extraites de la Ref. [2].

Les amplitudes A_m et B_m des modes électromagnétiques confinés dans chaque site A et B de la cellule numéro m de la chaîne infinie peuvent être décrites par ce système d'équations couplées :

$$i\hbar \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} A_m \\ B_m \end{pmatrix} = E_0 \begin{pmatrix} A_m \\ B_m \end{pmatrix} - t \begin{pmatrix} B_m \\ A_m \end{pmatrix} - t' \begin{pmatrix} B_{m-1} \\ A_{m-1} \end{pmatrix},$$

où E_0 est l'énergie du photon du niveau fondamental de chaque pilier. On peut montrer que les modes propres de cette équation ont la forme suivante :

$$\begin{pmatrix} \Psi_{A,m}(k) \\ \Psi_{B,m}(k) \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \mp 1 \\ e^{i\phi(k)} \end{pmatrix} e^{ikm} e^{i\frac{E_{\pm}(k)}{\hbar}t} \equiv \vec{\Psi}_{\pm}(k) e^{ikm} e^{i\frac{E_{\pm}(k)}{\hbar}t}.$$

Ici $\Psi_{A,m}(k)$ et $\Psi_{B,m}(k)$ indiquent les amplitudes sur les micropiliers A et B, respectivement, de la cellule m , regroupées dans le vecteur $\vec{\Psi}(k)$. Le nombre d'onde k dont dépendent les modes est défini entre $-\pi$ et $+\pi$, en considérant que la période du réseau est $a=1$. Les modes propres se distribuent sur deux bandes d'énergie $E_{\pm}(k) = E_0 \pm \sqrt{t^2 + t'^2 + 2tt' \cos(k)}$ séparées par une bande interdite de largeur $2|t - t'|$ (voir la figure 2b). Le choix du signe moins ou plus entre les amplitudes des deux piliers A et B de chaque cellule dépend de la bande considérée. On remarquera qu'il existe une différence de phase $\phi(k)$ entre ces deux sites, donnée par $\cos\phi(k) = \frac{t'/t}{\sin k} + \cot k$.

Nous pouvons à présent introduire l'invariant topologique qui permet de classer les bandes de ce modèle. Il s'agit du nombre d'enroulement (*winding number* en anglais), défini ainsi :

$$\mathcal{W} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} dk \vec{\Psi}^*(k) \frac{d\vec{\Psi}(k)}{dk} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{d\phi}{dk} dk$$

L'intégrale parcourt les modes propres d'une bande sur toute la première zone de Brillouin, de $-\pi$ à $+\pi$. Sa valeur est indépendante de la bande choisie, et vaut 0 quand $t > t'$, et 1 quand $t < t'$. On note ici l'une des caractéristiques des invariants topologiques : il s'agit toujours de nombres entiers. Ceci témoigne du fait que des petites déformations du système, par exemple des variations de t et t' , ne changent pas la valeur de l'invariant. Pour passer de la phase topologique $\mathcal{W} = 0$ à la phase $\mathcal{W} = 1$

il faut varier la valeur des couplages de $t > t'$ à $t < t'$. Notamment, il faut passer par « une transition de phase topologique » à la fermeture du gap, qui a lieu pour $t = t'$.

Cette description nous permet de prédire l'apparition d'états topologiques d'interface. La figure 2c montre deux chaînes de micropiliers avec des couplages $t > t'$ à gauche, et $t < t'$ à droite. À l'interface entre les deux, l'invariant topologique \mathcal{W} doit changer de la valeur 0 à 1 et un état apparaît au centre du gap. Remarquons ici que la valeur exacte du couplage entre les deux chaînes t_{lien} (flèche rouge sur la figure 2c) ne joue aucun rôle dans l'existence de cet état localisé : sa présence est uniquement la conséquence du changement de l'invariant topologique. Il existerait même si $t_{lien} = 0$, ce qui correspond aux deux chaînes séparées physiquement. Dans ce cas-ci, l'état d'interface se trouve uniquement sur le bout de la chaîne avec $\mathcal{W} = 1$. Notons aussi que le choix de cellule unitaire dans un réseau infini, qui détermine si $t > t'$ ou $t < t'$, est complètement arbitraire. Ainsi, l'invariant topologique pour ce réseau unidimensionnel a la particularité qu'il n'est pas bien défini sur un réseau infini. Par contre, quand on considère une interface ou une chaîne finie, le choix de la cellule unitaire reste bien déterminé par le couple de sites sur le bord de la chaîne, et l'analyse que nous venons de faire a tout son sens.

Le type de réseau à une dimension que nous venons de décrire présente des états d'interface localisés spatialement, qui ont entre autres été utilisés pour démontrer l'ingénierie d'états localisés au centre d'un gap et pour la réalisation de lasers [3]. Mais leur intérêt est essentiellement conceptuel.

LA TOPOLOGIE DE VALLÉE À DEUX DIMENSIONS

La possibilité de créer des états d'interface topologiques dans des systèmes à deux dimensions a un intérêt majeur car ceci permet de concevoir des guides photoniques intégrés le long desquels la lumière peut se propager avec une faible rétrodiffusion. L'invariant topologique pertinent pour classer les bandes électroniques des solides cristallins à deux dimensions est le nombre de Chern, défini par la relation :

$$C = \frac{1}{2\pi} \int_{z_B} \nabla_{\vec{k}} \times [\vec{\Psi}^*(\vec{k}) i \nabla_{\vec{k}} \vec{\Psi}(\vec{k})] \cdot \vec{d}S \equiv \frac{1}{2\pi} \int_{z_B} \vec{\Omega}(\vec{k}) \cdot \vec{d}S,$$

avec $\vec{dS} = dk_x dk_y \vec{u}_z$, où les directions x et y sont celles du réseau et \vec{u}_z est le vecteur unitaire perpendiculaire.

L'intégrale est réalisée sur tous les modes propres $\vec{\Psi}(\vec{k})$ de la première zone de Brillouin (zB) du réseau cristallin, paramétrés par leur vecteur d'onde $\vec{k} = (k_x, k_y)$. L'intégrand $\vec{\Omega}(\vec{k})$ porte le nom de courbure de Berry. On remarquera l'analogie entre les expressions du nombre de Chern et du nombre d'enroulement pour le modèle SSH.

