

Photoniques

LA LUMIÈRE ET SES APPLICATIONS

N°138

ENTRETIENS

Henri Porte
Isabelle Sagnes

EXPÉRIENCE

Herschel découvre
l'infrarouge

FORMATION

Un bac professionnel
en photonique

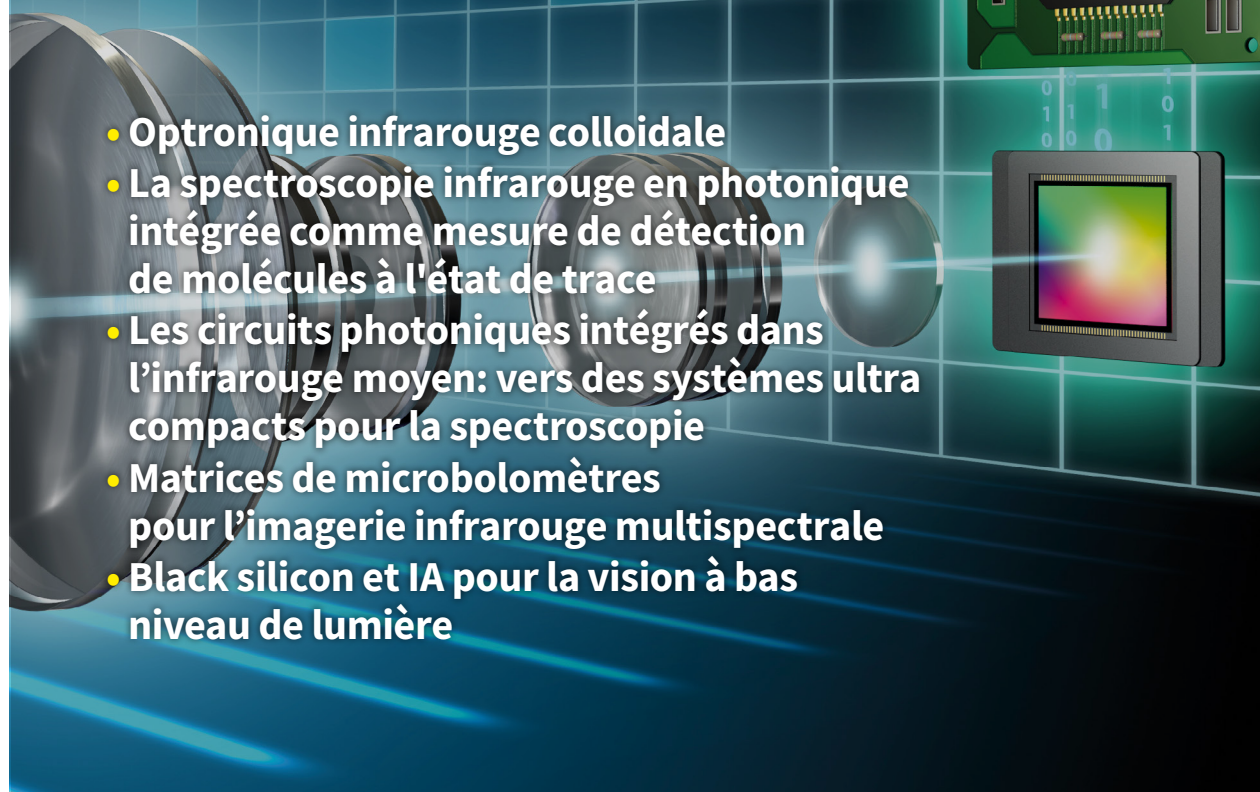
COMPRENDRE

Les lasers à cascade
quantique

DOSSIER

OPTRONIQUE & INFRAROUGE

- Optronique infrarouge colloïdale
- La spectroscopie infrarouge en photonique intégrée comme mesure de détection de molécules à l'état de trace
- Les circuits photoniques intégrés dans l'infrarouge moyen: vers des systèmes ultra compacts pour la spectroscopie
- Matrices de microbolomètres pour l'imagerie infrarouge multispectrale
- Black silicon et IA pour la vision à bas niveau de lumière



06/10 juillet 2026

OPTIQUE

SAVE THE DATE

BOURGOGNE / FRANCHE COMTÉ

VENEZ À DIJON

2026



www.sfoptique.org

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

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

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

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

www.photoniques.com



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

Directeur de publication

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

Rédaction

Rédacteur en chef

Nicolas Bonod

nicolas.bonod@edpsciences.org

Journal Manager

Florence Anglézio

florence.anglezio@edpsciences.org

Secrétariat de rédaction et mise en page

Agence de communication la Chamade

<https://agencelachamade.com/>

Comité de rédaction

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

Advertising Manager

Bernadette Dufour

Cell phone + 33 7 87 57 07 59

bernadette.dufour@edpsciences.org

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

Gestion des abonnements

abonnements@edpsciences.org

Impression

Fabrique imprimeur

B.P. 10

87500 Saint-Yrieix la Perche

Dépôt légal : juin 2026

Routage : STAMP (95)



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

Éditorial



NICOLAS BONOD

Rédacteur en chef

De l'ombre à la lumière

Les technologies photoniques ont bouleversé nos connaissances et permis des avancées majeures dans de nombreux domaines scientifiques. Lasers, fibres optiques, composants optoélectroniques : ces technologies offertes par la photonique sont aujourd'hui omniprésentes, aussi bien dans notre quotidien que dans les équipements scientifiques les plus pointus. Pourtant, les technologies photoniques n'ont pas toujours été perçues comme un enjeu industriel ou stratégique majeur.

Aujourd'hui, la donne change ; La photonique attire la lumière à mesure qu'elle s'impose au cœur des grandes transformations technologiques et industrielles. Les investissements massifs engagés dans les semi-conducteurs, les technologies quantiques, la défense ou encore l'intelligence artificielle révèlent au grand jour le rôle central joué par la photonique dans ces nouveaux défis.

Dans un contexte géopolitique tendu, où les équilibres sont profondément remaniés, la capacité à détecter, sonder, identifier et communiquer prend une dimension stratégique. Au cœur de ces enjeux : l'optronique, thématique phare de ce numéro, qui se situe à l'intersection du photon et de l'électron, de la lumière et de la matière, de la photonique et de l'électronique.

Si sa forte dynamique a été poussée par les besoins d'innovations en défense, l'optronique irrigue aujourd'hui un vaste champ applicatif, que les articles de ce dossier vous feront découvrir.

Cette montée en puissance de la photonique est le fruit d'investissements scientifiques, humains et technologiques guidés par une vision à long terme. Recherche, innovation, entrepreneuriat et formation constituent les piliers complémentaires d'une filière photonique forte et durable. Mais une filière ne se construit pas uniquement par la recherche et l'innovation : elle repose aussi sur la formation de celles et ceux qui concevront, fabriqueront, intégreront et maintiendront ces technologies. Ce numéro met en lumière le nouveau Bac Professionnel Optique Photonique. Cet article nous rappelle avec force que derrière chaque innovation et chaque production se trouvent des femmes et des hommes dont les compétences constituent la véritable richesse de notre écosystème.

Alors que certains secteurs industriels historiques traversent une période d'incertitude, la photonique constitue désormais un nouveau moteur de croissance, des connaissances comme des technologies. De l'ombre à la lumière, c'est toute une filière qui change d'échelle.

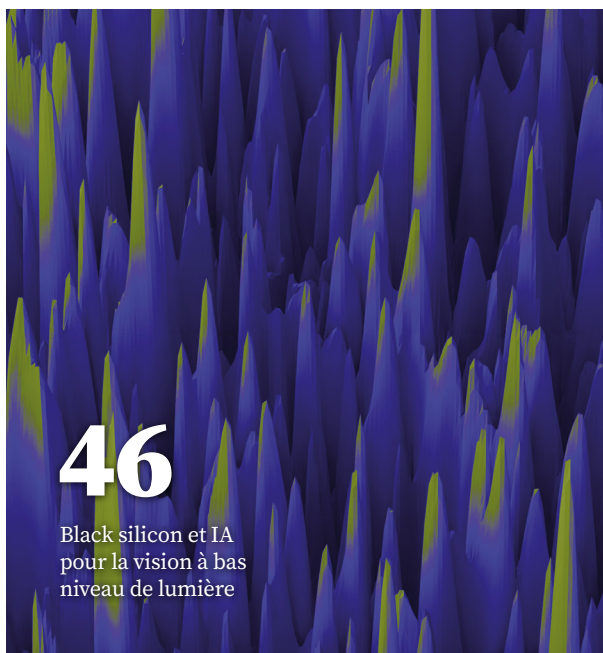


Sommaire

www.photoniques.com

N° 138

12 ENTRETIENS : Henri Porte Isabelle Sagnes

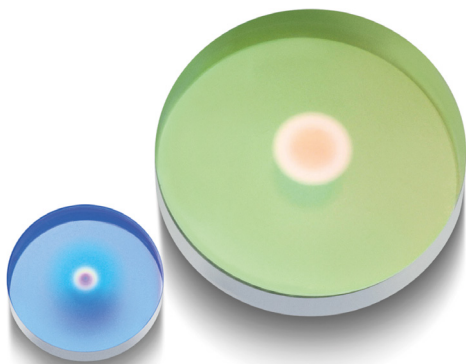


46

Black silicon et IA
pour la vision à bas
niveau de lumière

61

Nouveaux
produits



ACTUALITÉS

- 03 Éditorial et actualités de la SFO
- 05 Informations partenaires
- 09 Actualités scientifiques
- 12 Témoignage d'entrepreneur : Henri Porte
- 15 Entretien : Isabelle Sagnes

EXPÉRIENCE MARQUANTE

- 19 La lumière invisible :
Herschel découvre l'infrarouge

DOSSIER : OPTRONIQUE ET INFRAROUGE

- 24 Optronique infrarouge colloïdale
- 29 La spectroscopie infrarouge en photonique
intégrée comme mesure de détection
de molécules à l'état de trace
- 35 Les circuits photoniques intégrés dans
l'infrarouge moyen: vers des systèmes ultra
compacts pour la spectroscopie
- 41 Matrices de microbolomètres
pour l'imagerie infrarouge multispectrale
- 46 Black silicon et IA pour la vision à bas
niveau de lumière

FORMATION

- 52 Un bac professionnel pour les futurs
techniciens en photonique

COMPRENDRE

- 56 Les lasers à cascade quantique

PRODUITS

- 61 Nouveautés

Annonceurs

2b Lighting Technologies	39	Lumibird	43
AlphaNov	55	MenloSystems	27
CIOE	45	NKT Photonics	IV ^e couv.
EDP Sciences	11	Opton Laser	31, 59
EPIC	51	Phasics	49

Pro-Lite	33	Trioptics	57
ScienTec	11	WaveTel	37
SFO	II ^e couv.		
Spectrogon	13		
Toptica	23		

Crédit photo (couverture) : © iStockPhoto

L'édito de la SFO



PHILIPPE GRANGIER
Président entrant de la SFO



ANTOINE GODARD
Président de la SFO



FRANÇOIS SALIN
Président sortant de la SFO

Entre héritage et avancées scientifiques, la SFO tournée vers l'avenir

Le congrès Optique Bourgogne Franche-Comté s'annonce sous les meilleurs auspices... de Dijon où pourront être appréciés les grands crus d'exceptions de la recherche en optique-photonique. Signe d'une mobilisation record, nous sommes heureux d'annoncer une progression de plus de 10% du nombre de contributions qui dépasse 530. Au-delà du chiffre, cela traduit l'identification forte de la communauté dont le congrès couvre les différentes facettes au travers des clubs thématiques et initiatives transverses de la SFO (commission enseignement, parité, club jeunes...).

Il nous apparaît important de mettre en avant le travail d'évaluation réalisé par les membres des différents comités, essentiel et absolument crucial pour la qualité du congrès. Associé à la qualité des invités, cette exigence scientifique est déterminante pour permettre aux présidents et présidentes de sessions et aux présidents du congrès de construire un programme cohérent alliant excellence et diversité, sans oublier cette année une session qui s'annonce passionnante sur l'histoire et le patrimoine de l'optique.

Les deux laboratoires, ICB et FEMTO-ST, auxquels sont rattachés les présidents du congrès incarnent parfaitement ces valeurs. Par leur large spectre thématique et la qualité de leurs travaux, ils personnifient pleinement l'excellence de l'optique française déclinée ici à la mode bourguignonne et franc-comtoise, héritière d'une longue tradition remontant au 19^{ème} siècle avec en particulier les travaux de Jean-Antoine Quet (1810-1884), qui étudia la diffraction à Besançon.

Un autre lieu emblématique de l'optique française est le bâtiment 503 de l'Institut d'Optique à Orsay. Ce bâtiment, qui a longtemps été l'épicentre des travaux de recherche de l'Institut d'Optique et de son école d'ingénieur, a aussi été le siège de la SFO pendant plus de vingt ans, de sa création en 1983 jusqu'en 2006. Au-delà de l'encrage historique, ce site accueille désormais un écosystème intégré au service de l'innovation, cadre propice aux collaborations et aux transferts technologiques. Nous avons le plaisir d'annoncer le retour de la SFO au 503, dans un bâtiment entièrement rénové qui réunit formation, recherche et industrie, avec la présence d'entreprises partenaires et d'infrastructures dédiées ; à savoir, tous les ingrédients qui constituent notre communauté.

Il va sans dire que l'organisation du congrès et du déménagement n'aurait pas été possible sans notre Secrétaire Générale, Florence Haddouche, et ses trois collaborateurs dont nous tenons à saluer l'engagement sans faille.

Photoniquement vôtre

François Salin

Président et CEO Ilasis laser
Président sortant de la SFO

Antoine Godard

Directeur scientifique
du domaine physique – ONERA
Président de la SFO

Philippe Grangier

Directeur de recherche CNRS
Président entrant de la SFO



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

+ 650 participants attendus

+ 70 h de sessions thématiques



■ **Photonics & Artificial Intelligence**
École thématique

The Houches Physics School, France
04 – 09 avril 2027

70 participants attendus



■ **JNOG, le grand colloque de la SFO**

JNOG 2027 à Autrans
29 juin au 02 juillet 2027

200 participants attendus

À travers PÉPITES à OPTIQUE BFC 2026, la SFO rappelle que l'histoire de l'optique est une source d'inspiration essentielle pour comprendre les innovations d'aujourd'hui et imaginer celles de demain.

Grand prix Léon Brillouin

La Société Française d'Optique a le plaisir d'annoncer que le Grand Prix Léon Brillouin 2026 est attribué conjointement à Guy Millot (ICB) et Benoît Boulanger (Institut Néel) pour l'ensemble de leurs contributions exceptionnelles à l'optique non linéaire.

Guy Millot a ouvert des champs de recherche originaux en optique non linéaire dans des domaines très variés, allant des solitons optiques et instabilités de modulation aux peignes de fréquences électro-optiques et aux dynamiques non linéaires dans les fibres multimodes. Ses travaux pionniers, menés principalement au laboratoire ICB de l'Université de Bourgogne, ont initié des activités dans de nombreux groupes à travers le monde et conduit à des applications remarquables. Le jury a également salué son rôle majeur dans la création à Dijon d'une véritable école de recherche reconnue internationalement.

Benoît Boulanger est récompensé pour ses contributions théoriques et expérimentales majeures en optique non linéaire cristalline, depuis la croissance des matériaux, la modélisation des symétries et les méthodes originales de mesure des distributions angulaires jusqu'aux dispositifs optiques non linéaires, transformant des concepts fondamentaux en solutions pratiques. Menés notamment à l'Institut Néel et à l'Université Grenoble Alpes, ses travaux ont profondément marqué le domaine par leur originalité, leur rayonnement international et leurs retombées technologiques.

Deux conférences plénières d'exception à OPTIQUE BFC 2026

Mardi 7 juillet 2026 | 17 h 30 – 18 h 40

Un moment fort du congrès OPTIQUE BFC 2026 à ne pas manquer.

PÉPITES à OPTIQUE BFC 2026, trois regards sur cinquante ans d'innovation optique

À l'occasion du congrès OPTIQUE BFC 2026, la Société Française d'Optique propose une session consacrée à l'histoire récente de l'optique et de la photonique. Au cœur de cette session, le programme PÉPITES (Préservation du Patrimoine Immatériel Technologique Et Scientifique), porté par la SFO et présenté par Ariel Levenson (C2N, CNRS – Université Paris-Saclay) co-chair de la session avec Christophe Finot (ICB, CNRS - Université Bourgogne Europe), vise à préserver et transmettre la mémoire vivante de la communauté optique-photonique française à travers des archives orales associant interviews scientifiques et institutionnelles, collecte documentaire et réalisation de contenus audiovisuels.

Un voyage à travers cinquante ans d'innovations qui ont façonné l'optique moderne, de la recherche fondamentale aux applications.

Jean-Michel Gérard (CEA) revient ainsi sur les 40 ans des boîtes quantiques, depuis la découverte du procédé d'auto-assemblage par épitaxie au CNET de Bagnex en 1984 jusqu'au développement des nanostructures semiconductrices aujourd'hui au cœur de nombreuses recherches en photonique quantique. Cette histoire scientifique illustre également l'évolution des méthodes de fabrication des nanostructures, où des approches « bottom-up » sont progressivement venues compléter les procédés issus de la microélectronique.

Hervé Lefèvre (Exail) propose quant à lui un retour sur 50 ans de gyrofibre, depuis les fondements relativistes de l'effet Sagnac-Laue jusqu'aux performances actuelles des centrales de navigation inertielle. Cette histoire illustre la manière dont une idée issue de la physique fondamentale a trouvé des applications stratégiques grâce au développement des télécommunications optiques à fibre et de leurs composants associés.

Vincent Michaud (ONERA) retrace enfin les 40 ans de l'optique adaptative, technologie développée pour corriger les effets de la turbulence atmosphérique sur les observations astronomiques. Devenue indispensable sur les grands télescopes contemporains, elle se déploie désormais dans d'autres domaines comme l'imagerie biomédicale ou les communications optiques.

1,55 Md€ supplémentaire pour le quantique et les semiconducteurs

En clôture d'un forum européen consacré aux technologies quantiques et aux semiconducteurs, Emmanuel Macron a annoncé, vendredi 22 mai, une enveloppe supplémentaire de 1 milliard d'euros pour le plan Quantique du gouvernement, issu du programme d'investissements France 2030.



Emmanuel Macron a réuni chercheurs, industriels et partenaires européens autour d'un enjeu majeur : sécuriser l'avance technologique européenne dans le calcul, le quantique et les semi-conducteurs. Ces technologies reposent en partie sur des briques photoniques. Les 18 à 24 prochains mois seront

décisifs pour conserver nos positions et les accélérer.

Le président de la République annonce, *via* le programme France 2030, un investissement supplémentaire de 1 milliard d'euros sur le Plan national quantique pour assurer une position de leader et la participation de la France au PIIEC AST, porté avec l'Allemagne et les Pays-Bas et doté de 550 millions d'euros.

Photonics France a rappelé auprès du président et des ministres présents son ambition d'un plan national photonique et la nécessité de sécuriser un PPP photonique avec un budget dédié, tout en saluant l'intérêt du Chips Act 2 dans le futur programme cadre FP10 qui commencera en 2028.

Photonics West 2027 : les offres pour être exposant

Le salon SPIE Photonics West 2027 se prépare. N'oubliez pas de réserver votre place pour y être exposant. Découvrez les offres disponibles.

Le salon SPIE Photonics West se déroulera du 2 au 4 février 2027 au Moscone Center de San Francisco. C'est un événement incontournable de la filière photonique internationale qui rassemble près de 23 000 visiteurs et plus de 1600 exposants.

Business France organise le pavillon national français au cœur de l'exposition, en partenariat avec Photonics France. Son offre vous permet de disposer d'un stand clé en main à la visibilité optimale. Inscription avant le 15 juillet 2027.

SPIE propose la réservation d'espaces brut avec plusieurs choix de surfaces et des options de mobilier. L'offre est plus adaptée pour les entreprises à l'aise avec le marché américain ou adhérentes de SPIE qui peuvent bénéficier du tarif membre.

Tous les détails des offres sont disponibles sur le site de Photonics France :

www.photonics-france.org.



Bienvenue à nos nouveaux adhérents !



AAOPTO-ELECTRONIC est un concepteur et fabricant de composants acousto-optiques et des pilotes électroniques associés. Il propose des modulateurs, des déphaseurs, des déflecteurs, des sélecteurs d'impulsions... ainsi que les circuits d'attaque RF associés. Leur équipe d'ingénieurs qualifiés est également en mesure de fournir des solutions sur mesure.

Moon Photonics propose une solution qui est sur le point de transformer des marchés critiques dès aujourd'hui : mesure de distance ultraprécise pour la défense, terminaux de communication par satellite FSO 20 fois plus légers et détection de gaz à longue distance, y compris le méthane, à des portées sans précédent.

Adhérer à Photonics France, c'est contribuer à une représentation solide de toute la filière photonique auprès des pouvoirs publics. Rejoignez-nous !

AGENDA

Nos prochains rendez-vous :

■ **After Photonics**
4 juin 2026 – Paris

■ **Rencontre avec nos adhérents**
11 juin 2026 – Webinaire

■ **PLI Conférences**
1-2 juillet 2026 – Limoges

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

**CONTACTER
PHOTONICS FRANCE**

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

Actualités

13-17 avril 2026 :

3^e école du GDR

Or-Nano, Cargèse.

<https://ecole2026.sciencesconf.org/>

NANO-PHOT a été

fortement impliquée

20-22 avril 2026 :

International Conference on Energy, Materials, and Photonics – EMP26 Université Paris-Saclay, sponsorisée par NANO-PHOT

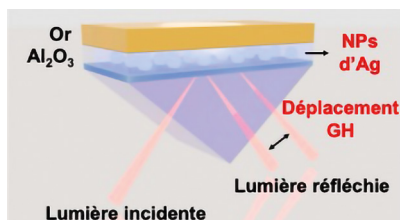
8-12 juin 2026 :

Forum des microscopies à sonde locale sponsorisé par NANO-PHOT
<https://ecole2026.sciencesconf.org/>

22 juin 2026 :

Le L2n de l'UTT a organisé sa journée labo (une centaine de participants)

Plateforme nanoplasmonique pour la bio détection ultrasensible



Un nouveau biocapteur nanoplasmonique ultrasensible a été mis en œuvre par M. Fusheng Du (doctorant NANO-PHOT) au sein du laboratoire CNRS L2n de l'UTT en collaboration avec Institut de Recherche sur les Céramiques et l'Institut de recherche XLIM. Ce nouveau biocapteur utilise une nanostructure conçue avec précision, composée de nanoparticules d'argent (Ag NPs) d'un diamètre inférieur à 5 nm, intégrées dans des nanocouches d'Al₂O₃ et recouvertes d'un mince nanofil d'or (Au). Ces nanomatériaux renforcent considérablement l'interaction lumière-matière et génèrent une réponse optique amplifiée grâce à une singularité de phase extrême qui résulte d'un retard de phase marqué au point sombre de réflexion de ce substrat nanoplasmonique, entraînant un décalage latéral considérable du faisceau réfléchi, connu sous le nom de décalage de Goos-Hänchen (GH), un phénomène physique qui a suscité un vif intérêt au sein de la communauté scientifique.

Cette nouvelle architecture a permis la détection en temps réel d'un biomarqueur du cancer à une concentration ultra-faible de 100 zeptomoles (10⁻²¹ mol/L), bien au-delà de la capacité de détection des biocapteurs optiques actuellement disponibles sur le marché. Ces travaux ouvrent la voie à de futures applications, non seulement dans le diagnostic précoce du cancer et de la maladie d'Alzheimer, mais aussi pour la surveillance environnementale en temps réel des polluants atmosphériques et aquatiques.

Plus d'information sur <https://doi.org/10.1038/s41378-026-01222-3>.

AGENDA

■ Conférence META-26
14-17 juillet 2026, Dublin
<https://metaconferences.org/META26/index.php/META>

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

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

CONTACT

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

WORKSHOP INTERNATIONAL SUR LA NANOPHOTONIQUE



Comme tous les ans, NANO-PHOT a organisé à l'UTT les 20 et 21 Mai 2026 un workshop nanophotonique en collaboration avec le professeur Alexander Govorov de l'Université de l'Ohio (États-Unis). Les Objectifs de ce workshop annuel sont

- Établir de nouveaux partenariats de recherche internationaux
- Promouvoir l'Université de technologie de Troyes, sa graduate school NANO-PHOT et son laboratoire L2n (CNRS UMR 7076)
- Offrir aux étudiants l'occasion de rencontrer des chercheurs de renommée mondiale.

Cette année, plus de 50 personnes ont participé incluant des chercheurs invités de France, Allemagne (Universités de Tübingen et Institut Leibniz Dresden), Espagne (Université de Vigo), Italie (Université de Pise), Canada (Western University) et USA (Université d'Ohio). Les domaines traités ont été variés et d'actualité : nanomatériaux (perovskites, ZnO, matériaux 2D...), chiralité, électrons chauds, émetteurs quantiques, nanoplasmonique, etc.

Photon2Startup Days : Inscriptions ouvertes !



Vous êtes doctorant ou étudiant en fin de cycle (français ou étranger) ? Venez participer à cet événement unique de trois jours, entièrement en anglais, pour présenter votre thèse, découvrir les dernières avancées de la recherche en photonique et prendre part à un atelier qui vous permettra

de révéler votre potentiel entrepreneurial ! Au programme également : conférences, entretiens individuels avec des chefs d'entreprise, réseautage, et visites d'entreprises et laboratoires locaux. Le tout dans une ambiance conviviale face à la mer (Bretagne).

PhotonQBoost : La photonique européenne en République tchèque

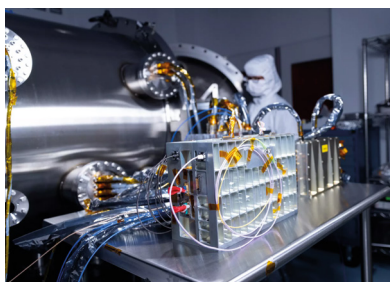
Photonics Bretagne a co-organisé la dernière Matching Mission PhotonQBoost en République tchèque, avec le Czech Optical Cluster, en collaboration avec le projet LASER-PRO Excellence Hub, ELI Beamlines et le HiLASE



Centre. Cette mission de trois jours a réuni plus de 60 experts européens à Prague et Dolní Břežany pour explorer l'écosystème tchèque en photonique, lasers et fabrication optique. Entre visites de sites emblématiques, sessions de pitches et ateliers d'idéation, les participants ont multiplié les connections et rendez-vous B2B. Soutenus par des bourses de voyage, à l'image de l'entreprise IDIL Fibres Optiques, les acteurs ont initié de futures collaborations stratégiques pour faire avancer la photonique européenne. La prochaine mission aura lieu les 8 et 9 octobre à Stuttgart (Allemagne) et portera sur la mobilité.

EXAIL SÉLECTIONNÉ PAR LA NASA POUR ÉQUIPER L'OBSERVATOIRE D'ONDES GRAVITATIONNELLES LISA

Credir: NASA/SOPHIA ROBERTS



Exail a remporté un contrat de 3,27 millions d'euros auprès de la NASA pour équiper LISA, l'antenne spatiale à interféromètre laser qui sera le tout premier observatoire spatial destiné à l'étude des ondes gravitationnelles. Prévue pour 2035, cette mission s'appuiera sur des composants électro-optiques fournis par l'entreprise, notamment des modulateurs de phase en niobate de lithium fonctionnant

dans le proche infrarouge. Seul fabricant mondial à valider l'ensemble des critères techniques exigés, Exail a également qualifié avec succès des fibres optiques actives dopées à l'yttrium résistantes aux rayonnement gamma atteignant 40 krad.

En bref

Ekinops, fleuron breton des réseaux optiques, de connectivité et de réseaux SASE, signe un protocole d'accord avec un opérateur de télécommunications européen de premier plan. Destinés au déploiement d'un réseau optique haut débit au niveau national, Ekinops fournira des équipements de transport optique basés sur la technologie WDM, ainsi que l'outil de gestion de réseau, basé sur sa solution Celestis, et des logiciels et services professionnels associés.

Kwan-tek, PME pionnière dans les capteurs quantiques, et l'Institut FOTON, unité mixte de recherche (CNRS, Université de Rennes, INSA Rennes), annoncent un partenariat stratégique ayant pour but de développer des solutions de mesure de haute précision. Ce rapprochement s'articule autour des capteurs utilisant les centres azote-lacune (NV) du diamant, une thématique commune aux deux partenaires.

Silentsys, spécialisée dans les systèmes ultra-bas bruit, a célébré son cinquième anniversaire en ouvrant les portes de ses nouveaux locaux de 300m² à ses partenaires. À cette occasion, la société a présenté en avant-première l'OFD-PRO, nouveau système de stabilisation laser offrant des performances accrues - une technologie critique pour les secteurs du quantique, des capteurs à fibre optique et de la métrologie.

AGENDA

■ **Assemblée Générale**
26 juin, Perros-Guirec

■ **ECOC**
20-24 septembre,
Malaga (Espagne)

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

■ **Photon2Startup Days**
26-28 octobre, Lannion

En chiffre

5 Projets portés par nos élèves de la Filière Innovation-Entrepreneuriat ont été distingués lors d'événements dédiés à l'entrepreneuriat étudiant à Bordeaux et à Paris-Saclay. Au-delà des distinctions obtenues, ces événements ont constitué de véritables temps d'apprentissage pour les étudiantes et étudiants. Ils leur ont permis de présenter leurs projets dans un cadre exigeant, d'échanger avec d'autres porteurs de projets et de découvrir une grande diversité d'initiatives entrepreneuriales. Félicitations aux projets Radium, Ketzal, AttoMIP, SpetraFlow et Aerotracer !

AGENDA

■ Fête de la science :

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

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

■ French Photonics Days
6 et 7 novembre

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

■ Gala SupOptique
15 novembre à Paris

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

Tous les événements sur
www.alpha-rlh.com

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

Quarante ans d'engagement scientifique au service de l'optique quantique : une journée en l'honneur de Philippe Grangier

Le 4 juin 2026, l'Institut d'Optique a eu le plaisir d'organiser, en partenariat avec Quantum-Saclay, une journée exceptionnelle consacrée à Philippe Grangier, figure majeure de l'optique quantique contemporaine. Cet événement a réuni chercheuses et chercheurs, enseignantes et enseignants, partenaires industriels et acteurs du domaine quantique afin de célébrer quatre décennies d'engagement scientifique et de contributions déterminantes à la recherche.

Au-delà de l'excellence scientifique des conférences et des échanges, cette journée a été marquée par une atmosphère particulièrement chaleureuse, conviviale et inspirante. Les discussions, les débats et les retrouvailles ont témoigné de la vitalité d'un écosystème construit au fil des années grâce à des collaborations fortes, une émulation constante et une volonté commune de faire progresser la recherche fondamentale et appliquée. Une contribution majeure au développement de l'optique quantique. Cet événement a permis de mesurer l'apport considérable de Philippe Grangier au développement de l'optique quantique. Son regard visionnaire, sa détermination et sa capacité à explorer des territoires scientifiques encore inconnus ont été largement soulignés tout au long de la journée.

Les interventions ont également mis en lumière la reconnaissance de celles et ceux qui ont travaillé à ses côtés. Nombre d'entre eux a témoigné de l'influence qu'il a exercée sur leurs travaux, leurs parcours scientifiques et, plus largement, sur l'évolution de l'optique quantique au cours des dernières décennies.

Un programme scientifique à la croisée des grands enjeux du quantique

La richesse du programme a illustré la diversité des thématiques qui façonnent aujourd'hui la recherche en optique quantique :

- La naissance de l'optique quantique ;
- la cryptographie et les communications quantiques ;
- l'intelligence artificielle appliquée à la pratique scientifique ;
- les émetteurs individuels et les simulations quantiques.

Cette diversité a permis de retracer l'histoire du domaine et de mettre en perspective les avancées récentes, tout en soulignant les nombreuses interactions entre recherche fondamentale, innovations technologiques et applications émergentes.

Les tables rondes ont donné lieu à des échanges riches et stimulants autour de plusieurs questions structurantes pour la communauté scientifique. Les discussions ont notamment porté sur l'organisation et le développement de la communauté quantique en France et en Europe, ainsi que sur les fondements mêmes de la mécanique quantique.

Une reconnaissance portée par l'excellence scientifique

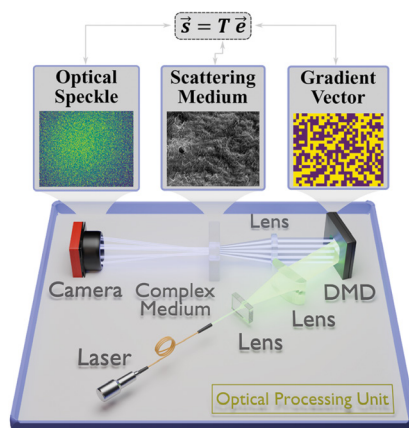
La présence de deux lauréats du prix Nobel a également souligné le niveau d'excellence scientifique qui a marqué cette journée. Serge Haroche, prix Nobel de physique 2012, et Alain Aspect, prix Nobel de physique 2022, ont ainsi participé à cet hommage, témoignant de l'importance des contributions de Philippe Grangier au sein de la communauté scientifique internationale.

À travers la qualité des interventions, la diversité des thématiques abordées et la richesse des échanges, cette journée a constitué un moment fort pour la communauté de l'optique quantique, et plus largement pour la communauté scientifique, célébrant à la fois un parcours scientifique remarquable et le dynamisme d'un domaine en constante évolution.

Entraîner optiquement des architectures modernes d'intelligence artificielle ?

L'apprentissage profond moderne s'appuie presque exclusivement sur des accélérateurs matériels électroniques (GPU) et sur l'algorithme de rétropropagation de l'erreur (« back-propagation »). Cette méthode d'entraînement entraîne des goulots d'étranglement énergétiques et temporels qui limitent potentiellement la taille et les performances des réseaux de neurones actuels.

Néanmoins des alternatives existent. Des chercheurs du Laboratoire Kastler Brossel, en collaboration notamment avec l'entreprise LightOn, ont récemment surmonté cette barrière en implémentant expérimentalement un algorithme d'entraînement appelé "alignement direct de la rétroaction" (Direct Feedback Alignment - DFA) sur une plateforme hybride optoélectronique. Le dispositif utilise une unité de traitement optique (OPU) exploitant la diffusion multiple de la lumière pour effectuer des multiplications de matrices aléatoires à très grande échelle, l'opération centrale de cet algorithme, permettant ainsi d'entraîner un modèle classique sur GPU. Cette approche innovante a permis d'entraîner optiquement des architectures de pointe dépassant le milliard de



paramètres. L'équipe a ainsi démontré de bonnes performances sur une grande variété de tâches : traitement du langage naturel (Transformers), vision par ordinateur appliquée aux projections climatiques (Vision Transformers), et synthèse

d'images *via* des modèles de diffusion. L'étude du passage à l'échelle montre de plus que pour des réseaux ultra-profonds et très larges, cette méthode hybride pourrait permettre de réduire le temps d'entraînement par rapport à l'approche classique basée sur de la back-propagation sur GPU. Ces résultats ouvrent une voie concrète pour soutenir la croissance exponentielle de l'intelligence artificielle au-delà des architectures traditionnelles de von Neumann. ●

RÉFÉRENCE

Z. Wang, K. Müller, M. Filipovich, J. Launay, R. Ohana, G. Pariente, S. Mokaadi, C. Brossollet, F. Moreau, A. Cappelli, I. Poli, I. Carron, L. Daudet, F. Krzakala, S. Gigan, "Streamlined optical training of large-scale modern deep learning architectures with direct feedback alignment," *PNAS* **123** (20), e2532022123 (2026), <https://doi.org/10.1073/pnas.2532022123>.

Comment mieux absorber la lumière du soleil ? Les limites fondamentales de l'absorption large bande

Optimiser l'absorption de la lumière solaire avec un minimum de matériau constitue à la fois une question théorique générale et un enjeu pour réduire l'impact environnemental et les coûts des cellules solaires.

Dans les cellules solaires, la diffusion lambertienne est souvent considérée comme la stratégie de référence pour piéger la lumière. Pourtant, elle ne représente pas une limite fondamentale pour l'absorption. De plus, les modèles d'absorption historiques sont en règle générale restreints au domaine de l'optique géométrique et au régime de faible absorption. Une équipe de recherche du C2N, de l'IPVF et du PROMES vient de proposer un modèle général pour l'absorption multi-résonante d'un système ouvert dissipatif. Il permet de déterminer la

limite fondamentale de l'absorption large bande dans une couche d'épaisseur d , qui s'exprime simplement sous la forme d'une loi de Beer-Lambert généralisée : $A = 1 - \exp(-Fad)$, où a est le coefficient d'absorption et F le facteur d'augmentation du trajet optique.

Cette étude apporte une réponse à un débat ancien sur la meilleure stratégie de piégeage de la lumière dans les cellules solaires. Pour une illumination provenant de toutes les directions (isotrope), la limite obtenue est $F = 4n^2$, où n est l'indice de réfraction. Ce résultat étend la limite lambertienne à l'optique ondulatoire et

aux fortes absorptions. Pour une illumination restreinte angulairement, F peut être augmenté jusqu'à $F = 8\pi n^2/\sqrt{3}$ en utilisant une absorption multi-résonante induite par des motifs périodiques hexagonaux. Ces résultats offrent de nouvelles perspectives pour optimiser l'absorption de la lumière solaire et pour réduire la quantité de matériau, ouvrant la voie à des cellules solaires ultrafines et efficaces. ●

RÉFÉRENCES

S. Collin, M. Giteau, "Upper Bounds on Broadband Absorption and Application to Solar Cells," *PRX Energy* **5**, 023006, 2026 <https://doi.org/10.1103/1tzg-hgqx>

Transmission sélective d'images en milieu diffusant grâce à l'intrication quantique

Transmettre fidèlement des informations spatiales, comme l'image d'un objet, à travers des milieux désordonnés (tissus biologiques, turbulences atmosphériques ou fibres optiques multimodes) constitue un défi majeur de l'optique moderne.

Si les techniques actuelles de façonnage du front d'onde à l'aide de modulateurs spatiaux de lumière (SLM) permettent de compenser la diffusion, elles consistent généralement à inverser le processus de manière classique et trouvent leurs limites lorsque le milieu est trop complexe ou épais. Des chercheurs de l'Institut des Nanosciences de Paris (INSP), du Laboratoire Kastler Brossel (LKB) et de l'Université de Glasgow ont proposé une approche originale pour transmettre des images à travers des milieux diffusants en associant le façonnage du front d'onde aux propriétés quantiques de la lumière. En particulier, ils ont démontré qu'il était possible de rendre un milieu diffusant transparent uniquement pour une information portée par des paires de photons intriqués, alors qu'il demeure totalement opaque pour un faisceau de lumière classique.