De par sa construction, la courbure de Berry a certaines propriétés. Si la symétrie par renversement du temps est préservée, alors $\vec{\Omega}(\vec{k}) = -\vec{\Omega}(-\vec{k})$ et son intégrale sur la zone de Brillouin est nécessairement zéro. Si la symétrie d'inversion est préservée, alors $\vec{\Omega}(\vec{k}) = \vec{\Omega}(-\vec{k})$. La présence de ces deux symétries à la fois implique alors $\vec{\Omega}(\vec{k}) = \vec{0}$. En conséquence, pour avoir un nombre de Chern différent de zéro il est nécessaire de briser la symétrie par renversement du temps, par l'application, par exemple, d'un champ magnétique. Mais ceci présente de grandes difficultés pour les systèmes photoniques du fait que la plupart des matériaux utilisés dans ce domaine ont des réponses trop faibles aux champs magnétiques. D'autres invariants topologiques possibles à deux dimensions existent et s'affranchissent de ce problème, mais ils sont réservés aux systèmes fermioniques (les électrons), et ne fonctionnent pas pour les photons qui sont des bosons.

Il a fallu donc trouver d'autres stratégies pour créer des systèmes topologiques à deux dimensions pour les photons. La configuration la plus efficace est connue sous le nom d'effet Hall de vallée [4]. Malgré le fait que le nombre de Chern doit rester égal à zéro pour un réseau photonique dont la symétrie par renversement du temps est préservée, la courbure de Berry peut être non nulle dans certaines régions de la zone de Brillouin d'une bande si la symétrie d'inversion est brisée. La figure 3a montre le schéma d'un cristal photonique à deux dimensions fait de trous disposés sur un réseau en nid d'abeille. La cellule unitaire est marquée par un losange jaune. Les deux trous contenus dans la cellule sont de taille différente, ce qui brise la symétrie d'inversion selon l'axe horizontal, le réseau image étant celui de la figure 3b, non superposable au premier. Ce cristal a plusieurs bandes photoniques, représentées sur la figure 3c (dans le cas où le champ

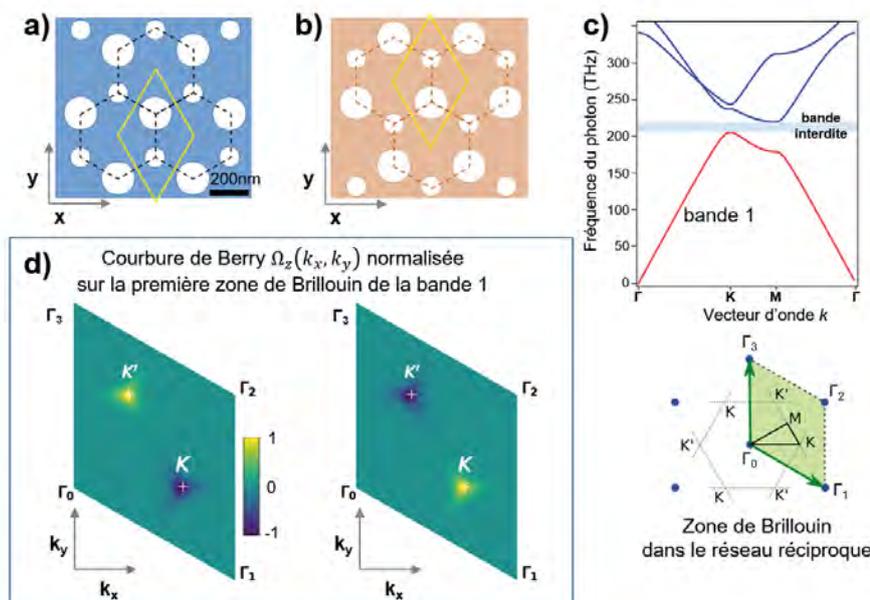


Figure 3. Effet topologique de vallée. a) et b) montrent une petite région de deux cristaux photoniques à deux dimensions en silicium. L'un est l'image miroir de l'autre, et ils possèdent les mêmes bandes photoniques, c). Le panneau d) montre la courbure de Berry de la bande 1 pour chaque cristal sur la première zone de Brillouin. Elle est concentrée sur les points K et K'. Extrait de la Réf. [5].

Radiometry of wet surfaces

When Water Matters

Directed by **Lionel Simonot**

Institut d'Optique Graduate School Advanced Textbook

Directed by Lionel SIMONOT

Radiometry of Wet Surfaces

When Water Matters






How to predict the evolution of the appearance of wet materials for a given surface type, and for a given moisture content? This field of research leads to multiple fields of application: in remote sensing, to correctly identify surfaces and estimate moisture content; in public lighting, to improve visibility on wet roads; in computer graphics, to render wet surfaces in a more realistic way...