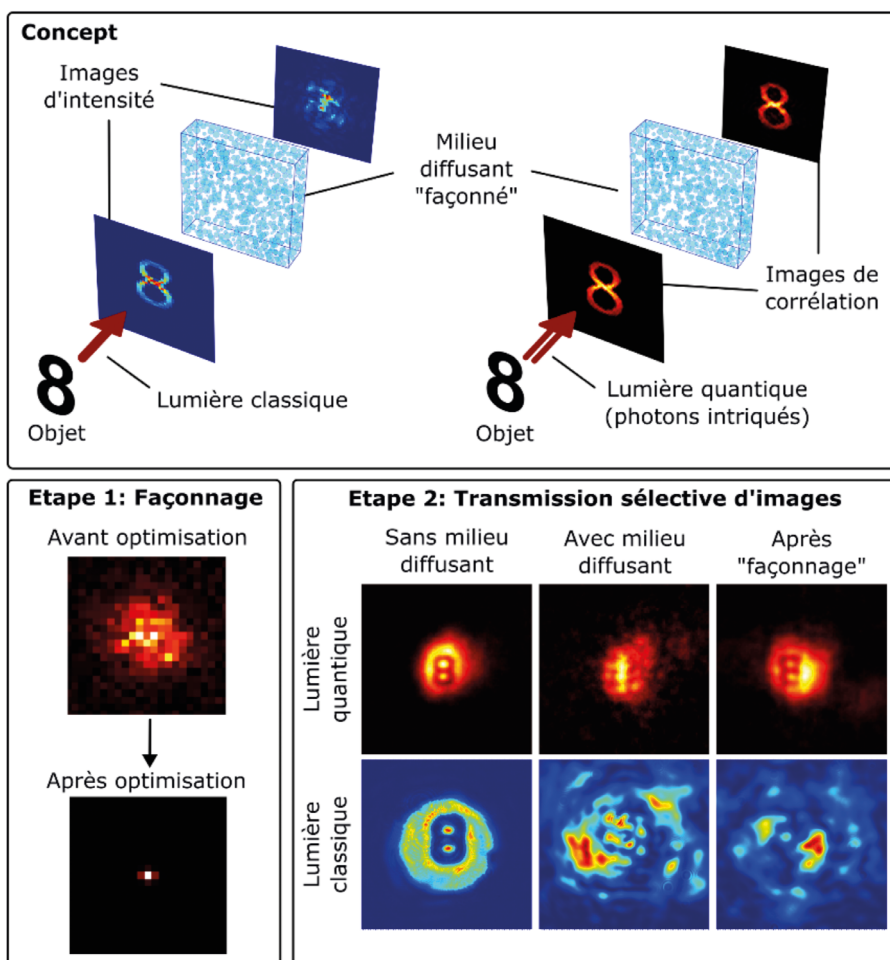
Le principe repose sur l'optimisation d'un masque de phase appliqué au SLM afin de préserver spécifiquement les corrélations spatiales des photons intriqués après leur propagation à travers le désordre. L'intrication agit ainsi comme une clé physique : l'image encodée sur les paires de photons intriqués est préservée à la sortie dans les corrélations, tandis que celle transportée par une lumière classique, soumise au même façonnage, voit son information systématiquement détruite. Le milieu complexe n'est alors plus un simple obstacle dont on cherche à s'affranchir, mais devient également un composant actif et programmable capable de discriminer l'information classique de l'information quantique. Cette

avancée fondamentale contribue à l'amélioration des techniques d'imagerie à travers les milieux diffusants, avec un potentiel pour l'imagerie biomédicale, mais également pour les communications quantiques sécurisées, qui pourraient être protégées des signaux classiques parasites grâce à ce type de façonnage. ●

RÉFÉRENCES

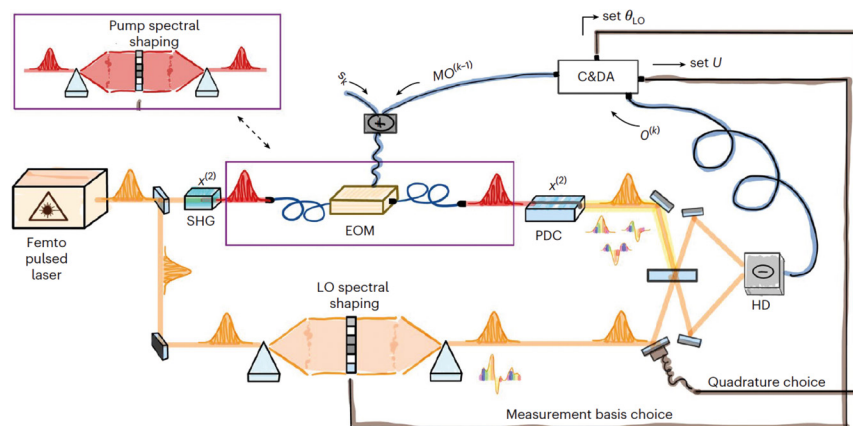
- B. Courme, C. Vernière, M. Joly, D. Faccio, S. Gigan et H. Defienne, "Non-classical optimization of entangled photons through complex media," *Optica* (2026). <https://doi.org/10.1364/OPTICA.583959>
- C. Vernière, R. Guitter, B. Courme et H. Defienne, "Entanglement-enabled image transmission through complex media," *Nature Physics* (2026). <https://doi.org/10.1038/s41567-026-03265-9>

Concept : Un milieu diffusant « façonné » à l'aide d'un modulateur spatial de lumière agit comme un filtre sélectif. Il diffuse la lumière classique (images d'intensité) tout en permettant la transmission de l'information spatiale portée par la lumière quantique (images de corrélation issues de photons intriqués).



Un ordinateur à réservoir photonique quantique à variables continues doté d'une mémoire contrôlable

Des marchés financiers aux signaux chaotiques, la prédiction de phénomènes complexes qui évoluent dans le temps constitue un défi majeur pour l'apprentissage automatique.



Protocole QRC, dispositif expérimental : laser femtoseconde, génération de seconde harmonique SHG, modulateur électro-optique EOM ou mise en forme d'impulsion (Pumps Spectral shaping), conversion paramétrique descendante PDC, détection homodyne HD.

Le *reservoir computing* offre un cadre élégant : au lieu d'entraîner l'ensemble d'un réseau neuronal, on exploite la dynamique naturelle d'un système physique complexe (le « réservoir ») et seule la couche de sortie est optimisée, réduisant considérablement le coût de l'apprentissage. Des chercheurs du Laboratoire Kastler Brossel (LKB, Paris) et de l'IFISC (Palma de Majorque) ont démontré expérimentalement une plateforme de calcul à réservoir quantique (QRC) photonique à variables continues, dotée d'une mémoire en temps réel. Le réservoir est un état quantique multimode de la lumière, généré de manière déterministe par un processus optique paramétrique, dans lequel plusieurs bandes de fréquence sont intriquées. L'information est encodée *via* la mise en forme programmable de la phase du laser de pompe et lue par

détection homodyne sélective en mode. La mémoire est assurée par une rétroaction électro-optique en temps réel, conférant une *fading memory* contrôlable, indispensable pour capturer les dépendances temporelles. L'exploitation de la structure multimode intriquée améliore à la fois la mémoire et l'expressivité du système, permettant d'accomplir des tâches non linéaires — vérification de parité et prédiction de signaux chaotiques — avec de meilleures performances que les approches classiques équivalentes. ●

RÉFÉRENCES

I. Paparelle, J. Henaff, J. García-Bení, É. Gillet, D. Montesinos, G. L. Giorgi, M. C. Soriano, R. Zambrini, V. Parigi, "Experimental memory control in continuous-variable optical quantum reservoir computing," *Nature Photonics* **20**, 413–420 (2026). <https://doi.org/10.1038/s41566-026-01880-9>



VIDEO-COLORIMETRE

POUR MESURE DE LUMINANCE ET DE COULEUR PAR CARTOGRAPHIE

Excellent rapport qualité/prix

Avec sa grande diversité d'objectifs, son capteur CMOS et ses filtres tristimulus de très haute qualité, le vidéo-colorimètre LMK 6 est un des produits phares de la gamme TECHNOTEAM

CARACTERISTIQUES

Capteur avec résolution de 5, 12 ou 30 millions de pixels.

Filtres tristimulus de haute qualité.

Large choix d'objectifs.

Léger et compact.

APPLICATIONS

Mesure de façades, feux, voyants, dans le domaine de l'automobile et avionique.

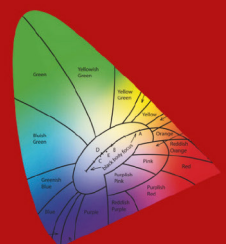
Mesure de luminance et d'éblouissement en tunnel et sur route.

Mesure en environnement virtuel (AR-VR).

LED / SSL ...



ScienTec c'est aussi, la distribution de :
Luxmètres,
Photomètres,
Chromamètres,
Vidéo-colorimètres,
Photogoniomètres,
Sources de référence...





Témoignage d'entrepreneur : Henri Porte

Entretien avec Henri Porte, chercheur CNRS puis cofondateur de la société Photline Technologies spécialisée dans les modulateurs électro-optiques, rachetée par iXBlue devenue aujourd'hui Exail.

<https://doi.org/10.1051/photon/202613812>

VOUS AVEZ COMMENCÉ VOTRE CARRIÈRE PAR LA RECHERCHE ACADÉMIQUE. POUVEZ-VOUS REVENIR SUR VOTRE PARCOURS INITIAL ?

Oui, bien sûr. J'ai aujourd'hui 65 ans et j'ai commencé mes études à la fin des années 1970 à l'université de Besançon. Mon parcours est très classique : un cursus entièrement universitaire. J'ai découvert l'optique et la photonique assez naturellement, car beaucoup d'enseignants étaient issus du laboratoire d'optique de Besançon, qui était déjà très fortement positionné sur ces thématiques. À travers les travaux pratiques, j'ai découvert le laser, puis plus spécifiquement les matériaux électro-optiques, qui m'ont immédiatement séduit. À l'issue de ma maîtrise, j'ai poursuivi par un DEA d'optique au laboratoire, puis par une thèse de troisième cycle que j'ai commencée en 1983 et soutenue en 1985. À l'époque, les thèses duraient au minimum deux ans.

QUEL ÉTAIT LE SUJET DE VOTRE THÈSE ?

J'ai travaillé en particulier sur l'accordabilité dynamique des lasers à colorant à l'aide de modulateurs électro-optiques, à travers différents schémas de multiplexage, de modulation et de traitement de l'information. Les lasers à colorant étaient alors un remarquable moyen d'obtenir des sources accordables sur pratiquement tout le spectre visible, précédant alors l'émergence du laser titane-saphir. C'était une période extrêmement stimulante, avec des dispositifs spectaculaires.

À L'ISSUE DE VOTRE THÈSE, VOUS ENTREZ TRÈS JEUNE AU CNRS.

Oui, j'ai eu cette chance. J'ai intégré le CNRS à 25 ans, ce qui serait quasiment

impossible aujourd'hui. J'ai alors rejoint l'équipe d'opto-électronique du laboratoire P.M. Duffieux à Besançon, sous la direction de Jean-Pierre Goedgebuer, et j'ai poursuivi des travaux sur les modulateurs optiques, avec l'idée de développer des dispositifs intégrés pour des applications en télécommunications.

QUELLES ÉTAIENT LES APPLICATIONS VISÉES ?

Nous travaillions sur des architectures de multiplexage par retards optiques, fondées sur des concepts de cohérence et d'interférométrie. En utilisant des cascades de modulateurs électro-optiques introduisant des différences de chemins optiques progressivement croissantes, il était possible d'encoder des informations dans le spectre d'une source à large spectre. À la réception, des interféromètres similaires disposés en parallèles permettaient de décoder l'information canal par canal. C'était très original, mais nous utilisions alors des modulateurs massifs nécessitant des tensions de commande élevées. Il est vite apparu que, pour des applications télécom réalistes, il fallait basculer vers des composants à faible tension. L'optique intégrée s'est donc imposée naturellement.

C'EST LÀ QUE VOUS DÉVELOPPEZ UNE FILIÈRE TECHNOLOGIQUE COMPLÈTE EN PHOTONIQUE INTÉGRÉE ?

Exactement. À la fin des années 1980, nous avons décidé de développer nous-mêmes une filière d'optique intégrée sur niobate de lithium. L'équipe s'est étoffée, nous avons créé une salle blanche, obtenu des soutiens de France Télécom, de la DGA, de la région, et monté une véritable chaîne technologique. Tout au long des années 1990, nous

avons publié de nombreux travaux, déposé des brevets et encadré une douzaine de thèses dans ce domaine.

À LA FIN DES ANNÉES 1990, LE CONTEXTE TÉLÉCOM ÉVOLUE TRÈS VITE.

Oui. En 1999, avec l'essor d'Internet, le secteur des télécoms était en pleine explosion. Alcatel connaissait bien nos travaux et est venu nous proposer de créer une start-up à Besançon, afin de développer une filière européenne de modulateurs en niobate de lithium, pour des raisons de souveraineté technologique, face à une forte dépendance vis-à-vis de fournisseurs américains et japonais. À titre personnel, j'avais 39 ans, je venais de devenir directeur de recherche, et je sentais que la recherche académique sur le niobate de lithium arrivait à un certain tournant. Le projet industriel m'a immédiatement séduit.

EST-CE DANS CE CONTEXTE QUE VOUS CRÉEZ PHOTLINE TECHNOLOGIES ?

En effet, nous créons alors la société Photline Technologies en septembre 2000, avec deux de mes anciens doctorants devenus maîtres de conférences, Pascal Mollier et Jérôme Hauden, associés dans cette aventure. Nous avons bénéficié du soutien d'investisseurs industriels, notamment Alcatel, Thales, et également Photonetics qui était intéressé par des modulateurs de phase pour les gyroscopes à fibre optique. Le marché télécom s'est malheureusement effondré dès 2001, juste après la création de l'entreprise. Mais nous avons eu la chance de nous positionner très tôt sur le marché des capteurs, en particulier les gyromètres à fibre optique, qui nous ont permis de traverser cette période critique.

VOUS AVIEZ QUITTÉ LE CNRS DÈS LA CRÉATION DE L'ENTREPRISE ?

J'avais d'abord bénéficié d'une mise à disposition, puis d'un détachement, avant de quitter définitivement le CNRS. J'ai profité de la loi Allègre sur l'innovation, votée en 1999, qui facilitait grandement ce type de parcours. Le fait d'avoir un droit au retour pendant quelques années est un véritable soutien pour la prise de décision, même si, une fois l'entreprise sur les rails, on n'y pense plus du tout.

L'ENTREPRISE SE DÉVELOPPE ENSUITE SUR DE NOMBREUSES APPLICATIONS.

Oui, la technologie des modulateurs électro-optiques a trouvé de multiples débouchés hors télécoms. Au fil des années, Photline a connu une croissance continue, avec une diversification des marchés et une forte rentabilité. En 2015, nous avons décidé de rejoindre iXblue, qui était déjà l'un de nos clients. iXblue avait une stratégie claire d'intégration verticale que nous partageons, visant à maîtriser en interne toutes les briques technologiques nécessaires aux gyroscopes à fibre optique : fibres spéciales, circuits optiques, modulateurs, lasers, etc.

QUELLE ÉTAIT LA TAILLE DE PHOTLINE AU MOMENT DU RACHAT ?

En 2015, nous étions environ 40 salariés, avec un chiffre d'affaires de l'ordre de 8 M€,

et une rentabilité solide. Photline est alors devenue l'un des sites industriels d'iXblue, spécialisé dans les modulateurs optiques.

COMMENT S'EST CONSTRUITE, ET MAINTENUE DANS LE TEMPS, CETTE COLLABORATION ENTRE LE MONDE ACADÉMIQUE ET L'ENTREPRISE ?

La collaboration avec le département d'optique de FEMTO-ST à Besançon a toujours été centrale et ne s'est jamais interrompue, y compris après la création de Photline puis son intégration dans iXblue et Exail. Dès le départ, il n'a jamais été question de couper les liens avec le laboratoire, mais au contraire de faire évoluer les travaux académiques vers des thématiques complémentaires de celles développées industriellement. Au laboratoire, l'objectif n'était plus de travailler sur des modulateurs directement exploitables, mais d'explorer des architectures nouvelles, plus ambitieuses. Plusieurs chercheurs ont joué un rôle clé dans cette dynamique, notamment Nadège Courjal sur de nouvelles architectures en niobate de lithium, et Matthieu Chauvet sur les PPLN en couches minces. La montée en puissance de plateformes technologiques comme MIMENTO a également été déterminante, en permettant des travaux communs sur des procédés avancés : gravure, photolithographie, traitements thermiques ou diffusion du titane. Cette interaction s'est aussi traduite par des thèses CIFRE, des

collaborations avec plusieurs départements de FEMTO-ST, et une circulation continue des compétences. De notre côté, nous disposons d'une équipe R&D solide et avons recruté de nombreux doctorants et ingénieurs issus du laboratoire. Nous n'avons jamais cherché à fonctionner en vase clos : les collaborations académiques, en France comme en Europe, ont été essentielles pour maintenir un haut niveau d'innovation et explorer de nouveaux marchés, notamment dans le spatial. Aujourd'hui encore, les contacts avec FEMTO-ST restent fréquents et illustrent une coopération académique-industrielle inscrite dans la durée.

QUEL A ÉTÉ VOTRE RÔLE APRÈS L'INTÉGRATION DANS IXBLUE ?

Je suis évidemment devenu directeur du site de Besançon pendant environ cinq ans. Ensuite, la direction m'a confié un rôle plus transverse : le pilotage de la stratégie photonique du groupe. J'ai progressivement transmis la direction opérationnelle du site à Pascal Mollier et Guillaume Alixant, responsable de production, qui en ont aujourd'hui la responsabilité collégiale, et j'ai travaillé sur la croissance externe, la stratégie technologique et commerciale, ainsi que les recrutements clés. C'est dans ce cadre que nous avons intégré plusieurs sociétés photoniques, notamment à Bordeaux et Limoges, et structuré un véritable pôle photonique au sein du groupe.

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

VOUS QUITTEZ FINALEMENT L'ENTREPRISE EN 2023.

Oui. iXblue a été racheté par le Groupe Gorgé pour donner naissance à Exail en 2022, et j'avais déjà pris la décision de partir. La succession avait été soigneusement préparée, tant sur le site de Besançon que pour la stratégie photonique globale, désormais pilotée par Bruno Desruelles, fondateur de MuQuans à Talence et qui fait aujourd'hui un travail remarquable à ce poste.

QUELLE EST, AUJOURD'HUI, VOTRE VISION DE L'ÉCOSYSTÈME PHOTONIQUE FRANÇAIS ?

Je pense que la filière photonique française a un potentiel considérable. Aujourd'hui, j'interviens à temps partiel, avec une approche davantage "business", dans le cadre de mes activités avec CFI France, une banque d'affaires remarquable qui a choisi de se positionner volontairement sur la photonique et le quantique. Ce qui est intéressant, c'est que nous partageons une vision très convergente avec son PDG, Jean-Marc Teurquell : la photonique est une technologie à très forte valeur ajoutée, "magique" au sens où elle ne cesse de produire de nouvelles applications, et la France a des atouts solides dans ce domaine. Nous avons en France des formations d'excellent niveau et un écosystème académique extrêmement riche. Je pense par exemple aux liens que nous avons pu développer avec SupOptique : lorsque j'étais encore chez iXblue, je me suis occupé des relations avec l'école, notamment du parrainage d'une promotion. Cela s'est très bien passé, et cela illustre la qualité du vivier. Plus largement, la recherche française en photonique est très forte, avec des laboratoires reconnus, des infrastructures de haut niveau, et une capacité à former des ingénieurs et des chercheurs de grande qualité.