Also available in e-book format

For sale on aboutique.edpsciences.fr

ISBN : 978-2-7598-2930-9

120 illustrated pages

Price : 95 €



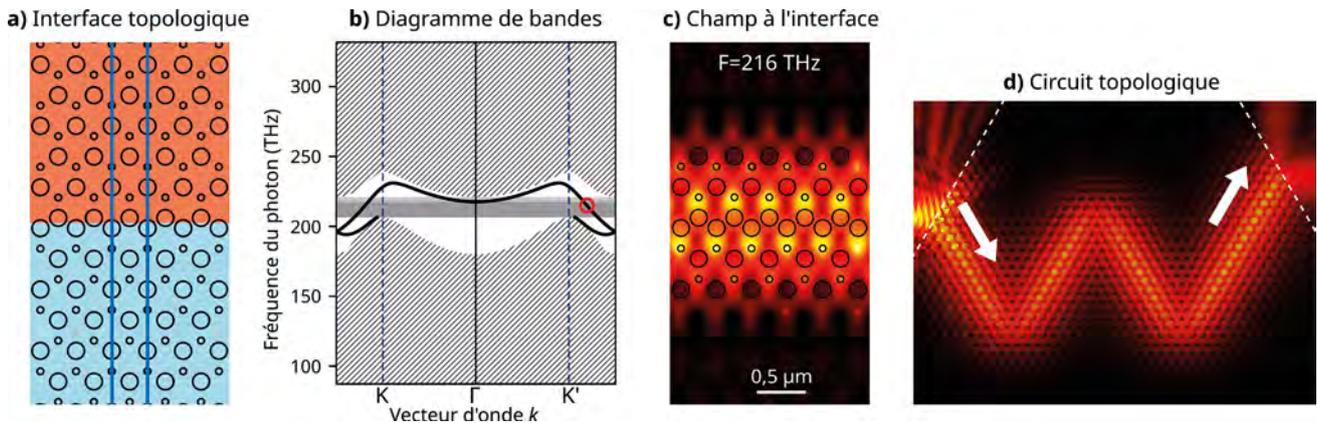


Figure 4. Interface topologique. a) Interface entre deux cristaux photoniques de cellule unitaire miroir. b) Diagramme de bandes pour l'interface. Des états d'interface traversent le gap, notamment autour des points K et K', limités en bleu par des conditions au bord périodiques. c) Norme du champ magnétique du mode à 215THz, bien confiné à l'interface. d) Circuit topologique composé d'interfaces formant trois virages à 120°. La couleur rouge-orange indique les zones de fort champ. La lumière est injectée à gauche et sort à droite avec très peu de pertes. Figures a), b), c) extraites de la Réf. [5].

électrique est parallèle au plan du réseau) le long des lignes de plus hautes symétries de la première zone de Brillouin, tracée en vert en dessous. Celle de plus basse fréquence (bande 1) est séparée des deux autres à des fréquences plus élevées (en bleu) par une bande interdite. La courbure de Berry correspondant à la bande 1 est montrée sur le panneau d, gauche. On voit qu'elle est concentrée autour des points K et K', avec des valeurs de signes opposés. Si par contre on considère le cristal image de la figure 3b, où le grand trou est remplacé par le petit et vice-versa, les bandes d'énergie restent identiques mais la courbure de Berry change de signe aux points K et K' (figure 3d, droite).

Examinons maintenant le cas d'une interface entre les deux cristaux images des figures 3a et 3b, telle que dessinée sur la figure 4a. L'interface est parallèle à la direction Γ_0K de la figure 3d. Malgré le fait que le vecteur d'onde n'est plus bien défini dans la direction perpendiculaire à l'interface, il le reste dans la direction de l'interface, qui présente une périodicité unidimensionnelle, et les points K et K' restent bien séparés. Si on se place sur le point K', la courbure de Berry locale pour la bande considérée doit changer de signe en passant d'un cristal à l'autre (voir figure 3d). Ceci suggère que localement la bande interdite doit se fermer à l'interface entre les deux cristaux, donnant lieu à des états qui y sont confinés. Le même argument s'applique au point K.

La courbe de dispersion de cet état d'interface, qui peut être calculée numériquement, est tracée sur la figure 4a. On observe que cet état traverse le gap autour des points K et K', et sa distribution en amplitude confirme qu'il est localisé et se propage le long de l'interface, comme le montre la figure 4c, tracée pour l'état marqué par un cercle rouge sur le panneau 4b. Plus important encore, même en présence de virages abruptes tels que présentés sur la figure 4d, la propagation se réalise de façon presque parfaite, avec une rétrodiffusion dans les virages qui peut être largement inférieure à 1% en puissance [5]. Il faut tout de même que la nouvelle direction de propagation ne mélange pas les points K et K'. Ceci est possible si les virages forment des angles de $\pm 120^\circ$. Par

contre, la présence de désordre dans la taille ou position des trous produira de la diffusion entre les points K et K' et induira de la rétrodiffusion. Ces propriétés de guidage permettent la réalisation de circuits photoniques d'une grande variété. Elles peuvent être notamment utilisées pour réaliser des diviseurs de faisceau, des interféromètres ou des cavités résonnantes avec grands facteurs de qualité, afin par exemple d'améliorer les performances de dispositifs de télécommunications térahertz.

CONCLUSION

La notion d'invariant topologique appliquée aux bandes photoniques a permis la compréhension de nouveaux mécanismes de localisation et de guidage robuste de la lumière à l'interface entre deux matériaux. Ces avancées ont conduit à la réalisation de lasers dits topologiques et à la découverte de l'effet Hall quantique de vallée. Ce dernier phénomène est d'une puissance redoutable pour la conception de circuits topologiques photoniques fonctionnels. Néanmoins, plusieurs questions fondamentales restent encore ouvertes telles que le lien strict entre cet effet et les invariants topologiques pertinents dans les systèmes bosoniques, auxquels appartiennent les matériaux photoniques. ●

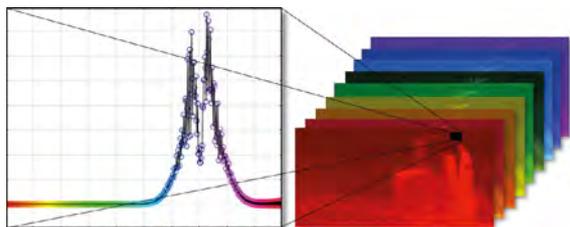
RÉFÉRENCES

[1] T. Ozawa *et al.*, *Rev. Mod. Phys.* **91**, 15006 (2019).
 [2] N. Pernet *et al.*, *Nat. Phys.* **18**, 678 (2022).
 [3] Y. Ota, K. Takata, T. Ozawa, A. Amo, Z. Jia, B. Kante, M. Notomi, Y. Arakawa, and S. Iwamoto, *Nanophotonics* **9**, 547 (2020).
 [4] H. Xue, Y. Yang, and B. Zhang, *Adv. Photonics Res.* **2**, 2100013 (2021).
 [5] G. Lévêque, Y. Pennec, P. Szriftgiser, A. Amo, and A. Martínez, *Phys. Rev. A* **108**, 043505 (2023).