PENSEZ-VOUS QU'IL FAUDRAIT UNE STRATÉGIE NATIONALE PHOTONIQUE ?

C'est un point important. La photonique est par nature transverse : elle irrigue de nombreuses filières dans l'automobile, la défense, la santé, les télécoms, le spatial, l'industrie... mais elle ne se présente pas comme une filière unique, simple à

résumer. Il est plus facile d'expliquer une filière automobile, une filière pharmaceutique, ou une filière défense. La photonique, elle, est partout, donc elle est plus complexe à raconter. Mais justement : cette transversalité est aussi sa force. Le potentiel économique et technologique est tel que, tôt ou tard, cela finit par s'imposer. On peut identifier en son sein des branches très structurées, la lunetterie, par exemple, lisible et cohérente, mais sur d'autres segments, comme les lasers ou l'intégration photonique, la chaîne de valeur est plus diffuse. Si l'on prend l'exemple du quantique qui prend une importance croissante, les résultats vont prendre une très forte ampleur, c'est une évidence : on y voit déjà des équipes et des entreprises remarquables issues de la photonique s'y investir. Mais à quel horizon industriel, et quels seront les gagnants de la course, c'est encore difficile à dire. C'est un domaine complexe, et il faut un peu de temps pour que les trajectoires industrielles se stabilisent dans ce domaine.

AU-DELÀ DU QUANTIQUE, QUELS ACTEURS OU QUELLES DYNAMIQUES VOUS SEMBLERENT STRUCTURANTES AUJOURD'HUI ?

Il y a plusieurs trajectoires très fortes. On peut penser aux applications dans le domaine de l'espace, sur les télécommunications, les liens terre-satellite, et plus généralement sur des sujets où la photonique devient stratégique. De nouveaux acteurs ont émergé ces dernières années dans ce domaine qui entraînent une formidable dynamique collective. On voit clairement un investissement massif, notamment sur les communications spatiales, et j'espère sincèrement que cela ira très loin.

ET SUR LA SOUVERAINETÉ : QUEL RÔLE ATTRIBUEZ-VOUS À LA PHOTONIQUE ?

Dans mon propre parcours, la logique de souveraineté a été un déclencheur : c'est une vision portée à l'époque notamment par la DGA et certains industriels, qui a contribué à la création de Photline. Et, au final, l'aventure a montré qu'un projet construit sur cette ambition pouvait réussir. La difficulté, c'est que la souveraineté photonique ne se résume pas à une seule brique. La photonique couvre énormément

de domaines, et il est donc difficile d'identifier un seul « maillon faible » évident. Nous avons des forces, par exemple en microélectronique, mais l'équilibre global est complexe. Pour terminer sur ce point, la photonique en France est riche d'un grand nombre de PME innovantes, mais gagnerait à l'émergence d'un nombre plus important d'entreprises de taille intermédiaire (ETI) permettant de faire face, aux côtés des grands groupes à une compétition internationale agressive.

VOUS AVEZ AUSSI ÉTÉ TRÈS IMPLIQUÉ DANS LA STRUCTURATION NATIONALE VIA PHOTONICS FRANCE.

Oui, parce qu'il y a un moment où il faut se structurer collectivement. La filière a connu des phases de recomposition, et Photonics France a permis de donner une image plus unitaire et plus forte. J'ai rejoint le conseil d'administration, puis j'ai été vice-président, et je m'y suis investi pendant plusieurs années, à partir de la fin des années 2010.

EN QUOI CONSISTE VOTRE NOUVELLE ACTIVITÉ AVEC CFI FRANCE ?

Mon rôle est celui d'apporteur d'affaires et de conseiller technologique. Je connais encore bien la filière, notamment parce que j'ai été vice-président de Photonics France pendant plusieurs années. Cela m'a permis de rencontrer beaucoup d'acteurs : dirigeants, industriels, clients, fournisseurs, chercheurs. Je prends donc contact avec des entreprises que j'identifie en amont comme présentant un profil intéressant pour des opérations capitalistiques (croissance externe, rapprochements, transmission...). Je rencontre les équipes, je visite les sites, j'essaie de tisser des liens, de comprendre la dynamique, la technologie, le marché, et les intentions. Quand une opportunité se dessine, les professionnels de CFI France entrent dans la boucle et vont accompagner le projet jusqu'à son terme. Ce sont des processus longs : il faut comprendre le plan d'affaires, traduire la valeur technologique dans un formalisme accessibles aux investisseurs ou acquéreurs potentiels, et construire une trajectoire cohérente. Ma contribution est d'aider à rendre cette dimension technologique lisible et crédible. ●



Entretien avec Isabelle Sagnes

Directrice de recherche CNRS au C2N, spécialiste de sources de photons sur matériaux III-V, coordinatrice scientifique du réseau RENATECH, directrice du PEPR Electronique pour le CNRS.

<https://doi.org/10.1051/photon/202613815>

AVEZ-VOUS TOUJOURS SOUHAITÉ TRAVAILLER DANS LES SCIENCES ?

A l'origine, je voulais être chef d'orchestre car au collège et lycée à Nice, je me suis essentiellement consacrée à la musique. C'est pourquoi après mon bac, j'ai d'abord tenté une filière musicale, en passant le concours Louis Lumière pour devenir ingénieure du son à Paris. Très vite, je suis revenue à Nice où j'ai repris des études scientifiques universitaires sur le campus de Valrose. La musique m'avait sans doute donné une certaine intuition mathématique et j'ai obtenu de très bons résultats. Mes enseignants m'ont alors conseillé d'aller à Grenoble pour faire de la physique appliquée. C'est ainsi que j'ai intégré le magistère de physique de Grenoble, où j'ai véritablement découvert la physique de laboratoire, une période que j'ai adorée.

CHERCHIEZ-VOUS À VOUS SPÉCIALISER EN MICROÉLECTRONIQUE ?

J'ai plutôt suivi un DEA orienté optique et optoélectronique. J'ai fait une thèse à Grenoble dans un laboratoire très technologique, au cœur de ce qui était alors une véritable pépite française en micro-et nano-électronique. J'ai travaillé sur 4 sujets en parallèle : les détecteurs infrarouges accordables, les hétérostructures silicium-germanium pour la détection et le transport dans des gaz de trous bidimensionnels, le silicium poreux. Ma thèse constituait un état de l'art solide sur ces différents thèmes. Je l'ai soutenue en juillet 1994 devant un jury prestigieux, ce qui témoigne de l'intérêt scientifique du travail.

CETTE THÈSE VOUS A-T-ELLE CONVAINCUE DE POURSUIVRE EN RECHERCHE ACADÉMIQUE ?

Avant même la soutenance, on m'avait proposé un poste intéressant au CNET à Meylan, comme ingénieure France Télécom. J'ai dû soutenir rapidement pour pouvoir être recrutée dès août 1994. Je me suis retrouvée responsable d'une filière technologique en microélectronique avec une équipe à diriger. Ce fut une expérience intense, mais qui m'a éloignée de la recherche. Après quelques années, j'ai senti le besoin de revenir à une activité plus tournée vers la recherche. J'ai alors demandé à changer de site et j'ai rejoint le CNET de Bagneux pour travailler sur la croissance de matériaux III-V. J'ai quitté la métropole grenobloise après y avoir passé 10 années. Je me suis installée en région parisienne, je suis repartie de zéro, j'ai dû apprendre de nouvelles techniques et m'imposer dans un environnement parfois difficile, notamment en tant que femme.

DANS QUELLES CONDITIONS AVEZ-VOUS REJOINT LE CNRS ?

À la fin des années 1990, le site de Bagneux a progressivement fermé. En parallèle, un nouveau laboratoire CNRS était en projet de création, le Laboratoire de Photonique et Nanostructures. J'ai passé le concours CNRS et j'ai été recrutée comme chargée de recherche dans une structure alors en cours de création. J'ai mené mes premières années de chargée de recherche CNRS au CNET, avec Jean-Yves Marzin. J'ai ensuite participé très activement à la conception et à la construction du LPN. J'ai suivi de près le chantier avec Ali Madouri ingénieur au laboratoire, j'ai participé aux choix techniques et travaillé avec les architectes et les équipes de sécurité.

POURQUOI VOUS ÊTES-VOUS SI FORTEMENT INVESTIE DANS LA CONSTRUCTION DE CE NOUVEAU LABORATOIRE DE RECHERCHE ?

J'avais une connaissance très concrète de ce que représente une salle blanche, de son organisation, de ses contraintes et de son fonctionnement quotidien. Pendant ma thèse à Grenoble, j'avais travaillé dans une salle blanche exceptionnelle. Puis, en arrivant à France Télécom, j'ai eu la chance de travailler dans les salles blanches de Crolles 1 à STMicroelectronics ainsi qu'au sein du CEA-Leti. Lorsque le nouveau bâtiment du LPN a commencé à sortir de terre, j'étais quasiment la seule à maîtriser cet environnement dans le détail. Je savais ce que signifiait organiser les flux, les espaces, les équipements, et anticiper les usages futurs. Cela explique pourquoi je me suis retrouvée très naturellement en première ligne. C'était ma première grande expérience de construction collective d'un outil de recherche, et cela a été déterminant pour la suite de mon parcours. C'était une période très intense et très vivante. J'en garde un excellent souvenir, parce que de nombreux projets se mettaient en place et que tout restait à construire. C'était exigeant, mais très stimulant.

COMMENT S'EST DÉROULÉE LA CONSTRUCTION DU BÂTIMENT ET DE LA SALLE BLANCHE ?

Le chantier a été extrêmement rapide car la construction a été gérée par le privé, avec des fonds issus de France Télécom et d'Alcatel, et sans les lourdeurs classiques des appels d'offres publics. Nous travaillions directement avec les architectes, ce qui permettait une grande réactivité. C'était une période très enthousiasmante. ● ● ●

Le bâtiment a commencé à sortir de terre pendant l'année 2000 et la salle blanche a été construite en moins d'un an.

QU'EN ÉTAIT-IL DES ÉQUIPEMENTS SCIENTIFIQUES ?

Les équipements provenaient en grande partie du site de Bagneux, qui était technologiquement très en avance. J'ai donc piloté le déménagement et la réinstallation de ces équipements, ce qui a représenté un travail considérable. Cette phase de « cheffe de chantier » a duré environ trois ans. À partir de fin 2001, une nouvelle étape a commencé. Une fois le site opérationnel, j'ai pu me recentrer sur la science. J'avais désormais à disposition une salle blanche parfaitement adaptée, dont je connaissais intimement les capacités.

QUEL ÉTAIT ALORS VOTRE PROJET DE RECHERCHE ?

Créer des sources de lumière de matériaux innovants, faire sortir des photons, concevoir des dispositifs optiques. Les matériaux III-V étaient pour moi un moyen, pas une fin. Avec le recul, je mesure à quel point mon parcours en microélectronique CMOS m'a donné une base extrêmement solide. Passer ensuite aux photons, dont la complexité dépasse largement celle d'un transistor, m'a ouvert un champ d'action beaucoup plus large. Avoir vécu dans ces deux mondes est une vraie richesse.

QUELLES INNOVATIONS AVEZ-VOUS PORTÉES ?

Je me suis concentrée à développer l'épitaxie en phase vapeur, face à une communauté très attachée à l'épitaxie par jets moléculaires. Avec le soutien de Jean-Yves Marzin, nous avons montré que la technique MOCVD avait toute sa place en physique fondamentale, notamment pour assurer le lien avec l'industrie. Jean-Michel Gérard a également joué un rôle clé en m'encourageant à développer les boîtes quantiques. Ensemble, nous avons démontré que la MOCVD donnait d'excellents résultats selon les matériaux considérés, notamment sur InP, et que les performances dépendaient en réalité beaucoup de la chimie des pré-curseurs en amont. Notons que cela n'a été possible qu'avec Guillaume Saint-Girons, Adrien Michon, Alexios Beveratos, Isabelle

Robert-Philipp, Philippe Boucaud et Gilles Patriarche. Plus récemment, Fabrice Raineri, Rémy Braive, Grégoire Beaudoin et Konstantinos Pantzas ont rejoint l'aventure scientifique quotidienne de la MOVPE.

QUELS MATÉRIAUX AVEZ-VOUS LE PLUS ÉTUDIÉS ?

J'ai travaillé sur les deux grandes familles : les hétérostructures sur GaAs et sur InP. Sur GaAs, nous avons tenté de réaliser des boîtes quantiques classiques d'InGaAs. Même lorsque les résultats n'étaient pas directement exploitables, ces travaux ont été extrêmement formateurs et ont ouvert de nombreuses perspectives par la suite comme les boîtes quantiques sélectives d'InAs sur substrat InP pour les longueurs d'onde télécoms. Sur InP, j'ai développé des hétérostructures originales, notamment des miroirs de Bragg alors considérés comme impossibles. En réalité, il suffisait de s'y atteler sérieusement pour obtenir des contrastes d'indice suffisants et des réflectivités élevées.

QUELLES SONT LES TECHNOLOGIES QUI ONT ATTIRÉ VOTRE INTÉRÊT ?

J'ai établi une collaboration très efficace avec l'équipe de Carlo Sirtori et Angela Vasanelli sur les lasers à cascade quantique. Il me paraissait impensable que la France ne maîtrise pas les sources moyen infrarouge. Nous avons la technologie pour le faire, et j'ai contribué à maintenir ce savoir-faire sur le long terme. Un second axe majeur de mes recherches a porté sur le développement de micro-piliers pour les sources de photons uniques, en collaboration avec Pascale Senellart. J'ai appliqué aux matériaux III-V des techniques de gravure que j'avais apprises à Grenoble sur le silicium-germanium. Cela s'est fait par essais successifs, une compréhension fine des mécanismes, et une adaptation progressive. Une thèse en particulier, autour de 2007, a marqué un tournant dans cette approche. Nous avons aussi développé des stratégies de passivation très spécifiques, en particulier pour éviter l'oxydation de certains matériaux. Ces savoir-faire ont été transférés à Quandela dans le cadre d'accords précis et sont quotidiennement utilisés par Jacqueline Bloch et Sylvain Ravets pour leurs études à l'état de l'art sur les polaritons en cavité dans les matériaux III-V.

COMMENT AVEZ-VOUS PRÉSERVÉ L'ÉQUILIBRE DE VOS ACTIVITÉS ENTRE RECHERCHE ET IMPLICATION NATIONALE AU CNRS ?

Tout au long de ma carrière, j'ai tenu à consacrer une part importante de mon temps à la recherche en salle blanche. Il existe une idée assez répandue selon laquelle « la techno », ce serait simplement appuyer sur un bouton mais en recherche, c'est tout l'inverse. Innover, c'est développer des procédés, itérer, caractériser, comprendre pourquoi ça marche... et recommencer. Or, aujourd'hui, il y a de moins en moins de personnes qui prennent le temps, et surtout le risque, de développer réellement les procédés. C'est pourtant là que se joue une partie essentielle de l'innovation : sélectionner la bonne machine, définir les paramètres, comprendre les mécanismes physiques et chimiques, choisir les méthodes de contrôle qualité, optimiser la passivation, les étapes de nettoyage, les recettes... Ce sont des développements longs, exigeants, et rarement visibles de l'extérieur, mais ce sont eux qui rendent possible l'innovation, et ensuite le transfert.

COMMENT AVEZ-VOUS ÉTABLI VOTRE PARTENARIAT ACADÉMIQUE-INDUSTRIEL ?

Lors de l'aménagement du C2N, j'ai dû déplacer une partie de mes moyens expérimentaux et plutôt que de subir une situation bloquante, j'ai fait le choix, avec l'aide de Daniel Dolfi de Thales RT de construire un cadre solide sur leur site, tout en gardant un ancrage CNRS fort. L'idée était claire : préserver la capacité de recherche, sécuriser les conditions de travail, et surtout transmettre un savoir-faire. Nous avons ainsi mis en place une convention d'hébergement avec Thales. J'ai souhaité venir avec les personnes que j'avais recrutées et formées, précisément parce que je voulais transférer des compétences et structurer une continuité. Cette collaboration existe toujours aujourd'hui, et elle a été très productive. Cette collaboration a permis de structurer une filière technologique sur un matériau III-V particulièrement intéressant, le GaP. Je cherchais depuis longtemps l'occasion de travailler sur ce sujet, et la situation a accéléré les choses.

Une fois que j'ai compris que le matériau et sa technologie étaient accessibles, j'ai dit à l'équipe : "on y va". Et, très vite, une filière solide s'est mise en place, au point de contribuer à une dynamique désormais visible à l'échelle européenne. Ce qui a été important, c'est la confiance : on m'a laissé construire, développer, stabiliser. Ensuite, la jeune génération a pris le relais, et c'est exactement ce que je voulais.

VOUS INSISTEZ SOUVENT SUR L'IMPORTANCE DU TRAVAIL COLLECTIF.

Je n'ai jamais travaillé seule. Il y a toujours eu, autour de moi, des technologues, des spécialistes matériaux, des opticiens, des partenaires applicatifs. Ce qui m'intéresse, c'est précisément l'interface entre ces mondes. Et si vous n'avez plus cette capacité à transformer une compétence individuelle en dynamique d'équipe, vous perdez l'essentiel. Les restructurations institutionnelles, les départs à la retraite, les réorganisations ont parfois affaibli des dynamiques collectives. J'ai toujours été convaincue qu'on n'a pas le droit de casser une chaîne de valeur, surtout lorsqu'elle repose sur des compétences rares, construites patiemment. C'est aussi cela qui m'a poussée à m'investir davantage dans la structuration nationale : protéger les communautés techniques, assurer la continuité,

maintenir le lien entre recherche, technologie et industrie.

COMMENT AVEZ-VOUS ANIMÉ ET COORDONNÉ LE RÉSEAU RENATECH ?

Au comité national, j'ai découvert des tensions, des différences culturelles, mais aussi une nécessité : si l'on veut défendre la technologie et les plateformes, il faut se mettre en réseau. Ce sont des visions portées initialement par les directions d'unité et les pionniers de ces réseaux ; moi, j'ai surtout contribué à les rendre opérationnelles, à les faire vivre concrètement. Nous avons mis en place des outils d'échange entre permanents, par exemple une liste et un espace de discussion technique. Cela peut sembler simple, mais l'effet est considérable : dès qu'un site rencontre un problème, quelqu'un ailleurs en France peut répondre, partager une solution, une recette, une méthode. On voit alors apparaître une confiance collective, une capacité à s'entraider qui est rare et précieuse.

DANS QUELLES CONDITIONS AVEZ-VOUS ÉTÉ APPELÉE À COORDONNER LE PEPR ELECTRONIQUE ?

Le CNRS devait porter le programme, une lettre de mission est arrivée, et en un temps très court il a fallu identifier une personne

capable de fédérer la communauté. J'ai été sollicitée et, après réflexion, j'ai accepté, à condition de ne pas le faire seule et de m'entourer. Les débuts ont été très intenses : en quelques mois, il fallait rassembler la communauté, structurer des filières technologiques, construire une gouvernance, définir des priorités scientifiques. Cela a été très stimulant mais aussi éprouvant. Au final, je suis très satisfaite de ce que nous avons réussi à imposer avec mon co-porteur Thomas Ernst du CEA-Leti : une structuration par la science et par les projets, et non par des discours. Bien sûr, tout n'est pas parfait : on manque toujours de moyens et il faut faire des choix. Mais l'architecture est là, la dynamique existe, et l'évaluation a montré la pertinence de certaines orientations prises dès le départ, notamment sur l'intégration des photons dans une vision large de l'électronique.

QUELLE SUITE DONNER AU PEPR ÉLECTRONIQUE ?

Pour moi, deux priorités s'imposent. La première, ce sont les matériaux semi-conducteurs : il faut absolument préserver ces compétences. Ce sujet dépasse les étiquettes « électronique » ou « photonique » : ce sont les mêmes matériaux, les mêmes briques technologiques, et ils irriguent toutes les filières. Or, nous sommes en train de perdre des savoir-faire : la ●●●



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





SPCM 1064

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

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

APPLICATIONS

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

Suivez nous ! 

www.htds.fr
info@htds.fr

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

pyramide des âges est défavorable, certaines compétences s'éteignent, et il y a trop peu de renouvellement. La seconde priorité, c'est la photonique intégrée, et en particulier la photonique intégrée hétérogène, avec tout ce que cela implique en termes de packaging.

QUELS SONT LES ENJEUX DE LA PHOTONIQUE INTÉGRÉE HÉTÉROGÈNE ?

L'enjeu, c'est de combiner sur une même plateforme des matériaux actifs, des guides, des détecteurs, des sources, et d'en faire un système robuste. Et cela, sans packaging photonique fiable, il n'y a pas de passage à l'échelle. Or, en France, le packaging photonique reste insuffisamment structuré. Les start-up cherchent des solutions, certains acteurs se spécialisent sur des briques (par exemple le couplage fibre), mais les chaînes complètes sont encore trop fragmentées. Les acteurs existent, mais ils se parlent trop peu et les interfaces manquent. Or, je pense que c'est une clé, d'autant plus que les besoins explosent : communications RF, 5G/6G, capteurs, métasurfaces, antennes, systèmes... Beaucoup de technologies convergent et ont besoin, à un moment, de briques photoniques intégrées. On retrouve des problématiques communes : intégration, interconnexion, packaging, fiabilité, industrialisation.

QUEL RÔLE PEUT JOUER L'INDUSTRIE DANS CETTE TRAJECTOIRE ?

Il y a déjà une industrie très forte en France sur certains composants, par exemple les lasers. Mais lorsqu'on parle de photonique intégrée, le sujet des fonderies est plus compliqué. Je ne suis pas certaine qu'on puisse, à court terme, sécuriser entièrement une chaîne de fonderie en France ou même en Europe. Et, d'une certaine manière, ce n'est pas forcément l'enjeu principal. L'enjeu critique, c'est de maintenir les capacités de démonstration au meilleur niveau : des outils, des plateformes, des procédés, des compétences, pour que les chercheurs puissent prouver un concept, fabriquer un prototype, tester une idée jusqu'au dispositif. Si vous perdez ces outils, vous perdez la capacité d'innover : il ne reste plus que de la théorie.

« Pour moi, deux priorités s'imposent. La première, ce sont les matériaux semi-conducteurs : il faut absolument préserver ces compétences. La seconde priorité, c'est la photonique intégrée, et en particulier la photonique intégrée hétérogène, avec tout ce que cela implique en termes de packaging. »

VOTRE PRIORITÉ VA DONC DANS LE MAINTIEN DES COMPÉTENCES ET DES OUTILS ?

Exactement. La souveraineté, dans ces domaines, ne se résume pas à posséder une usine. Elle repose aussi, et parfois surtout, sur la capacité à concevoir, à fabriquer au niveau de l'état de l'art, à former, et à transférer. Sans outils, la recherche devient "hors sol". Et sans recherche crédible, l'écosystème industriel finit par décrocher.

CONCRÈTEMENT, COMMENT FAIRE POUR PRÉSERVER CES SAVOIR-FAIRE EN MATÉRIAUX SEMI-CONDUCTEURS ?

Il faut agir de manière très pragmatique. Nous avons investi dans des machines, parfois coûteuses, mais il manque souvent les personnes devant ces machines. Une piste, c'est de remettre en place des postes pérennisés sur la durée, par exemple sur 6 à 8 ans, avec des ingénieurs et techniciens capables d'assurer l'exploitation, le développement des procédés et la transmission. Bien sûr, la formation est indispensable, *via* des masters, des doctorats, des écoles d'été. Mais il faut aussi, et surtout, des compétences en poste, pour faire vivre les outils, développer les procédés et éviter que les plateformes ne se vident de leur substance.

ET POUR LA PHOTONIQUE INTÉGRÉE, QUELLE STRATÉGIE PROPOSEZ-VOUS ?

Je crois beaucoup à une logique de filière nationale structurée, avec des consortiums sur des thématiques bien définies, et des moyens suffisants pour travailler ensemble de façon durable. Il faut éviter la dispersion permanente où chacun cherche des financements à droite et à gauche et permettre aux équipes de se concentrer sur une trajectoire commune, cohérente, partagée. Dans cette logique, la valorisation viendra naturellement : si le projet scientifique est pertinent, des

doctorants et jeunes chercheurs créeront des start-up, des transferts auront lieu. Mais il ne faut pas construire les programmes de recherche « pour fabriquer des start-up ». Il faut d'abord construire des programmes solides scientifiquement ; l'innovation suivra.

QUEL REGARD PORTEZ-VOUS SUR LES POLITIQUES PUBLIQUES ET LES AGENCES DE PROGRAMME ?

Je vois un intérêt réel à ce que des acteurs scientifiques et technologiques soient associés à l'identification des besoins, à la cartographie des compétences et aux choix structurants. Les communautés savent souvent très bien où sont les « trous dans la raquette ». L'enjeu est d'être efficace : éviter les procédures lourdes et les rapports déconnectés, et mettre l'effort là où il y a un vrai besoin. Sur les matériaux semi-conducteurs par exemple, le diagnostic est assez clair : il faut objectiver les compétences restantes, les plateformes critiques et les risques de rupture, puis agir de manière ciblée.

QUELLES SONT LES ACTIONS PRIORITAIRES À MENER POUR LE FUTUR ?

Maintenir et renforcer une communauté « électronique au sens large », en assurant pleinement que l'avenir combine électrons et photons, avec une articulation claire, sauver et renouveler les compétences en matériaux semi-conducteurs, structurer une filière de photonique intégrée, en particulier hétérogène, investir dans le packaging et les outils qui rendent possible la démonstration expérimentale, avoir un fonctionnement inter-organismes (CNRS, CEA, ONERA, etc.), car aucun acteur ne pourra porter cela seul. Nous touchons ici aux enjeux de souveraineté. Il nous faut conserver des savoir-faire critiques, les outils qui permettent d'innover, et une capacité de démonstration rapide. ●

LA LUMIÈRE INVISIBLE : HERSCHEL DÉCOUVRE L'INFRAROUGE

Vincent BOUDON*, Cyril RICHARD, Cloë VAUTRIN

Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne, UMR 6360 CNRS/UBE, Dijon, France

*Vincent.Boudon@ube.fr



<https://doi.org/10.1051/photon/202613819>

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.

En 1800, l'astronome anglais William Herschel, en réalisant une expérience simple sur le lien entre lumière et chaleur, fait une découverte inattendue : la lumière ne se limite pas à ce que voient nos yeux. Il existe des lumières invisibles. Herschel vient de découvrir ce que nous appelons les infrarouges. C'est alors le début d'une véritable révolution. L'année suivante, son collègue Johann Ritter découvre les ultraviolets. D'autres rayonnements suivront et ceci va totalement changer notre perception de l'Univers et permettre d'incroyables développements technologiques.

Depuis l'Antiquité, la lumière intrigue et questionne. Les philosophes grecs s'interrogent déjà sur sa nature et son origine : émane-t-elle des objets ou de notre regard ? Au fil des siècles, ces réflexions laissent progressivement place à une approche expérimentale. Au XVIII^e siècle, les travaux en optique se multiplient et transforment profondément notre compréhension du phénomène lumineux. La lumière n'est pas seulement un objet de spéculation, mais devient un sujet d'étude mesurable, que l'on peut manipuler et analyser.

C'est dans ce contexte d'effervescence scientifique que s'inscrivent les recherches qui mèneront, un siècle plus tard, aux découvertes de William Herschel sur la lumière invisible. Mais bien avant cela, une avancée majeure avait déjà marqué un tournant décisif. Grâce à une expérience devenue emblématique, Isaac Newton montre que la lumière blanche du Soleil n'est pas homogène, mais qu'elle se décompose à l'aide d'un prisme en une succession de couleurs formant le spectre visible. C'est ce spectre qui constitua la base sur laquelle Herschel s'appuiera pour découvrir les rayons invisibles à l'œil humain.

Lumière et chaleur

Ainsi, à la fin du XVIII^e siècle, toujours en Angleterre, William Frederick Herschel, musicien, compositeur et astronome autodidacte d'origine allemande est déjà très renommé. À l'aide d'un télescope de sa fabrication il a en effet découvert par hasard, en 1781, un astre qui s'avère très vite être une planète encore inconnue : Uranus. Il est ainsi le premier astronome de l'histoire à découvrir une planète, les autres (de Mercure à Saturne) étant visibles à l'œil nu et connues depuis la plus haute antiquité. En tant que facteur d'instruments astronomiques, et à l'image de Newton, Herschel ●●●

s'intéresse également beaucoup à l'optique. Il réalise ainsi de très nombreuses expériences utilisant des prismes et différents dispositifs de son invention dont il publie des schémas et descriptions détaillées. Il faut dire qu'il est un auteur scientifique prolifique, avec à son actif 70 articles publiés entre 1780 et 1821, majoritairement dans les célèbres *Philosophical Transactions of the Royal Society* (une des toutes premières revues scientifiques de l'histoire).

Nous avons tous constaté qu'en nous exposant à la lumière du Soleil, nous ressentons de la chaleur. En 1800, Herschel souhaite comprendre ce phénomène de manière précise en mesurant comment les différentes couleurs du spectre solaire transportent de la chaleur. Il a alors une idée ingénieuse : reprendre l'expérience de Newton de la décomposition de la lumière par un prisme et y ajouter une série de thermomètres dont l'extrémité, noircie de manière identique, est placée dans les différentes couleurs du spectre projeté sur une surface blanche (Figure 1). Il constate effectivement, par le relevé des différentes températures, que la chaleur transportée dépend de la couleur. Mais il a alors l'intuition que la chaleur en question s'étend sans doute au-delà des couleurs visibles. Il place donc des thermomètres après la partie rouge du spectre. Et cette intuition est bonne : la température de ces thermomètres augmente également, alors qu'aucun rayonnement perceptible à l'œil n'apparaît dans cette zone. Il en déduit alors l'existence de rayons invisibles dans le spectre solaire. Très intéressé par le phénomène, il publie quatre articles historiques sur le sujet, décrivant différentes variantes de son expérience et présentant un grand nombre de mesures qu'il tente d'interpréter.

Cette découverte étant somme toute inattendue et, même si ses expériences sont très rigoureuses, les moyens de mesures de l'époque étant plutôt rudimentaires, Herschel se fourvoie quelque peu dans l'interprétation. Mais on ne peut pas

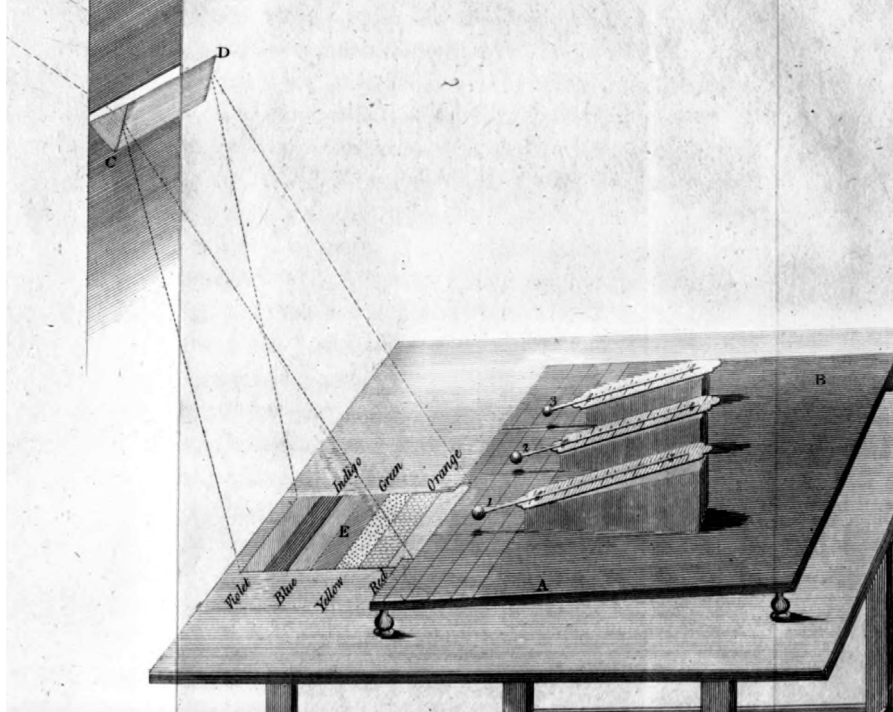
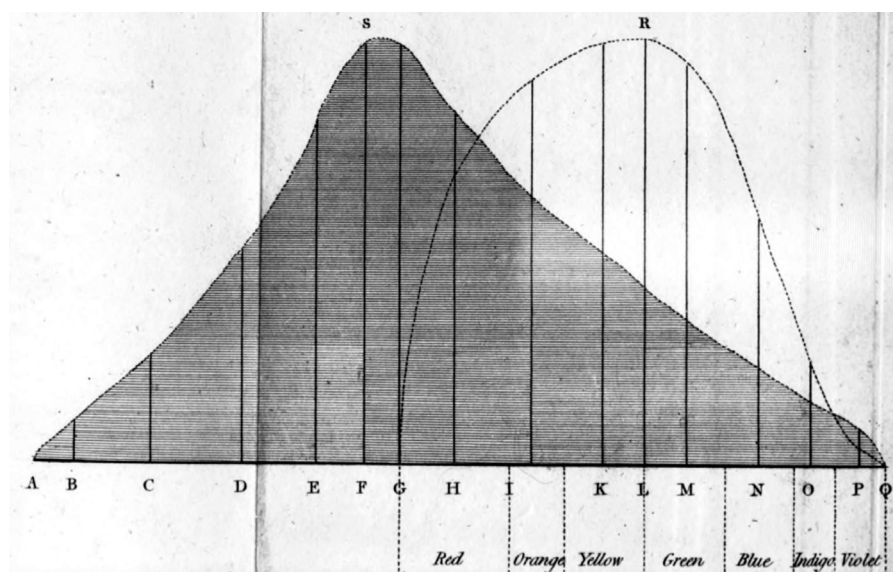


Figure 1. Expérience d'Herschel pour la mesure des « rayons calorifiques ». La lumière solaire décomposée par le prisme arrive sur des thermomètres qui peuvent être déplacés sur les différentes couleurs. Dans cet exemple, ils sont placés au-delà du rouge. Figure tirée de la référence [2].

lui en vouloir. Il tente en effet de comparer les mesures de température, qui sont plutôt précises, avec celles de l'intensité lumineuse à travers le spectre. Or, on ne sait pas encore bien estimer cette seconde quantité à l'époque. Il trouve ainsi deux courbes distinctes (Figure 2). Il en déduit donc, à tort, que le Soleil émet deux sortes de rayonnements : la lumière et ce qu'il qualifie de rayons calorifiques. Par contre,

il est persuadé que ces deux types de rayons suivent les mêmes lois optiques de réflexion et de réfraction. Notons qu'en 2012, J. R. White reprend finement les différents résultats d'Herschel. Il constate que ses mesures de température étaient en effet remarquablement précises et que, en corrigeant ses erreurs sur la mesure des intensités, on retombe bien sur deux courbes identiques. Les rayons calorifiques

Figure 2. Courbes d'Herschel mesurées à l'aide du dispositif montré sur la Figure 1 : températures (courbe S) et intensité de la lumière (courbe R). Figure tirée de la référence [4].



(et ceci est rapidement compris dès le XIX^e siècle) sont bel et bien de la lumière. Leur longueur d'onde se situe au-delà de l'extrémité rouge du spectre visible (au-delà de 800 nm) et leurs fréquences (voir l'encart) sont en-deçà de celles du rouge. On nomme donc cette partie invisible du spectre les rayons infrarouges.

Une révolution scientifique

Il s'agit là d'une découverte absolument fondamentale qui ouvre immédiatement de nouveaux horizons scientifiques : la lumière ne se limite pas à ce que voient nos yeux. Cette véritable révolution, qui ne s'arrête pas aux infrarouges, va totalement changer la perspective des chercheurs, qu'ils étudient la matière ou l'Univers. La possibilité de détecter de nouveaux rayonnements va considérablement modifier et étendre notre perception du monde.

Dès 1801, le prussien Johann Wilhelm Ritter, qui a lu les articles d'Herschel, découvre de son côté un rayonnement au-delà du violet. Sa technique est différente (celle des thermomètres ne fonctionne pas de ce côté du spectre pour lequel le verre des thermomètres est opaque). Il utilise du chlorure d'argent qui noircit à la lumière, y compris, donc, après la lumière violette. Il en déduit l'existence de rayons qu'il

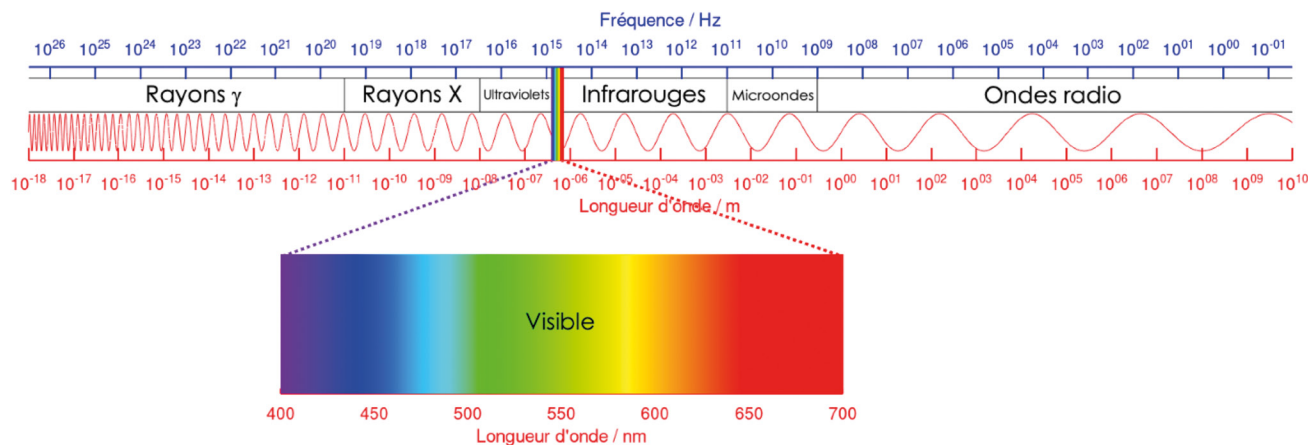
FRÉQUENCES ET LONGUEURS D'ONDE

Nous ne nous étendrons pas ici sur la nature de la lumière telle que décrite aujourd'hui par la physique quantique. Sur ce sujet, le lecteur pourra se référer à l'ouvrage donné par la Référence [5], par exemple. Nous rappelons simplement que, dans le cadre de la théorie électromagnétique, la lumière est une onde. Les différentes « couleurs » (visibles ou non) correspondent en réalité à la valeur de la longueur d'onde, notée λ , qui se mesure en mètres ou bien en ses multiples ou sous-multiples, comme les nanomètres (nm). La longueur d'onde est reliée à une autre quantité, la fréquence ν (mesurée en Hertz, Hz), via la relation $\lambda = c / \nu$, où c est la vitesse de la lumière dans le vide (299 792 458 m/s).

qualifie de « chimiques », qui sont par la suite qualifiés d'ultraviolets. Plus tard, le spectre sera encore étendu par la découverte des ondes radio par Heinrich Hertz, des rayons X par Wilhelm Conrad Röntgen et des rayons γ (gamma) par Paul Ulrich Villard. La théorie de James Clerk Maxwell, père de l'électromagnétisme, parachève l'unification de tous ces rayonnements qui sont régis par les mêmes équations et suivent donc les mêmes lois (comme le soupçonnait Herschel). L'ensemble des rayonnements possibles constituent le spectre électromagnétique qui s'étend sur une gamme considérable de longueurs d'ondes (et donc de fréquences), ainsi que le montre la Figure 3.