ACHETER UNE CAMÉRA HYPERSPECTRALE FTIR POUR DES MESURES ENVIRONNEMENTALES ET SIGNATURES INFRAROUGES

Antoine DUMONT*

Telops, 100-2600 Ave Saint-Jean-Baptiste, Québec City, Quebec, Canada
antoine.dumont@telops.com



Les caméras hyperspectrales infrarouges par transformée de Fourier (FTIR) permettent de combiner l'information spatiale et spectrale de façon inégalée. Ces instruments ont leur place autant dans un laboratoire que sur le terrain et offrent une solution élégante à grande précision pour une grande gamme d'applications

<https://doi.org/10.1051/photon/202312459>

L'imagerie hyperspectrale FTIR est une technologie en pleine effervescence, avec des applications dans de multiples secteurs tels que le pétrole et le gaz, le minier, la défense, le textile et plus encore. Au tournant du 21^e siècle, cette technique expérimentale prit de la maturité et quelques compagnies pionnières commencèrent à concevoir et fabriquer des imageurs hyperspectraux haute performance pour la recherche universitaire, industrielle ou en défense. Ces instruments sont créés pour des mesures scientifiques

rigoureuses dans le secteur académique tout autant que pour offrir des réponses et solutions claires dans le secteur industriel. Ces imageurs hyperspectraux FTIR sont maintenant développés pour offrir une énorme flexibilité de mesures, autant pour la plage spectrale, partant de l'infrarouge proche (700nm) jusqu'à 13 μm , la résolution spectrale et l'utilisation sur le terrain. Des imageurs FTIR ont récemment été développés pour des mesures aéroportées, certains offrant des services de détection aéroportée de méthane avec laquelle les données infrarouges sont collectées, traitées et analysées par des spécialistes. La

détection, identification et quantification de gaz à effet de serre (méthane) et de composés organiques volatiles (COV) sont critiques pour mitiger leur impact environnemental et assurer la conformité aux réglementations gouvernementale. L'imagerie hyperspectrale FTIR permet non seulement d'identifier et quantifier le méthane, mais tous les gaz à effet de serre, les COV, ou gaz toxiques et cela de façon simultanée dans la même image. Il est aussi possible de détecter des minéraux ou autres matériaux avec une signature spectrale distincte à grande distance... Une technologie très versatile !

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

L'imagerie hyperspectrale est entièrement passive et non destructive. Au cœur des imageurs hyperspectraux FTIR se trouve un interféromètre de Michelson, visible en schéma dans la Figure 1. La lumière (infrarouge) de la scène entre par la fenêtre d'acquisition, atteint l'interféromètre qui module le signal de la radiation incidente en bougeant le miroir mobile qui balaie à vitesse constante la plage complète de longueur d'onde, selon un point zéro de déplacement. Pour chaque pixel dans la matrice du détecteur, un signal est enregistré en fonction de la distance parcourue par le miroir ce qui crée un tracé appelé un interférogramme. Ce signal est traité par transformée de Fourier pour obtenir une signature spectrale brute, non calibrée. Des corps noirs sont intégrés dans l'appareil et sont utilisés pour construire un étalonnage à tout moment souhaité avant une série de mesures pendant que l'appareil est en marche. Cet étalonnage est appliqué à la signature brute pour produire une signature de radiance calibrée qui peut être utilisée après pour une analyse chimique. À ce jour, les imageurs hyperspectraux FTIR sur le marché ont une résolution spatiale maximale de 320x256 pixels.

Les données sont donc en trois dimensions (x,y,z); x et y sont l'information spatiale standard, mais z contient l'information spectrale pour chaque pixel dans l'image. L'image reçue à la fin de la mesure peut être visualisée comme un total d'intensité pour toutes les longueurs d'onde ou sinon chaque "tranche" spectrale peut aussi être retirée. L'intensité d'un pixel correspond à l'intensité de cette longueur d'onde, spécifique entrant dans la ligne de vision de la mesure. Malheureusement, pour la quantification d'un gaz, le signal de radiation considéré ne provient pas seulement du gaz inspecté dans la scène et une analyse plus complexe doit être accomplie.

Un modèle de transfert radiatif doit être créé selon les conditions de la

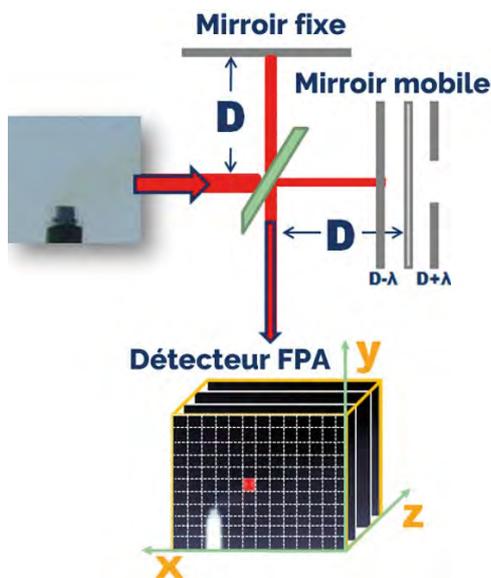
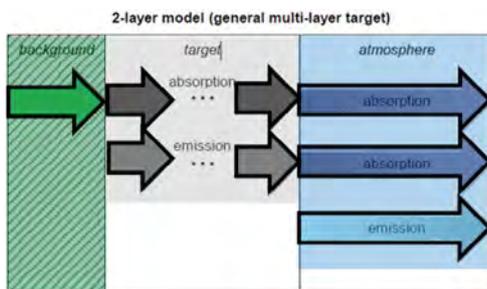


Figure 1. Diagramme d'un interféromètre de Michelson au cœur d'un imageur hyperspectral FTIR. Chaque pixel contient l'information spectrale complète selon la plage de longueur d'onde de l'instrument.

scène. L'arrière-plan émet une certaine quantité d'infrarouge qui sera partiellement absorbée par le gaz qui lui-même émet de l'infrarouge. Le tout se passe dans une atmosphère qui cause de l'absorption et de l'émission, avant et après le gaz ciblé. Les températures, les espèces chimiques, la distance entre l'imageur hyperspectral et la cible, tous ces paramètres ont un impact sur le calcul final.

Modéliser cela n'est pas simple, mais les instruments sont typiquement complétés d'une suite de logiciels

Figure 2. Principe de base du modèle de transfert radiatif. Plusieurs couches peuvent être rajoutées pour améliorer le modèle.



qui contiennent un algorithme qui peut faire ce type d'analyse et fournir un rapport complet de quantification de gaz. Il suffit seulement d'entrer les paramètres expérimentaux et les conditions atmosphériques et le logiciel optimise le modèle simulé produisant un résultat quantitatif.

QUOI CONSIDÉRER SUR LE TERRAIN

Des mesures avec un imageur hyperspectral peuvent être accomplies autant dans un laboratoire avec les paramètres expérimentaux pleinement contrôlés qu'à l'extérieur à la merci des conditions météorologiques. Peu importe l'environnement dans lequel les mesures sont faites, il y a toujours une liste de questions importantes à considérer avant même de tenter de prendre une mesure :

Est-ce que les gaz/matériaux ont une signature définie dans la plage spectrale de l'instrument ?