La lumière visible ne constituant qu'une toute petite partie de ce spectre, la possibilité de mesurer tous ces nouveaux rayonnements permet des observations jusqu'alors totalement inédites et d'une incroyable richesse d'informations. Rien qu'en astrophysique, observer les astres en rayons γ , X, ultraviolets, visibles, infrarouges, micro-ondes et radio en donne des vues très différentes mais complémentaires, permettant de sonder, par exemple, différentes couches atmosphériques, différents phénomènes physiques, de révéler différents composés, etc. Mais, pour cela, encore faut-il disposer des outils permettant de mesurer toutes ces « lumières invisibles ».

Figure 3. Le spectre électromagnétique. La lumière visible n'en constitue qu'une infime partie.
Figure Vincent Boudon.



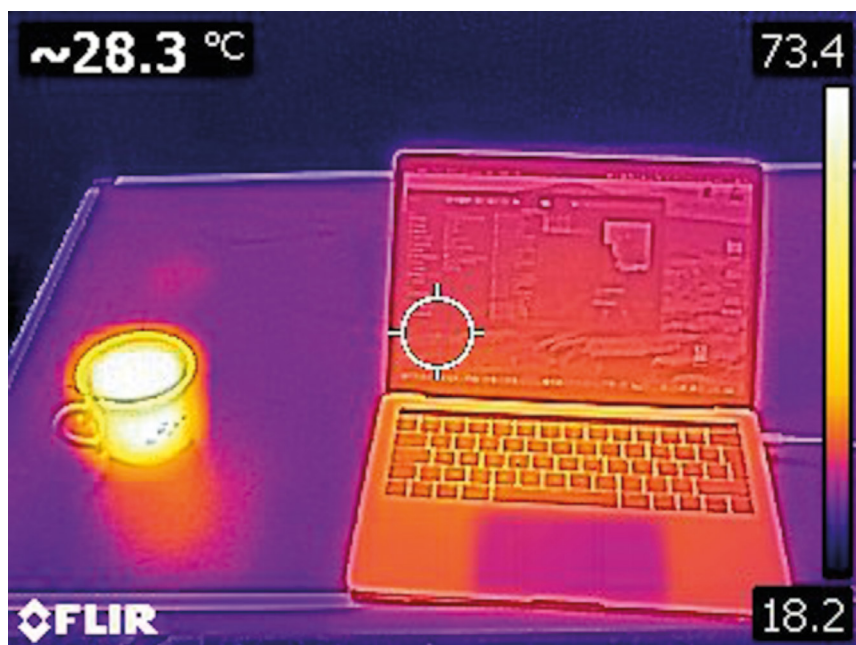


Figure 4. Image réalisée à l'aide d'une caméra thermique infrarouge opérant autour de la longueur d'onde de 14 μm . L'échelle de couleur correspond à la température, déduite de l'intensité de l'émission infrarouge. La tasse de café est très chaude et l'ordinateur un peu plus chaud que le reste de la pièce. Image Vincent Boudon.

lumière réfléchie, mais directement le rayonnement émis par les objets en fonction de leur température. La Figure 4 illustre parfaitement ce phénomène avec l'image infrarouge d'un ordinateur et d'une tasse de café chaud.

Au-delà de l'imagerie, l'infrarouge joue également un rôle fondamental en spectroscopie. Les molécules possèdent en effet des signatures caractéristiques dans ce domaine spectral, liées à leurs vibrations internes. L'analyse du rayonnement infrarouge permet ainsi d'identifier la composition chimique de nombreux milieux, depuis des échantillons en laboratoire jusqu'aux atmosphères planétaires.

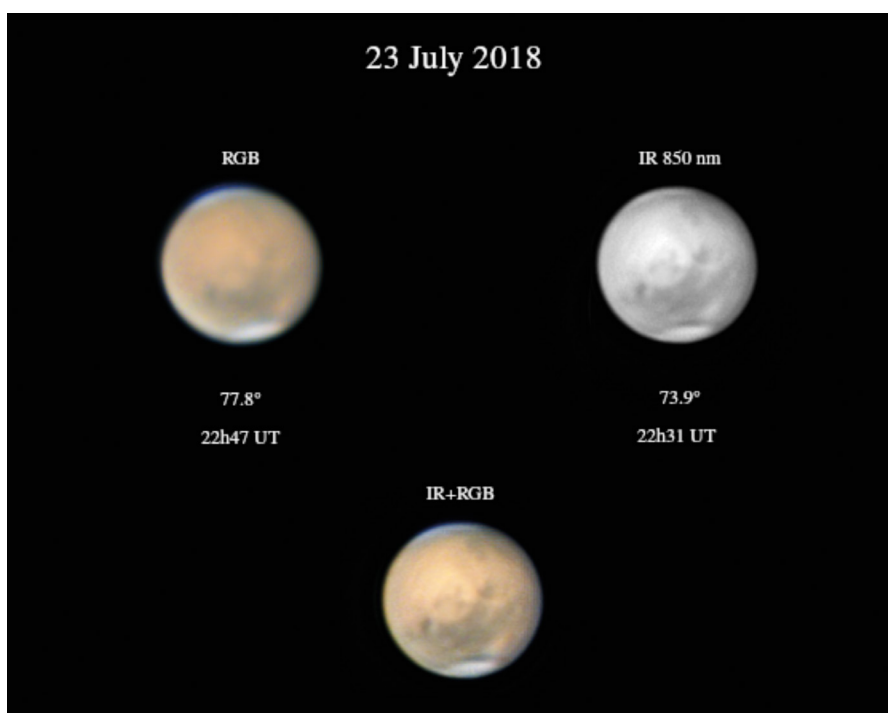
Ainsi, des simples thermomètres utilisés par Herschel aux détecteurs modernes, la découverte des infrarouges a profondément transformé notre capacité à mesurer et exploiter la lumière.

Une révolution technologique

La mise en évidence des rayonnements infrarouges ouvre rapidement la voie au développement de dispositifs capables de détecter cette lumière invisible à l'œil. C'est d'ailleurs en 1929 qu'est inventée l'imagerie infrarouge thermique, lorsque le physicien hongrois Kálmán Tihanyi construit une caméra de télévision électronique sensible à ce rayonnement, capable d'être utilisée à des fins militaires, notamment pour détecter des avions en vol de nuit.

Ces avancées, aidées par la démocratisation de l'imagerie numérique, ont conduit à l'essor de l'imagerie thermique, aujourd'hui largement utilisée dans des domaines variés. Les caméras infrarouges permettent par exemple de visualiser les pertes de chaleur dans les bâtiments, de détecter des anomalies en milieu industriel ou encore d'observer des scènes en absence de lumière visible. Dans ce cas, il ne s'agit plus de voir la

Figure 5. La planète Mars prise avec un télescope de 200mm de diamètre. Alors en proie à une tempête de poussière à l'échelle globale, elle a été imagée à travers plusieurs filtres : en RGB (rouge-vert-bleu) pour restituer l'aspect tel que l'œil humain pourrait le percevoir, puis avec l'ajout d'un filtre infrarouge afin de faire ressortir les détails de sa surface alors cachée par la poussière. Images Cyril Richard.



Une nouvelle vision de l'Univers

Au-delà des avancées instrumentales, l'infrarouge a également profondément renouvelé notre perception de l'Univers. Contrairement à la lumière visible, il peut traverser partiellement certains milieux opaques. La Figure 5 en donne une illustration frappante avec des images de Mars prises lors de la grande tempête de poussière de 2018. En lumière visible, les détails de la surface sont masqués par les poussières, tandis qu'en utilisant un filtre infrarouge, ne laissant passer que les longueurs d'onde supérieures à 850 nm, le relief de la planète rouge réapparaît nettement. Ces modestes images issues de travaux amateurs, illustrent à quel point l'utilisation de l'infrarouge s'est démocratisée.

Bien sûr, les astronomes professionnels en ont été les précurseurs, avec notamment le télescope spatial Herschel Space Observatory, dont le nom fait écho au découvreur, puis, plus récemment, le *James Webb Space Telescope*, qui en repousse encore plus les limites. Placés dans l'espace, au-delà de notre atmosphère, ces observatoires peuvent accéder à des

longueurs d'onde autrefois impossibles à observer depuis la Terre, en raison de la forte absorption de notre enveloppe protectrice. Ils permettent aujourd'hui d'aller encore plus loin, en accédant à la composition des atmosphères d'exoplanètes, ouvrant ainsi la voie à l'étude de nouveaux mondes au-delà de notre Système solaire. Deux siècles après sa découverte, l'infrarouge s'impose aujourd'hui comme une fenêtre essentielle pour observer, comprendre et explorer l'Univers.

Conclusion

La connaissance de l'étendue du spectre électromagnétique, bien au-delà de la seule lumière visible, est

finallement assez récente à l'échelle de l'histoire des sciences. Elle trouve son origine dans les travaux pionniers de William Herschel, dont la découverte de l'infrarouge en 1800 a ouvert la voie à une exploration progressive de ces lumières invisibles, poursuivie par de nombreux scientifiques au cours du XIX^e siècle.

Aujourd'hui, ces avancées ont profondément transformé notre compréhension du monde et de l'Univers. Des applications technologiques du quotidien aux grandes découvertes astrophysiques, l'infrarouge illustre parfaitement comment une expérience simple peut conduire à une révolution scientifique et durablement élargir notre perception du réel. ●

RÉFÉRENCES

- [1] W. Herschel, Philos. Trans. R. Soc. Lond. **90**, 255 (1800)
- [2] W. Herschel, Philos. Trans. R. Soc. Lond. **90**, 284 (1800)
- [3] W. Herschel, Philos. Trans. R. Soc. Lond. **90**, 296 (1800)
- [4] W. Herschel, Philos. Trans. R. Soc. Lond. **90**, 437 (1800)
- [5] V. Boudon, A. Cuisset, C. Richard, M. Rotger, *La lumière pour sonder le monde. La spectroscopie et ses applications* (Ellipses, Paris, 2024)

ALS-VIS Fiber Lasers & Amplifiers

Industrial grade performances for highly demanding applications





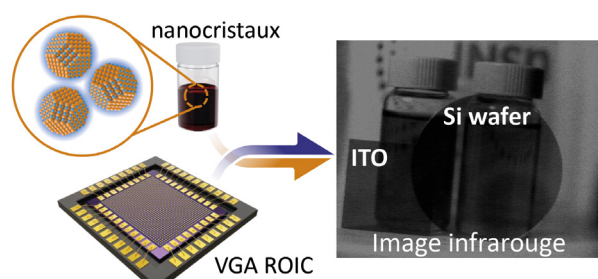

OPTRONIQUE INFRAROUGE COLLOIDALE

Emmanuel LHUILLIER^{1,*} Nicolas PÉRÉ LAPERNE²

¹ Sorbonne Université, CNRS, Institut des NanoSciences de Paris, INSP, F-75005 Paris, France.

² LYNRED, Actipole - CS 10021, 364 route de Valence, 38113 Veurey-Voroize, France

*el@insp.upmc.fr



<https://doi.org/10.1051/photon/202613824>

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.

DÉFI ET OPPORTUNITÉ DE L'OPTRONIQUE INFRAROUGE

La gamme infrarouge (IR), et en particulier sa contribution thermique qui permet de voir sans être vu, a depuis longtemps généré un intérêt pour les applications optroniques. Historiquement, l'infrarouge restait néanmoins un marché autour de deux niches que sont la défense (moyen volume) et l'astronomie (très petit volume). Ces applications étaient surtout poussées par la performance et le coût était une considération d'ordre secondaire. De nouveaux marchés (partie application de la Figure 1) ont commencé à se développer que sont la reconnaissance faciale sur

L'optronique infrarouge connaît une révolution avec l'émergence de nouveaux marchés exigeant des solutions à la fois performantes, économiques et scalables. Les nanocristaux colloïdaux, synthétisés par voie chimique, offrent une alternative disruptive aux semiconducteurs épitaxiés (InGaAs, HgCdTe) grâce à leur accordabilité spectrale, leur compatibilité avec des procédés en solution (spin-coating, impression jet d'encre), et leur intégration directe sur circuits CMOS. Cet article explore leur potentiel pour l'imagerie infrarouge, depuis la synthèse jusqu'à l'intégration dans des imageurs, tout en discutant les défis à venir pour fiabiliser la technologie.

smartphone dans le proche IR, la vision industrielle (tri des déchets, tri dans l'agro industrie...) ou encore les drones (à usage unique) pour lesquels le rapport performance prix devient également un critère poussant vers le développement de technologies disruptives.

La détection IR est historiquement dominée par des couches minces semiconductrices épitaxiées, telles que l'InGaAs, l'InSb, le HgCdTe, ainsi que des hétérostructures avancées de type III-V comme les super-réseaux de type II, Figure 1. Ces matériaux fonctionnent en tant que détecteurs de photons par effet photoélectrique. Ils couvrent

l'ensemble du spectre IR, s'étendant sur plus de deux ordres de grandeur en énergie, depuis le visible ($\approx 1,5$ eV) jusqu'au régime térahertz (quelques dizaines de meV). Malgré leur maturité technologique, ces plateformes semiconductrices offrent des perspectives limitées pour une discontinuité de leur coût. Depuis les années 2000, une alternative bas coût et grand volume basée sur une mesure de variation de conductivité électrique suite à l'échauffement thermique associé à l'absorption est apparue, ce sont les micro-bolomètres. Ils sont focalisés dans la bande 8 à 12 μm de longueur d'onde à l'heure actuelle.

L'identification d'alternatives viables aux films de semiconducteurs épitaxiés reste un défi dans les bandes spectrales comprises entre 1 et 5 μm de longueur d'onde. Le passage de la preuve de concept initiale de photoréponse infrarouge à un capteur entièrement intégré est souvent long et complexe. Les semiconducteurs organiques deviennent inefficaces au-delà d'environ $\approx 1 \mu\text{m}$ en raison d'un couplage vibronique intense. Les matériaux bidimensionnels peuvent présenter des réponses infrarouges élevées grâce à des mobilités élevées et à un gain photoconducteur, mais ils se heurtent à des défis majeurs en matière de montée en échelle : le passage du pixel unique à la matrice. Les pérovskites halogénées sont actuellement limitées à des semiconducteurs à large bande interdite, et les tentatives

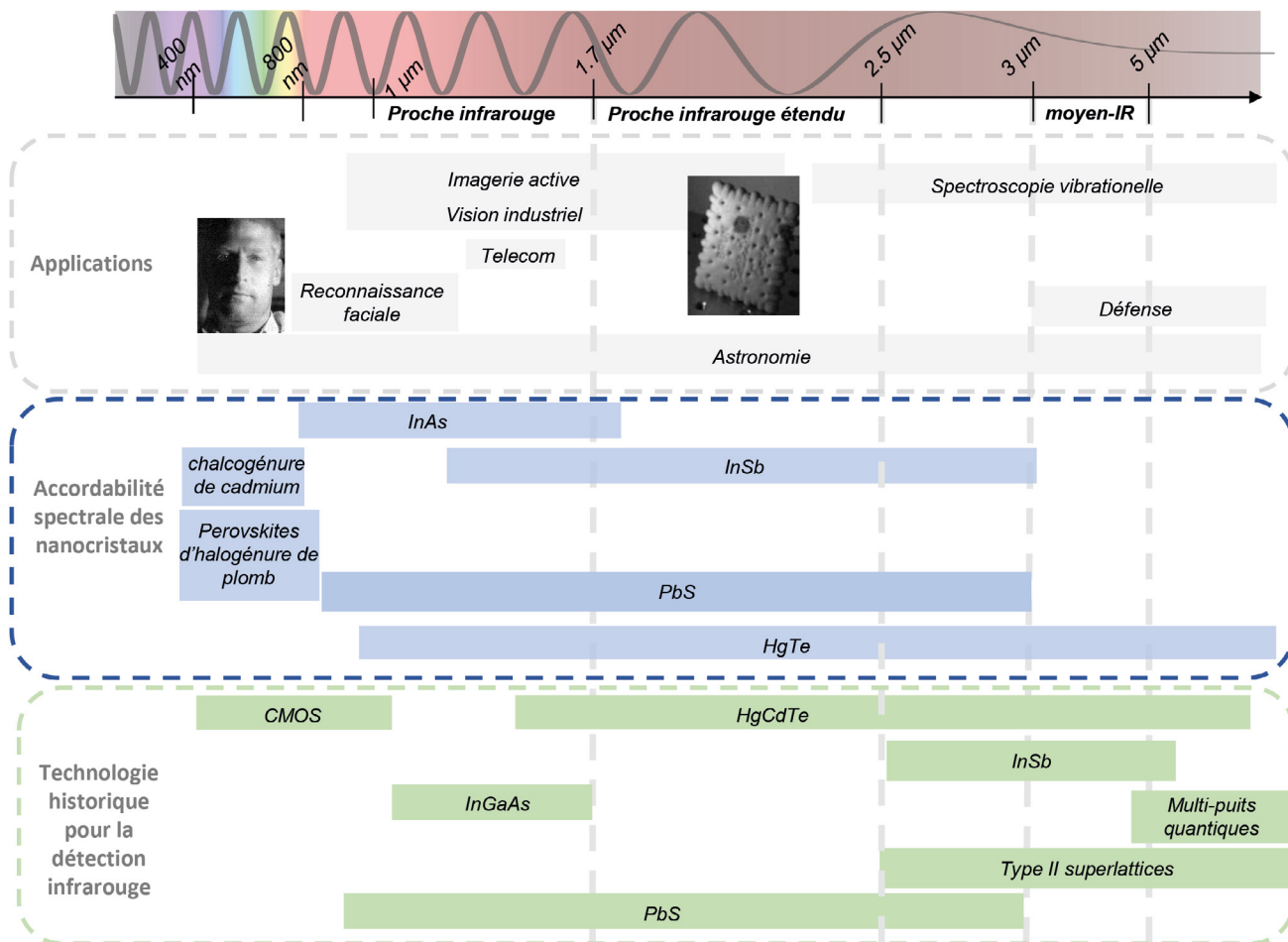
pour étendre leur réponse dans le proche infrarouge s'accompagnent d'une perte dramatique de stabilité. Dans ce contexte, les nanocristaux colloïdaux (NCs) émergent comme une alternative particulièrement prometteuse.

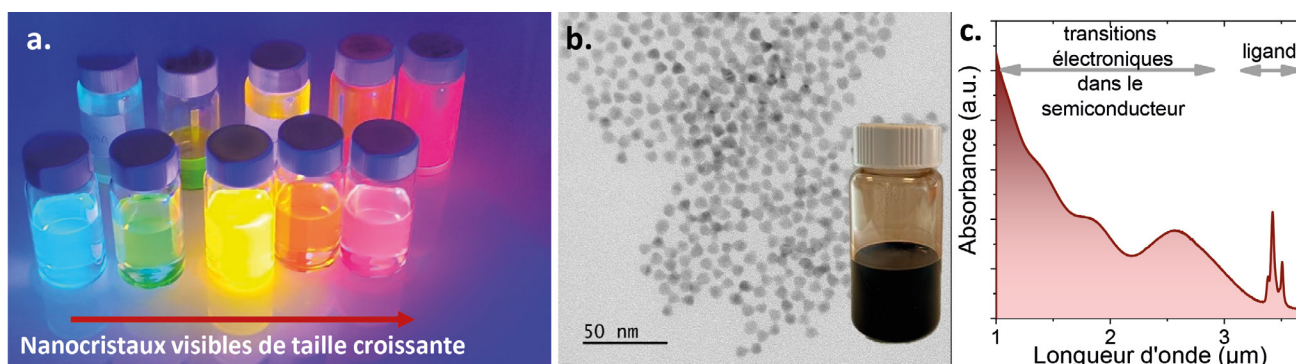
La motivation initiale des industriels pour les nanocristaux (NC) colloïdaux était leur utilisation comme sources de photons verts et rouges pour les écrans. Cette industrialisation a permis de démontrer la stabilité opérationnelle des NCs à long terme (plusieurs dizaines de milliers d'heures) dans des produits grand public, même si, dans ce contexte, les NCs ne sont pas actifs électriquement. Au-delà

de l'émission de lumière, la large accordabilité spectrale des NCs permet une extension vers l'infrarouge, tandis que leur synthèse à grande échelle et leur compatibilité avec des procédés en solution comme le spin-coating ou l'impression par jet d'encre simplifient les stratégies d'intégration.

Dans cet article, nous abordons l'intégration des NCs pour l'imagerie infrarouge. Nous discutons des spécificités de ces matériaux colloïdaux et de leur processabilité, pour nous focaliser ensuite sur leur intégration dans des imageurs. Enfin, nous discutons des défis de leur intégration pour une optoélectronique infrarouge grand public.

Figure 1. Spectre électromagnétique du proche et moyen infrarouge et recouvrement avec des applications infrarouges, les technologies historiques de la détection infrarouge et les gammes spectrales des nanocristaux.





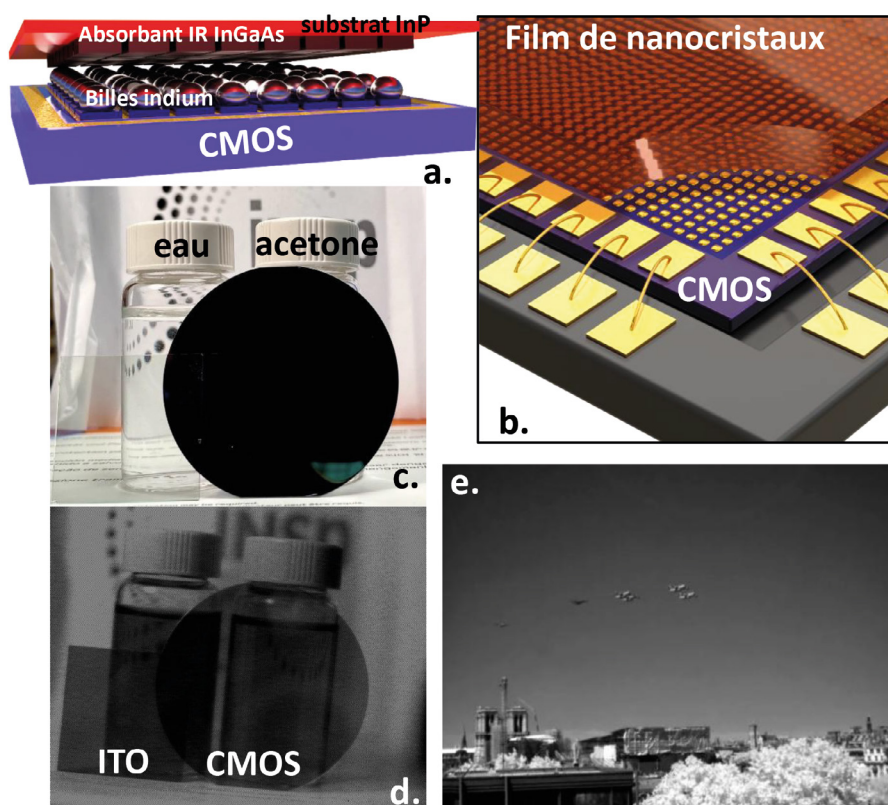
DE LA SYNTHÈSE À L'INTÉGRATION DES NANOCRISTAUX DANS UN IMAGEUR

Les nanocristaux sont des nanoparticules de semiconducteurs synthétisées par voie chimique. Leur taille nanométrique fait qu'ils sont affectés par le confinement quantique, ce qui permet d'ajuster leur couleur, qui diffère alors de celle du matériau massif. Cette propriété est illustrée sur la Figure 2a, où une série de solutions de nanocristaux de CdSe voit son spectre de luminescence se décaler vers le bleu à mesure que la taille des particules est réduite.

Ce sont généralement des semiconducteurs binaires (II-VI, III-V, IV-VI), et la voie de synthèse repose sur la réaction d'un sel métallique (généralement le cation) dans un milieu liquide en présence de surfactant, également appelé ligand. À une température modérée (60–300 °C selon le matériau et la taille visée), un précurseur contenant généralement l'anion est introduit dans le milieu réactionnel, engendrant la formation de germes qui vont ensuite croître dans le temps. Lorsque le spectre souhaité est atteint — c'est-à-dire lorsque la taille visée est obtenue par confinement quantique —, la croissance des particules est interrompue. Cette étape a généralement lieu avant que la réaction chimique ne soit complète. L'étape de purification est absolument critique pour le contexte de l'optoélectronique : sans elle, il ne sera pas possible de transformer les NCs en un film photoconducteur.

Figure 2. Nanocristaux colloïdaux visibles et infrarouges. a. Image de solutions de nanocristaux sous éclairage UV et émettant dans le visible. Les nanocristaux bleus ont un cœur de 2 nm, alors que les rouges ont un cœur proche de 6 nm. b. Image de microscopie électronique de nanocristaux de HgTe. L'insert est une photographie d'un pilulier contenant ces mêmes nanocristaux. c. Spectre infrarouge d'absorption de nanocristaux de HgTe.

Figure 3. Imagerie infrarouge à base de nanocristaux. a. Schéma d'un imageur à base de film mince InGaAs, cru sur un substrat d'InP et couplé à travers des billes d'indium à un circuit de lecture en technologie CMOS. b. Schéma d'un circuit de lecture sur lequel le film de nanocristaux est directement déposé. c. Image visible de deux piluliers contenant des solutions d'eau et d'acetone transparents dans le visible et devant lesquels ont été placés un substrat de silicium et un substrat de verre recouvert d'ITO. d. La même scène acquise dans l'infrarouge avec un capteur dont la couche active est faite de nanocristaux de HgTe. e. Image infrarouge de la parade aérienne du 14 juillet survolant Paris.



À ce jour, la majorité des efforts en matière de photodétection infrarouge (IR) à base de nanocristaux (NC) s'est concentrée sur deux matériaux : le PbS et le HgTe. Les NCs de PbS bénéficient d'un développement approfondi dans le contexte des cellules solaires, conduisant à des protocoles de synthèse et des architectures de dispositifs matures. En revanche, les NCs de HgTe restent essentiellement la seule plateforme colloïdale permettant d'accéder au moyen infrarouge.

En fin de synthèse, une solution de nanocristaux infrarouges apparaît sous la forme d'une solution noire (Figure 2b), dont le spectre peut être accordé, *via* le confinement quantique, depuis la valeur du matériau massif ($E_{PbS}^{massif} = 0,41 \text{ eV}$; $E_{HgTe}^{massif} = 0 \text{ eV}$) et augmenté de plusieurs centaines de meV. Les NCs sont alors recouverts de ligands, qui assurent plusieurs rôles. Ces ligands, composés de chaînes carbonées, interagissent avec le solvant, empêchant ainsi l'agglomération des particules tout en assurant leur stabilité colloïdale. Par ailleurs, en s'hybridant avec les liaisons pendantes de surface, les ligands limitent la formation d'états de piège dans la bande interdite.

Cependant, du point de vue du transport de charge, les ligands se comportent comme des barrières tunnel, empêchant l'émergence d'un caractère photoconducteur dans les films de nanoparticules. Ils doivent donc être remplacés par des molécules plus courtes, dont le rôle dual est de conserver la passivation de surface tout en réduisant la taille de la barrière tunnel inter-particulaire. Cette étape a fait l'objet de développements importants entre 2000 et 2010. Il est désormais possible de modifier la chimie de surface des NCs en solution, ce qui conduit à une encre se comportant comme une résine photoconductrice active dans l'infrarouge après dépôt.

Cette encre peut donc être directement enduite sur un circuit de lecture (Figure 3), ce qui constitue l'un des points forts des nanocristaux par rapport aux films obtenus par épitaxie. En effet, les films minces de semiconducteur sont crus sur un substrat qui, dans la mesure du possible, est en accord de paramètre de maille avec le matériau optiquement actif. Le substrat génère de multiples contraintes : (i) il est source de coût, (ii) il est la principale source de métaux lourds dans le cas des composés II-VI, (iii) il peut lui-même absorber la lumière.

Le couplage du film absorbant au circuit de lecture, basé sur une technologie silicium, se fait par une étape de collage, le plus souvent à l'aide de microbilles d'indium (Figure 3a). Cette étape nécessite un alignement extrêmement précis et devient plus ardue à mesure que le format de la matrice augmente et/ou que la taille des pixels diminue.

Les nanocristaux (NCs) suppriment la contrainte épitaxiale et l'hybridation, ce qui facilite largement leur intégration même pour les petits pixels permettant une grande résolution. Ils peuvent donc être déposés directement sur le circuit de lecture (Figure 3b). Si le circuit de lecture permet l'application d'un champ électrique dans le plan, le dépôt de la seule couche photoabsorbante suffit à la réalisation ●●●

Pushing Spectroscopic Boundaries

Mid-IR Comb -
Unique solutions for unique fingerprints

- Technologie de pointe en matière de peignes de fréquences optiques dans la gamme de l'infrarouge moyen (de 3 à 14 μm)
- Peigne de fréquences moyen infrarouge généré par différence de fréquence (DFG) clé en main et personnalisable
- Outil idéal et polyvalent pour la détection d'empreinte moléculaire, la spectroscopie de précision, le verrouillage en fréquence de lasers à cascade quantique, la spectroscopie nano-FTIR



Mid-IR Comb



Contactez-nous

www.menlosystems.com

Precision in photonics.
Together we shape a sustainable future.

d'un imageur photoconducteur. Une matrice de photodiodes peut également être fabriquée ; dans ce cas, la couche optiquement active est prise en sandwich entre des couches sélectives en transport de charge. Il convient également d'ajouter une électrode transparente sur le dessus de l'empilement.

L'absence de substrat fait que les nanocristaux absorbent non seulement l'infrarouge, mais aussi le visible, ce qui permet une imagerie très large bande. Des exemples d'images acquises à partir d'un imageur dont la couche active dans l'infrarouge est composée de nanocristaux sont présentés sur les Figure 3d-e. La Figure 3d, et son équivalent visible (Figure 3c), montre comment le contraste de certaines scènes peut être inversé entre le visible et l'infrarouge. Le substrat de silicium apparaît transparent dans le proche infrarouge, permettant ainsi l'inspection de wafers. D'autre part, les bandes d'absorption de l'eau dans l'infrarouge permettent de la différencier facilement d'autres solvants, également transparents dans le visible. Côté format, des matrices mégapixels ont déjà pu être démontrées.

PROCHAINS CHALLENGES

Ces matrices d'imageurs ont atteint un statut commercial (Emberion, SwirVision), et de nombreux autres acteurs (New Imaging Technologies, Imec, Qurv, Quantum Solution, XinIR Technology) poussent, ou ont poussé, le potentiel de cette technologie. Une limitation majeure à son usage reste la présence de métaux lourds (Pb/Hg). Par mimétisme avec les travaux réalisés pour les écrans, la tendance est donc de se tourner vers les semiconducteurs III-V (InAs et InSb pour l'infrarouge). Leur maturité reste cependant moins avancée, car la synthèse colloïdale est plus complexe et ces matériaux présentent une plus forte propension à l'oxydation. La stabilité des composants est également un enjeu majeur : en plus de l'oxydation, la stabilité thermique

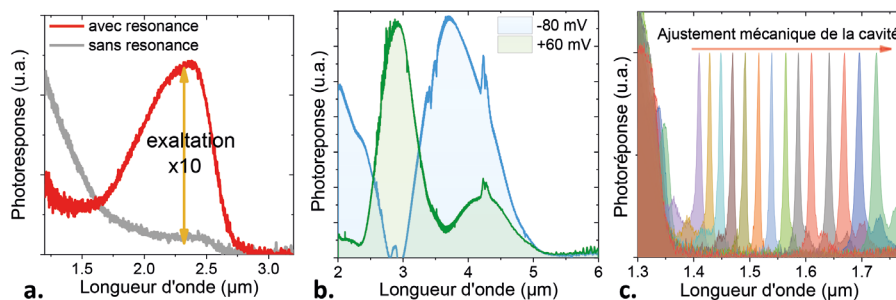


Figure 4. Couplage des nanocristaux à des cavités photoniques. a. Exaltation de l'absorption :

Photoréponse d'un film de nanocristaux dans le proche infrarouge étendu avec et sans couplage à un résonateur plasmonique. b. Fonction de filtrage spectrale : spectre d'un composant moyen infrarouge pour deux polarités de fonctionnement. Il est ainsi possible de générer un allumage ou une extinction d'une bande spectrale (ici vers 3 μm), juste en jouant sur la tension de polarisation. c. Détecteur en cavité : réponse spectrale d'un composant proche infrarouge dans une cavité diélectrique. La réponse est à la fois fine (<10 nm) et largement accordable (>300 nm).

peut s'avérer critique. Des marchés comme l'automobile exigent en effet de maintenir les performances alors que le composant est exposé pendant des milliers d'heures à 100 °C. Des progrès ont été réalisés en développant des hétérostructures colloïdales qui préviennent l'oxydation et le frittage des particules.

Pour obtenir des performances comparables à celles de l'InGaAs dans le proche infrarouge ou du HgCdTe dans le moyen infrarouge, une autre limitation majeure doit être adressée : elle provient du mécanisme de conduction des charges, qui se fait par saut entre particules. Ce mécanisme de diffusion tend à limiter la collection des charges du fait de la faible longueur de diffusion des porteurs (≈ 50–100 nm). Cette dernière est au moins 10 fois plus courte que la longueur d'absorption des photons entre 1 et 3 μm. Le couplage de la couche absorbante à un résonateur optique s'est avéré une stratégie très efficace pour améliorer les performances (voir Figure 4a). Au-delà de l'exaltation de l'absorption, la cavité photonique peut être utilisée pour modifier le spectre (l'affiner ou l'élargir, voir Figure 4c), mais aussi pour le rendre reconfigurable (Figure 4b). Le spectre devient alors modifiable *via* un changement de tension, ce qui permet de générer des fonctions

de filtrage spectral (filtre passe-haut, coupe-bande, etc.).

CONCLUSION

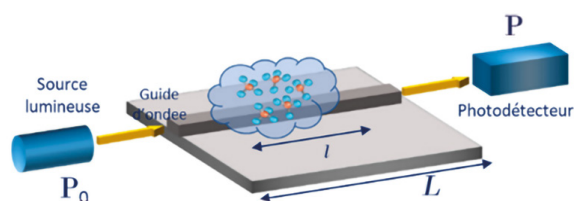
Les nanocristaux colloïdaux représentent une rupture technologique pour l'optronique infrarouge, en combinant flexibilité spectrale, intégration simplifiée et coût réduit par rapport aux semiconducteurs épitaxiés. Leur synthèse en solution et leur dépôt direct sur circuits CMOS suppriment les contraintes liées aux substrats, ouvrant la voie à des imageurs légers, compacts et mégapixels, comme démontré par des acteurs industriels. Cependant, des défis persistent : la substitution des métaux lourds (Pb/Hg) par des alternatives III-V stables, l'amélioration de la mobilité des porteurs *via* des hétérostructures, et l'optimisation du couplage avec des cavités photoniques pour exalter l'absorption et le filtrage spectral. Les progrès récents en passivation de surface et en ingénierie de cavités laissent entrevoir des performances comparables à l'InGaAs ou au HgCdTe, tout en conservant les avantages des NCs. À terme, cette technologie pourrait démocratiser l'imagerie IR, depuis l'automobile jusqu'à la télédétection, en répondant aux exigences croissantes de miniaturisation, de coût et de polyvalence spectrale. ●

LA SPECTROSCOPIE INFRAROUGE EN PHOTONIQUE INTÉGRÉE COMME MESURE DE DÉTECTION DE MOLÉCULES À L'ÉTAT DE TRACE

Sofiane MEZIANI, Nathalie LORRAIN, Loïc BODIOLU et Joël CHARRIER*

Université de Rennes, CNRS, Institut Foton-UMR 6082, 22305 Lannion, France

*joel.charrier@univ-rennes.fr



Cet article présente les principes de détection utilisant la spectroscopie infrarouge en photonique intégrée, en mettant en évidence les paramètres clés ainsi que leur ingénierie. Il décrit également les principales architectures de guides d'onde intégrés utilisées, et propose un état de l'art non exhaustif des molécules ayant été détectées démontrant la versatilité de cette technique.

<https://doi.org/10.1051/photon/202613829>

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

Le domaine du moyen infrarouge, généralement défini dans la plage spectrale s'étendant de 2 à 20 μm , suscite un intérêt croissant en raison de sa richesse informationnelle unique. Dans cette région du spectre électromagnétique, de nombreuses molécules présentent des bandes d'absorption caractéristiques correspondant à leurs modes ro-vibrationnels fondamentaux. Cette propriété confère au MIR un rôle central pour

l'analyse chimique et biologique, permettant une détection sélective et sensible sans marquage. Ainsi, les technologies exploitant le moyen infrarouge trouvent des applications variées, allant de la surveillance environnementale au diagnostic biomédical, en passant par le contrôle des procédés industriels et la défense.

Parallèlement, les avancées en photonique intégrée ont ouvert la voie à la miniaturisation et à l'intégration de fonctions optiques complexes sous forme de

dispositifs compacts. Ces systèmes reposent sur la propagation guidée de la lumière au sein de structures de dimensions micro- ou nanométriques, telles que des guides d'onde, des résonateurs ou des interféromètres, fabriqués à partir de matériaux dont les propriétés optiques sont transparentes avec le domaine infrarouge (par exemple, le silicium, le germanium ou les verres de chalcogénures). La photonique intégrée permet ainsi de concevoir des dispositifs ●●●

robustes, moins énergivore et à bas coût, tout en offrant des performances élevées en termes de sensibilité, de limite de détection (LoD) et de résolution spectrale.

L'intégration de ces plateformes photoniques avec la microfluidique constitue une approche particulièrement prometteuse pour le développement de laboratoires sur puce (lab-on-chip) par spectroscopie infrarouge. La microfluidique permet la manipulation précise de faibles volumes de fluides au sein de canaux miniaturisés, facilitant le contrôle des conditions expérimentales et réduisant la consommation d'échantillons et de réactifs. En combinant ces deux technologies, il devient possible de réaliser des systèmes analytiques compacts capables d'effectuer des analyses en temps réel, *in situ* et avec un haut degré d'automatisation permettant un déploiement sur site et évitant ainsi le prélèvement et la mesure analytique ultérieure en laboratoire.

Dans ce contexte, le développement de dispositifs intégrés opérant dans le moyen infrarouge représente un enjeu scientifique et technologique majeur. Ces systèmes visent à exploiter pleinement les signatures spectrales moléculaires tout en bénéficiant des avantages de l'intégration et de la miniaturisation, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles générations de capteurs compacts, portables, performants et multifonctionnels.