La plupart des gaz et matériaux vont avoir une réponse spectrale unique (absorption, transmission, réflexion) dans l'infrarouge. Il est important de déterminer quelle plage spectrale dans l'infrarouge est optimale pour la détection ciblée (proche-IR, moyen-IR, lointain-IR, etc...). L'emplacement de la signature peut rendre une mesure difficile si l'absorption atmosphérique est très forte dans ces longueurs d'ondes. Par exemple, la détection de CO₂ est techniquement possible avec l'imagerie hyperspectrale, mais reste un défi particulièrement difficile. La détection de CO₂ a déjà été accomplie dans l'atmosphère à une bonne distance, mais seulement grâce à l'élargissement spectral de l'émission et un signal plus prononcé provenant d'un gaz très chaud, ce qui nous amène à la prochaine question...

Y a-t-il un contraste thermique raisonnable pour la mesure ?

Pour pouvoir détecter la signature d'un gaz souhaité, il est nécessaire que la scène offre une différence de température entre le gaz et



SPECTROSCOPIE FTIR

Analyse non invasive, rapide et à moindre coût de gaz, liquides et solides

SPECTROMÈTRES À TRANSFORMÉE DE FOURIER FTIR



- ▲ Système compact & robuste
- ▲ Gamme 2-12µm (selon modèle)
- ▲ Détecteur MCT refroidi à Peltier
- ▲ Résolution 2/4/8 cm⁻¹ (jusqu'à 0.5 cm⁻¹ personnalisé)
- ▲ Existe en version NIR et version combinée

SPECTROMÈTRES À MELANGE DE FRÉQUENCE



- ▲ Vitesse d'acquisition d'un spectre complet jusqu'à 130 kHz
- ▲ Gamme spectrale 2-5µm ou 7.6-12µm
- ▲ Détection à température ambiante sans refroidissement
- ▲ Sensibilité -80 dBm/nm
- ▲ Résolution 2.5cm⁻¹



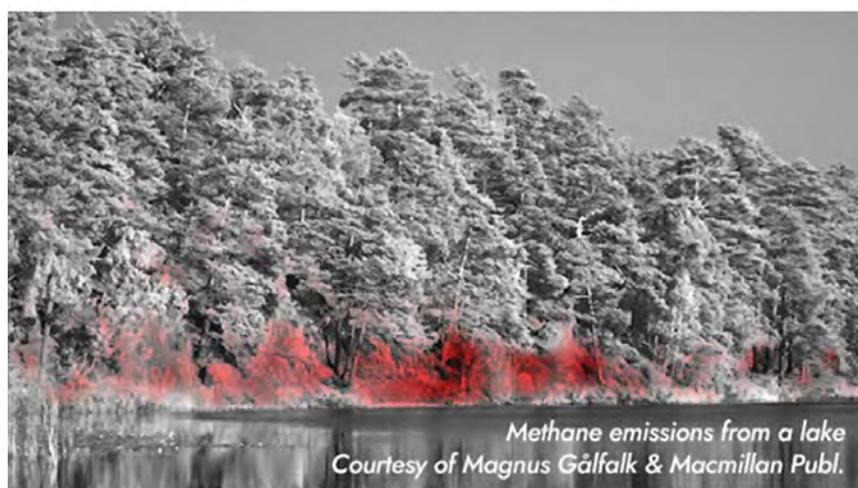
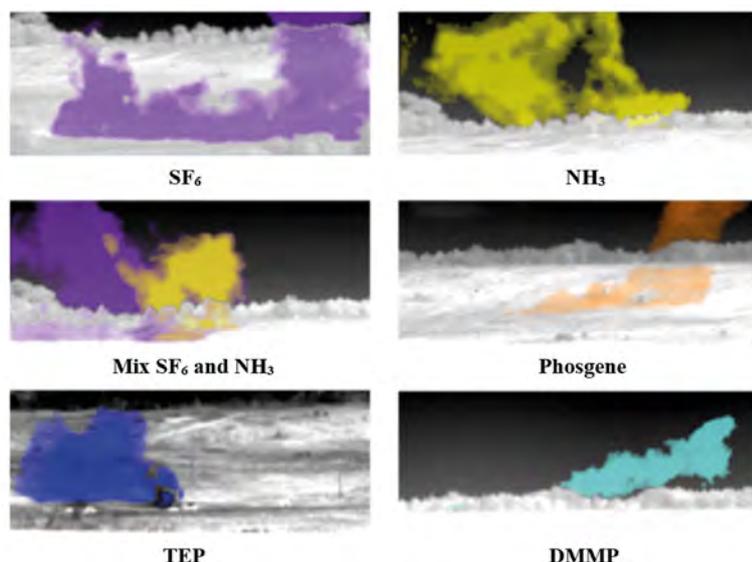
l'arrière-plan ainsi que l'air ambiant si possible. Si un gaz ciblé est plus chaud, le spectre contient des pics d'émission plus élevé que le signal de base. Si le gaz est plus froid, des vallées d'absorption seront visibles dans le spectre, aux mêmes positions (ou très proches) que les pics d'émission pour un gaz chaud. Si le contraste thermique n'est pas assez large, il sera très difficile de détecter le gaz, surtout à basse concentration. Le ciel sans nuage est habituellement un bon arrière-plan, avec une radiation thermique minimale, pour la mesure au sol de panaches de gaz. Les mesures aériennes sont forcées d'utiliser le sol comme arrière-plan, ce qui fixe

la référence de température aux conditions météorologiques du moment. Les mesures sur des objets solides, comme des minéraux, se font typiquement en capturant la réflexion infrarouge provenant de la surface de l'objet. Il n'y a pas de contraste avec un arrière-plan dans ce cas-ci, la radiation ne vient aucunement de la transmission au travers de l'objet. Il est donc nécessaire d'avoir un bon éclairage provenant du Soleil ou une autre source pour obtenir une signature claire.

À quel point la scène est-elle dynamique ?

Les caméras hyperspectrales sont des instruments très puissants, mais ●●●

Figure 3. Détection et quantification de multiples gaz dans une même scène. En bas, détection de méthane à basse concentration, Linköping University.



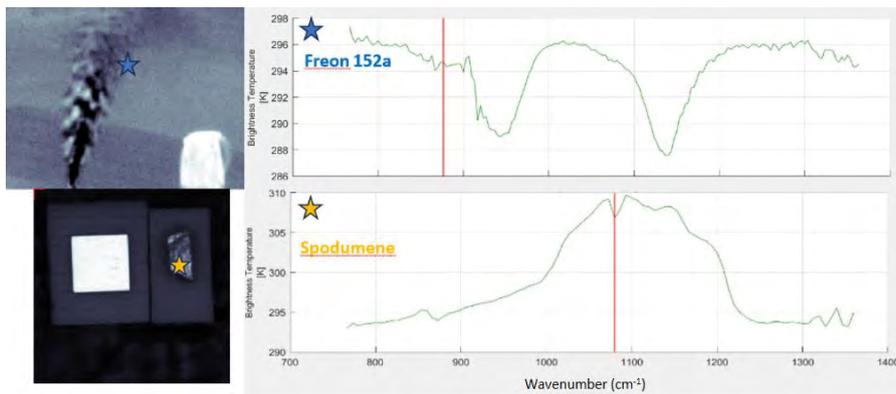


Figure 4. Haut, spectre d'absorption de fréon 152a relevé d'une mesure d'un jet d'une canne pressurisée. Bas, spectre en réflectance d'un échantillon de spodumène avec une référence infra-gold à ses côtés.

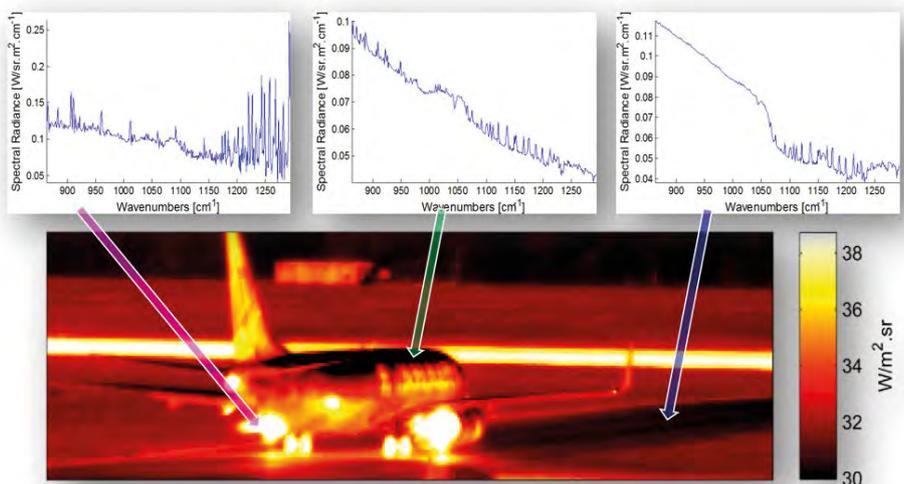
par la nature même de la mesure, il est impossible d'atteindre des vitesses d'acquisition aussi rapides qu'avec les caméras infrarouges sans résolution spectrale. Selon les paramètres de mesure, la fréquence d'acquisition de cubes de données hyperspectraux sera entre 0.1 Hz et 25 Hz. La caractérisation chimique de phénomènes plus rapides risque d'être plus efficace avec une caméra multispectrale avec une gamme de filtres rotatifs, un bon compromis entre l'hyperspectral et les caméras rapides purement thermique. La taille de la fenêtre d'acquisition (nombre de pixels), la résolution spectrale et la taille des incréments de déplacement de l'interféromètre sont des paramètres qui vont tous affecter la vitesse d'acquisition.

De quelle résolution spectrale avons-nous besoin ?

L'instinct de plusieurs premiers utilisateurs est d'utiliser la résolution spectrale la plus fine possible. Plus d'information spectrale est certainement intéressant pour l'analyse chimique, mais la résolution a un grand impact sur la vitesse d'acquisition mentionné dans le dernier point. Pour une analyse sur le terrain, avec une scène en mouvement et des conditions atmosphériques non constantes, il est souvent plus raisonnable d'utiliser une résolution un peu moins fine (p. ex. 4-8 cm⁻¹ pour IR-lointain) pour permettre aux tranches spectrales dans un même

cube de données d'être similaires. Dans la plupart des cas, l'identification chimique se réalise sans problème, même avec plusieurs gaz à identifier dans la scène. Dans les cas extrêmes où une résolution spectrale plus basse que 1 cm⁻¹ est nécessaire, il est critique d'avoir une scène stable. Le moyennage d'une série de cubes

Figure 5. La richesse d'information d'un cube hyperspectral. Signatures infrarouges pour (rouge) la combustion pour propulsion d'avion commerciale, (vert) réflexion de l'atmosphère sur le fuselage métallique, (bleu) piste de décollage contenant du quartz



hyperspectraux est une bonne manière d'améliorer le ratio signal/bruit pour les mesures difficiles sans avoir besoin d'un très long temps d'acquisition ou d'une résolution spectrale très fine.

MESURES AU SOL

Les quelques instruments hyperspectraux FTIR disponibles sur le marché sont utilisés pour une grande variété d'applications. Il y a beaucoup d'intérêt dans le secteur de la Défense pour l'utilisation de ce type d'instrument pour la caractérisation de la signature IR de cibles militaire. Les instituts de Défense sont toutefois aussi intéressés par la capacité d'identifier rapidement des produits nocifs, solides ou gaz. La surveillance de pollution et de fuite de méthane par des agences gouvernementales et laboratoires nationaux prend beaucoup d'ampleur et plusieurs campagnes de mesures ont démontré l'efficacité de ces instruments dans ce contexte. Autrement, la cartographie minière de façade de mine, la recherche universitaire ou industrielle sur l'efficacité de combustion, et même la volcanologie sont tous des champs dans lesquels les imageurs hyperspectraux FTIR au sol sont reconnus comme outils de choix. La terminologie pour la télédétection avec ces instruments est légèrement différente du standard en spectroscopie, la plage

spectrale étant plus restreinte. On retrouve le proche (ou très proche) IR (0.8-1.5 μm), le moyen IR (1.5-5.5 μm) et le lointain IR (7-15 μm). Le choix de la plage spectrale dépend de la scène choisie, les plages standards variant selon l'application. Il est possible d'obtenir une résolution spectrale (ajustable par l'utilisateur) de 64 cm^{-1} jusqu'à 0.25 cm^{-1} .

Les premiers instruments sur le marché étaient souvent larges et encombrants, mais des modèles compacts conçus plus récemment offrent une meilleure flexibilité d'opération et facilitent l'intégration sur le terrain ou dans un laboratoire pour tout utilisateur. Ces récentes additions peuvent être utilisées avec un trépied standard grâce à une grande réduction de poids. Les caméras hyperspectrales sont typiquement accompagnées d'une suite de logiciel avec une série d'outils pour l'acquisition de cubes de données, l'identification en temps réel, la visualisation et l'analyse de données, et la préparation de paramètres de mesures. Certains accessoires sont aussi disponibles tels que des télescopes pour modifier le champ de vue ainsi que des polariseurs motorisés pour moduler le signal perçu par le détecteur.

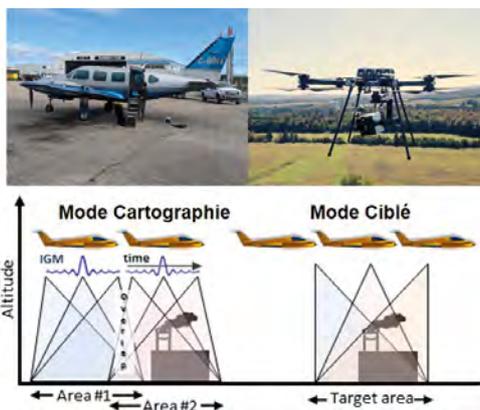


Figure 6. Exemples de support aéroporté pour caméras hyperspectrales FTIR. Les modes du survol : 1) cartographier la région, 2) mesures séquentielles sur une même cible.

Identification et Quantification de Gaz

Un bon exemple indicatif de la détection de multiples gaz par un même appareil est démontré dans la Figure 3, pouvant même séparer spatialement deux gaz mélangés (SF_6 et NH_3). Ces différents gaz pouvaient donc être non seulement identifiés par une mesure complètement passive, mais les hypercubes de données

permettent la quantification de la masse de gaz dans chaque scène grâce au modèle de transfert radiatif. Le travail impressionnant de Magnus Gålfak de l'Université de Linköping fournit un merveilleux exemple de la sensibilité de ces appareils avec sa recherche sur le méthane à basse concentration. Publiées dans Nature Climate Change, ces mesures particulièrement difficiles furent accomplies avec une caméra hyperspectrale (Hyper-Cam, Telops) munie d'un détecteur à filtre froid, réduisant la plage spectrale mesurée pour optimiser la détection de méthane à concentration et température proche de l'atmosphère. Les images résultantes offrent une façon inédite de surveiller les émissions de ce gaz qui a un immense impact potentiel sur l'environnement. Ces données sont un bon exemple de mesures nécessitant des résolutions très fines avec des temps de mesures prolongés pour permettre l'identification de méthane à de telles concentrations.

Nous pouvons voir sur les figures 4 et 5 des exemples de spectres obtenus (lointain-IR), dans un logiciel de visualisation, provenant d'un moyennage de quelques pixels dans la







Nouveaux spectromètres à réseau compact.
Résolution élevée, et sensibilité exceptionnelle

<p>A PARTIR DE 1350€</p> <p>ARIS Wide 220 nm - 1050 nm</p> 	<p>3200€</p> <p>SIENA 1.7 940 nm - 1700 nm</p> 	<p>4400€</p> <p>SIENA 1.9 800 nm - 1900 nm</p> 	<p>4400€</p> <p>SIENA 2.0 900 nm - 2100 nm</p> 
--	--	---	--

sales@ardop.com

Fournisseurs en spectromètre





région étoilée. En haut, un panache de fréon avec une décompression causant une baisse de température et donc un spectre d'absorption. Le spectre obtenu est comparé à une librairie de signatures connues ce qui permet l'identification et la quantification du gaz dans la scène. Une bouilloire chaude en blanc permet de démontrer le contraste d'intensité possible dans la même image.

Surfaces solides

L'exemple dans le bas de Figure 4 démontre l'analyse d'un échantillon solide, demandant une différente approche que pour des gaz, malgré l'utilisation du même instrument. L'échantillon de spodumène, minéral duquel le lithium est extrait, fournit un spectre par réflexion d'une source d'illumination infrarouge. Le carré blanc est une référence de réflexion unitaire, infra-gold, pour pouvoir obtenir l'information de réflectance propre de l'échantillon. Contrairement à la radiance obtenue par transmittance pour les gaz, le signal d'un échantillon solide provient uniquement de la surface du matériel. Il est donc impossible de déterminer la quantité de matériel sous la surface. Le signal réflectif peut aussi contenir de l'information spectrale provenant d'autres sources que l'objet ciblé, de là l'utilité de la référence infra-gold si possible. Tous les matériaux ont différents niveaux d'émissivité ϵ , démontrant des propriétés d'absorption et réflexion entre un corps noir ($\epsilon = 1$) et un miroir ($\epsilon=0$), qui varie selon les longueurs d'onde. La caractérisation de signature infrarouge, que ce soit pour la Défense (signature d'avion Figure 5), la géologie, ou l'analyse de nourriture, doit toujours considérer l'impact de l'émissivité sur le signal obtenu. L'imagerie hyperspectrale FTIR, accompagnée d'algorithmes supplémentaires, permet de séparer la température perçue de l'émissivité pour obtenir une caractérisation nette des objets dans le champ de vue de la caméra.

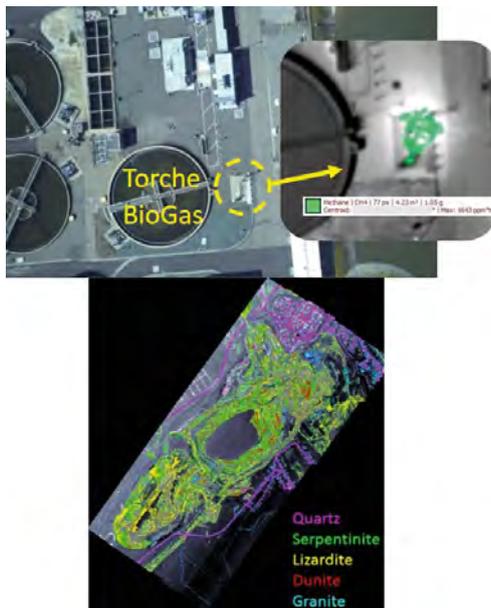


Figure 7. Haut : Détection de méthane relâché par une torche à combustion basse efficacité. Bas : Cartographie minérale complète d'une mine à ciel ouvert.

MESURES AÉROPORTÉES

L'intérêt pour l'exploration minière, la gestion environnementale ainsi que la maintenance d'installations pour le gaz et le pétrole poussent les mesures hyperspectrales à analyser d'immenses régions. Avec des senseurs plus compacts et légers, les imageurs hyperspectraux FTIR sont désormais aussi disponibles pour des mesures aéroportées. En raison de la nature infrarouge des données, ces systèmes peuvent opérer autant le jour que la nuit et en toute saison, même lorsque la neige couvre le sol. Plusieurs exemples d'intégration ont démontré un grand succès dans les dernières années, dans un avion ou un hélicoptère, et l'intégration dans des drones est même attendue dans un futur

proche. Les systèmes aéroportés peuvent s'adapter automatiquement aux conditions de vols (altitude, vitesse) pour pouvoir maximiser la sensibilité à tout moment et garantir du temps de vol efficace pour l'acquisition de données.

L'analyse de fuites de méthane sur de grands territoire est un parfait exemple de succès pour ce type d'instrument. La détection hyperspectrale FTIR aéroportée offre une incroyable amélioration pour la rapidité et efficacité de ce procédé laborieux. Cela amène un potentiel considérable pour les institutions gouvernementales qui souhaitent assurer la conformité aux réglementations environnementales tout en aidant les compagnies à rapidement améliorer l'entretien de leurs installations. Avec un type de survol similaire, la cartographie minérale hyperspectrale permet un travail d'exploration moins destructif que les tests traditionnels, sans aucune interférence avec la région. Il est possible de déconstruire le spectre obtenu par pixel et avoir une idée claire de tous les minerais sur le terrain.

CONCLUSION

L'imagerie hyperspectrale FTIR est une technologie qui permet l'obtention de signatures infrarouges avec une excellente résolution spatiale, spectrale et temporelle. Cet article présente une base d'information technique et opérationnelle à prendre en considération pour faciliter votre prise de décision si vous êtes intéressés par ces instruments. Il est recommandé de discuter avec les fournisseurs pour déterminer vos besoins et ainsi identifier la solution qui répond le mieux à vos attentes et exigences. ●

FOURNISSEUR	SITE INTERNET
Bruker	www.bruker.com
Nireos	www.nireos.com
Telops	www.telops.com

Modulateur de phase LiNbO₃ pour laser de haute puissance



Ce nouveau modulateur, dédié à la combinaison de faisceaux cohérents (CBC) et à la combinaison de faisceaux spectraux (SBC), offre une stabilité dans le temps, à la température et aux vibrations, tout en minimisant la consommation d'énergie grâce à son $V\pi$ ultra-faible (jusqu'à 16 GHz). Spécifiquement conçu pour gérer une entrée optique jusqu'à 300 mW à 1060 nm, ce modulateur est particulièrement bien adapté à la génération de lasers à haute puissance.

www.ixblue.com/exail-unveils-groundbreaking-low-v%cf%80-linbo3-phase-modulator-for-high-power-lasers/

LASER À FIBRE ERBIUM FEMTOSECONDE

L'ELMO 780 XHP (MENLO Systems) est le développement le plus récent de la série de lasers à fibre erbium femtoseconde.



La nouvelle version haute puissance délivre plus de 1 W de puissance de sortie moyenne à 780 nm, avec des durées d'impulsion de l'ordre de 100 fs dans un format très compact. La conception robuste, compacte et économe en énergie permet d'adapter facilement les paramètres du laser aux environnements scientifiques et industriels.

www.menlosystems.com/events/news-press-releases/view/3136/

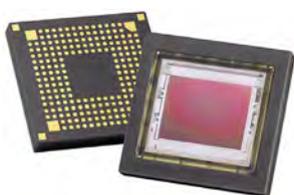
Détecteurs infrarouges pour la spectroscopie FTIR



LASER COMPONENTS a conçu un détecteur LTO (tantalate de lithium - LiTaO₃) ultrafin qui minimise le bruit tout en augmentant la sensibilité en utilisant le binning sous-pixel. Les détecteurs infrarouges LTO fonctionnent bien à température ambiante et ne nécessitent pas de stabilisation de la température. Les détecteurs infrarouges LTO peuvent maintenir des performances élevées jusqu'à 1 kHz et peuvent être utilisés jusqu'à environ 10 kHz avec une réponse rapide aux changements de flux IR.

www.lasercomponents.com/de-en/news/pyroelectric-detectors-that-bridge-the-benefits-of-lto-and-dlatgs/

CAPTEURS D'IMAGES CMOS



Emerald™ Gen2 est une nouvelle famille de capteurs d'images CMOS disponible en 8.9 mégapixels (4 096 × 2 160) ou 12 mégapixels (4 096 × 3 072), en monochrome ou en couleur, et en deux vitesses, standard et élevée. Sa matrice est centrée dans un boîtier CLGA (Ceramic Land Grid Array) compact de 21 × 20 mm². Elle dispose de deux types de sortie, LVDS et MIPI CSI 2, ce qui permet aux fabricants de caméras d'utiliser l'une ou l'autre interface.

<https://imaging.teledyne-e2v.com/products/2d-cmos-image-sensors/emerald-gen2/>

<https://imaging.teledyne-e2v.com/products/2d-cmos-image-sensors/emerald-gen2/>

Caméra multispectrale snapshot SWIR

La caméra multispectrale SWIR CICADA (SILIOS Technologies) est spécialement conçue pour permettre une forte intégration des systèmes de mesure et de contrôle par imagerie multispectrale SWIR.



La CICADA se caractérise par sa haute résolution spatiale (1.3MP). Réalisée par hybridation d'un filtre mosaïque de type Bayer sur un capteur InGaAs du commerce (SONY IMX990), cette caméra légère (70 g) et très compacte (34×38×35 mm³) divise l'image en 9 bandes spectrales sur la plage SWIR (1100-1700 nm) afin d'en extraire le spectre en chaque point de l'image.

www.silios.com/cicada-cam/



Make it EPIC!

Driving Competitiveness of
European Photonics Industry
with an International Network