Cet article s'articule autour de trois volets principaux. Tout d'abord, le principe de détection est introduit en mettant en évidence les paramètres clés de l'interaction onde-matière, tels que le facteur de confinement externe, la sensibilité et la limite de détection (LoD), ainsi que les principales techniques spectroscopiques pour améliorer cette limite de détection. Ensuite, différentes architectures de transduction en photonique intégrée sont présentées, incluant les approches par onde évanescence, les structures à fort confinement et la détection volumique à base de matériaux poreux, avec un aperçu comparatif des performances issues de la littérature. Enfin, cet article se conclut par des perspectives offertes par les plateformes photoniques intégrées dans le moyen infrarouge.

PRINCIPE DE TRANSDUCTION EN PHOTONIQUE INTÉGRÉE

Les paramètres clefs de dimensionnement de l'optimisation de l'interaction onde-matière en photonique intégrée

Le principe de détection en spectroscopie infrarouge repose généralement sur l'atténuation de la lumière

par une espèce moléculaire absorbante le long de la partie transductrice d'un guide d'onde monomode comme illustré sur la figure 1.

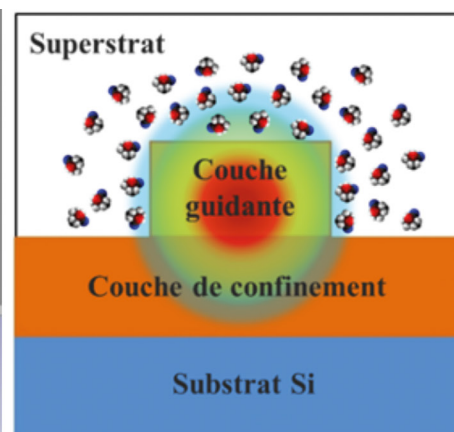
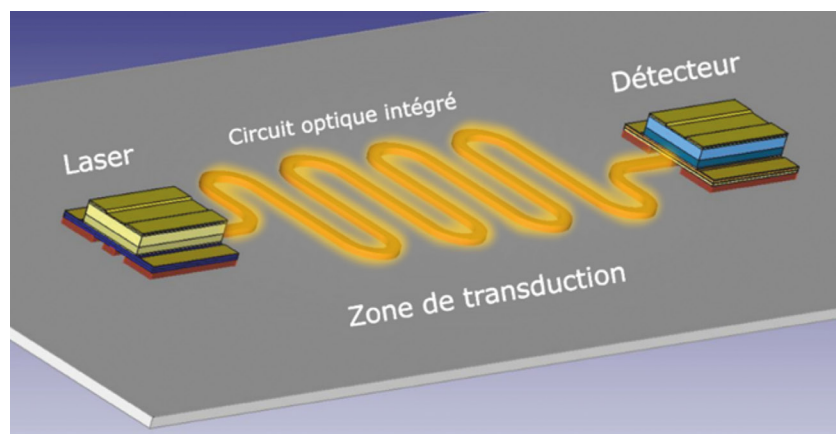
Le paramètre le plus approprié en optique intégrée pour calculer la fraction du champ électromagnétique en contact avec l'analyte est le facteur de confinement externe Γ [1]. Ce paramètre est obtenu en exprimant la sensibilité du guide d'onde aux variations de l'indice de réfraction du superstrat tel que :

$$\Gamma = \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial n_{\text{superstrat}}} = \frac{n_g}{n_{\text{superstrat}}} = \frac{\iint_{\text{superstrat}} \epsilon |\vec{E}|^2 dx dy}{\iint_{\infty} \epsilon |\vec{E}|^2 dx dy}$$

Avec n_{eff} l'indice effectif du mode propagé dans le guide transducteur, $n_{\text{superstrat}}$ l'indice du milieu à sonder, n_g l'indice de groupe et ϵ la permittivité.

Dans certains cas, Γ peut dépasser l'unité, ce qui indique qu'un gain par unité de longueur supérieur à celui obtenu en espace libre peut être atteint. Cela s'explique par le fait que, au-delà du simple confinement spatial de l'énergie du champ électrique, Γ intègre également l'effet de l'indice de groupe [1]. Le dimensionnement

Figure 1. (a) Représentation schématisée d'un capteur optique intégré compact qui regroupe sur le même substrat la source lumineuse, le guide d'onde de longueur L , la partie transductrice de longueur l inférieure à L et le détecteur, (b) Schéma transversal d'un guide d'onde avec la présence de molécules absorbantes dans le superstrat.



du guide d'onde en termes géométrique et de contraste d'indice permettrait d'optimiser cette valeur.

Le signal propagé va alors subir une atténuation qui va se rajouter à celle engendrée par les pertes de propagation de la structure guidante. La relation de Beer-Lambert s'écrit donc en tenant en compte de l'atténuation des molécules à détecter :

$$P(\lambda) = p_0(\lambda)e^{-\alpha(\lambda)L - \Gamma(\lambda)\epsilon(\lambda)Cl}$$

Avec P et P_0 les puissances optiques respectivement à la sortie et à l'entrée du guide, α les pertes de propagation de la plateforme, L la longueur du guide d'onde, Γ le facteur de confinement externe, ϵ le coefficient d'absorption molaire, C la concentration des molécules absorbantes et l la longueur d'interaction entre les molécules absorbantes et le mode optique.

Ainsi, la sensibilité du dispositif est définie comme la variation de la puissance optique de sortie en fonction de la concentration de l'analyte C . Elle peut être déterminée en dérivant l'expression précédente par rapport à C [1, 2]

$$S = \left| \frac{dP(\lambda)}{dC} \right| \Gamma(\lambda)\epsilon(\lambda)l p_0(\lambda)e^{-\alpha(\lambda)L - \Gamma(\lambda)\epsilon(\lambda)Cl}$$

Il existe ainsi à partir de cette relation, une longueur optimale l_{opt} de la partie transductrice pour laquelle la sensibilité est maximale telle que :

$$l_{opt} = \frac{1}{\Gamma(\lambda)\epsilon C + \alpha(\lambda)}$$

La concentration minimale de l'analyte notée C_{min} mesurable par le capteur représente donc la limite de détection (LoD). Ainsi, en prenant en compte l'ensemble de la chaîne de mesure, la puissance optique minimale P_{min} détectable par le détecteur est définie comme la différence entre la puissance optique correspondant à une concentration nulle $P(C=0)$ et la puissance optique pour cette concentration minimale [2]. Elle dépend des caractéristiques du photodétecteur infrarouge (la puissance équivalente de bruit (NEP), la bande passante (B) et le rapport signal sur bruit (SNR) qui tient compte des pertes de couplage à l'entrée et à la sortie du guide d'onde) et s'écrit selon

la relation suivante :

$$P_{min} = P(C=0) - P(C_{min}) = SNR NEP \sqrt{B}$$

Ainsi en utilisant les caractéristiques du photodétecteur infrarouge et les équations précédentes, il est possible d'exprimer C_{min} comme suit :

$$C_{min} = \frac{-\ln \left[1 - \frac{SNR NEP \sqrt{B}}{P_{0exp}(-\alpha L_{opt})} \right]}{\Gamma \epsilon L_{opt}}$$

Ainsi, ce paragraphe établit les critères de conception des guides d'onde en tant que transducteur, notamment le dimensionnement géométrique du guide et son contraste d'indice en vue d'optimiser le facteur de confinement externe Γ . Il souligne en outre que la limite de détection dépend de l'ensemble de la chaîne de mesure, dont l'optimisation conditionne l'obtention d'une sensibilité maximale et, par conséquent, d'une LoD minimale.

Techniques de détection par spectroscopie infrarouge

Les principales techniques de spectroscopie d'absorption dans le moyen infrarouge reposent sur des approches différentes pour mesurer l'atténuation de la lumière par une espèce moléculaire cible en fonction de la longueur d'onde. Elles se distinguent par leur complexité instrumentale, leur sensibilité et leur robustesse face au bruit.

Ainsi, la spectroscopie d'absorption par détection directe (Direct Absorption Spectroscopy, DAS) consiste à mesurer directement la diminution d'intensité de la lumière guidée après interaction avec les molécules cibles, en fonction de la longueur d'onde. Simple à mettre en œuvre et directement interprétable, elle permet d'obtenir un spectre large selon la source utilisée mais reste limitée en sensibilité, notamment en raison de sa forte dépendance aux fluctuations de puissance de la source et aux paramètres du détecteur comme démontré dans le paragraphe précédent.

Afin d'améliorer la sélectivité et les performances de détection, la spectroscopie d'absorption par diode laser accordable (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS) utilise des sources laser dont la longueur d'onde peut être finement

ACCOMPAGNER LES STARTS-UP QUI INNOVENT

KAPAH DÉVELOPPEMENT DE GÉNÉRATEURS ET DE MODULATEURS D'ONDES THZ ULTRA-STABLES

- ▲ Télécommunications à haut débit (terrestres et non terrestres)
- ▲ Communications optiques (fibre optique et espace)
- ▲ Imagerie térahertz, radars ultraprécis et spectroscopie
- ▲ Applications quantiques



telliades next-gen IR viewers

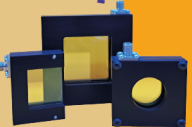
BEAMVIEWER IR DE DERNIÈRE GÉNÉRATION

- ▲ Alignement, maintenance, sécurité pour applications lasers



MODULATEURS DE LUMIÈRE HOASYS ET COMPOSANTS À CRISTAUX LIQUIDES

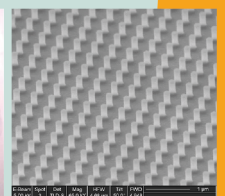
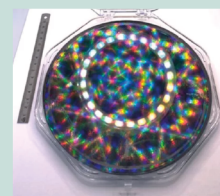
- ▲ Détection passive d'onde acoustique



SOLNIL nanosperm your world

REVÊTEMENTS NANOSTRUCTURÉS

- ▲ Métasurface, traitement AR très haute tenue au flux



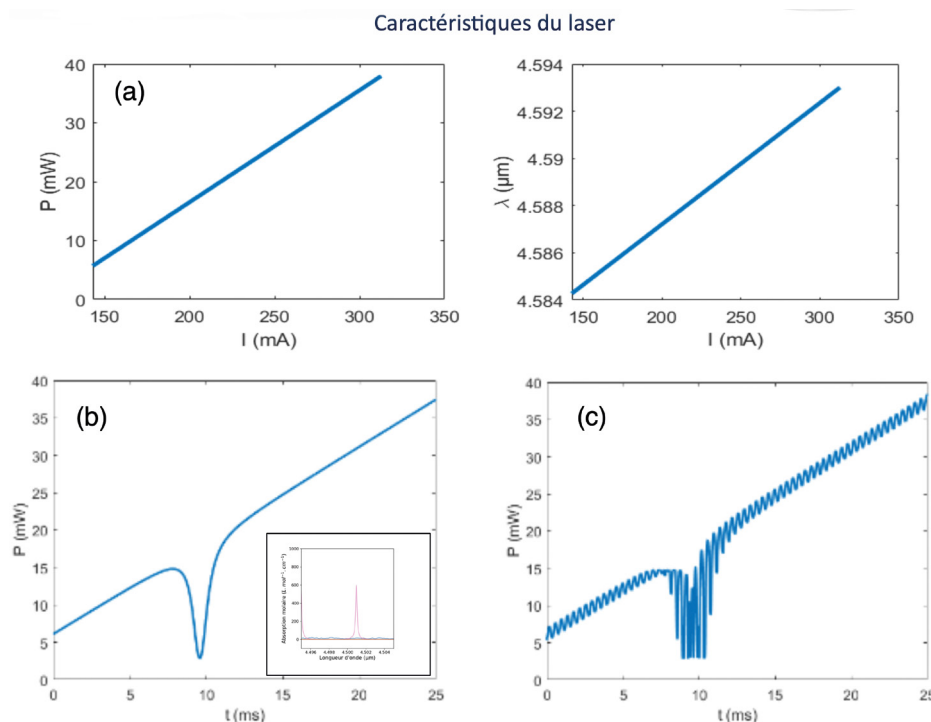


Figure 2. (a) Exemples de caractéristiques d'un laser QCL dans le Moyen infrarouge, (b) exemple de résultat par spectroscopie par diode laser accordable, insert : spectre d'absorption du CO autour de 4,5 μm , (c) exemple de résultat par spectroscopie par modulation de longueur d'onde.

ajustée (figure 2a) en jouant sur le courant pour sonder des raies d'absorption spécifiques des molécules à détecter (Figure 2b et insert). Cette approche offre une excellente résolution spectrale et permet des mesures rapides et ciblées. Toutefois, elle est contrainte par la plage d'accordabilité des lasers disponibles, ainsi que par leur coût et leur sensibilité aux dérives thermiques et instabilités du laser.

Enfin, la spectroscopie par modulation de longueur d'onde (Wavelength Modulation Spectroscopy, WMS) introduit une modulation périodique de la longueur d'onde autour d'une raie d'absorption, combinée à une détection synchrone permettant la détection du signal à des harmoniques spécifiques (1f, 2f). Cette technique permet de s'affranchir en grande partie du bruit basse fréquence et d'atteindre des limites de détection nettement plus faibles (Figure 2c). En contrepartie, elle nécessite un traitement du signal plus élaboré ainsi qu'une calibration précise pour relier les signaux

mesurés aux concentrations analytiques. Cette méthode permet ainsi d'obtenir des LoD plus faibles et une bonne robustesse vis à vis des fluctuations de puissance.

Le choix de la technique dépend du compromis recherché entre simplicité expérimentale, sensibilité et sélectivité, en fonction des contraintes applicatives, des performances visées et du coût associé.

DIFFÉRENTES STRUCTURE DE TRANSDUCTION EN PHOTONIQUE INTÉGRÉE

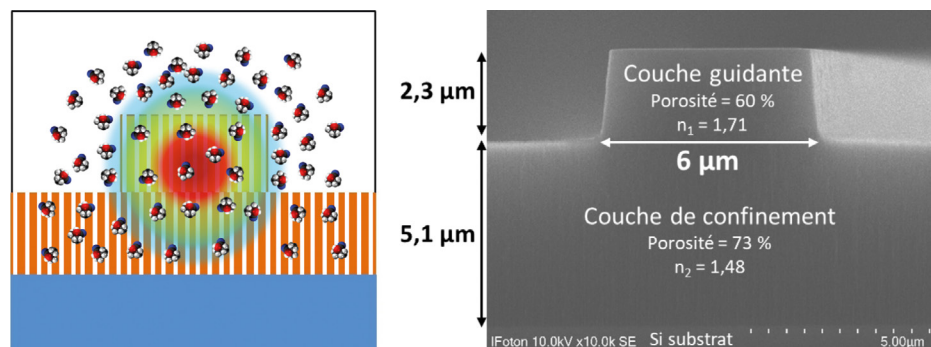
Une façon de diminuer la limite de détection est d'augmenter le facteur de confinement externe en jouant sur l'architecture des guides d'onde intégrés comme transducteur optique.

Transduction par onde évanescente

L'un des mécanismes de transduction exploités dans les capteurs en optique intégrée repose sur l'interaction par onde évanescente comme illustrée sur la figure 1. Une fraction du champ électromagnétique associée à un mode optique confiné dans un guide d'onde s'étend au-delà de l'interface couche guidante / superstrat et interagit ainsi avec les molécules présentes dans le superstrat. Lorsque la longueur d'onde du mode optique propagé dans le guide d'onde correspond à une raie d'absorption des espèces présentes dans le superstrat, la lumière sera absorbée de façon plus ou moins importante en fonction de la concentration des molécules présentes. La longueur d'onde permet donc de sélectionner l'analyte à détecter et la puissance collectée permet d'en déduire la concentration de ces molécules.

Dans le but d'augmenter la sensibilité du capteur développé, plusieurs études cherchent à optimiser le facteur de confinement externe du champ évanescent en réduisant les dimensions du guide d'onde au niveau de la zone de transduction pour

Figure 3. Schéma d'un guide d'onde en matériaux poreux avec présence de molécules absorbantes dans le superstrat mais également infiltrées dans la couche guidante et la couche de confinement, b) image obtenue par microscopie électronique à balayage d'un guide d'onde en silicium poreux [1, 3].



augmenter la fraction de champ évanescent ou en fabriquant des structures guidantes suspendues [1].

Transduction par détection de volume

L'interaction de volume est un autre schéma d'interaction entre le mode optique et l'analyte. Contrairement à l'interaction avec le champ évanescent qui intervient uniquement au niveau de la surface, l'interaction de volume est beaucoup plus importante car la fraction du mode optique localisée dans les couches guidante et de confinement interagit également avec les molécules à détecter. Ce schéma d'interaction peut prendre différentes formes soit en utilisant des guides présentant une structuration sub-longueur d'onde suspendus ou non [1, 3] ou en utilisant des guides d'onde slot permettant une interaction onde-matière plus importante.

Une autre architecture de guide d'onde pour optimiser la sensibilité de la détection consiste à fabriquer des structures guidantes à partir de matériaux poreux [1, 3] comme en silicium poreux. L'analyte pénètre alors *via* les pores sur une partie du volume des guides d'onde qui dépend de la porosité du matériau comme représenté sur la

figure 3. L'interaction lumière-analyte engendrée est ainsi fortement augmentée.

Principaux résultats de limite de détection dans le moyen infrarouge en optique intégrée

La performance d'un capteur optique est généralement évaluée à partir de sa limite de détection (LoD), définie comme la plus faible concentration d'analyte détectable. Celle-ci correspond à un signal dont l'amplitude est au moins 3,3 fois supérieure à l'écart-type du bruit mesuré en l'absence d'analyte [1] :

$$LoD = 3,3 \frac{\sigma}{S}$$

où σ représente l'écart-type du bruit du système de mesure et S la sensibilité, définie comme la variation de la puissance optique transmise en fonction de la variation de la concentration de l'analyte, comme indiqué précédemment.

La Figure 4 présente une synthèse non exhaustive des principaux résultats concernant la détection moyen infrarouge de molécules, tant en phase gazeuse que liquide, réalisées à l'aide de plateformes intégrées réalisées/fabriquées avec des matériaux transparents dans cette gamme de longueur d'onde.

Dans la majorité des démonstrations, les dimensions géométriques des structures permettent une propagation monomode et sont optimisées afin de maximiser le facteur de confinement externe. Ces capteurs exploitent la détection par onde évanescente avec des guides d'onde tels que des guides rubans ou par détection de volume en utilisant des guides d'onde tels que les slots. La majorité des plateformes sont utilisées pour des transductions à des longueurs d'onde inférieures à 7 μm . Seules quelques plateformes, notamment celles à base de Ge, de SiGe et de verres de Chalcogénures ont pu être utilisées au-delà de cette longueur d'onde grâce à leur large gamme de transparence. Les preuves de concept incluent la détection de gaz tels que CO_2 , CH_4 ou SF_6 , ainsi que de liquides comme l'acétonitrile ou l'isopropanol, y compris dans des mélanges complexes, ou encore de polluants émergents de type BTEX (benzène, toluène, xylène).

Certaines études démontrent la capacité des transducteurs à détecter des concentrations à l'état de traces. Ces limites de détection dépendent également de la stabilité des sources laser, des détecteurs utilisés et des différentes techniques de mesures ●●●



OPTRONIQUE

Obturbateur NUC rotatif RS08B

Tourelle gyroscopique stabilisée par motorisation piézoélectrique



INFRAROUGE

Mesure laser

Filtres optiques

Sphères intégrantes de puissance Laser

Sécurité Laser

Lasers Nd:YAG

Photodiodes

Visitez Pro-lite.fr



PRO-LITE
TECHNOLOGY

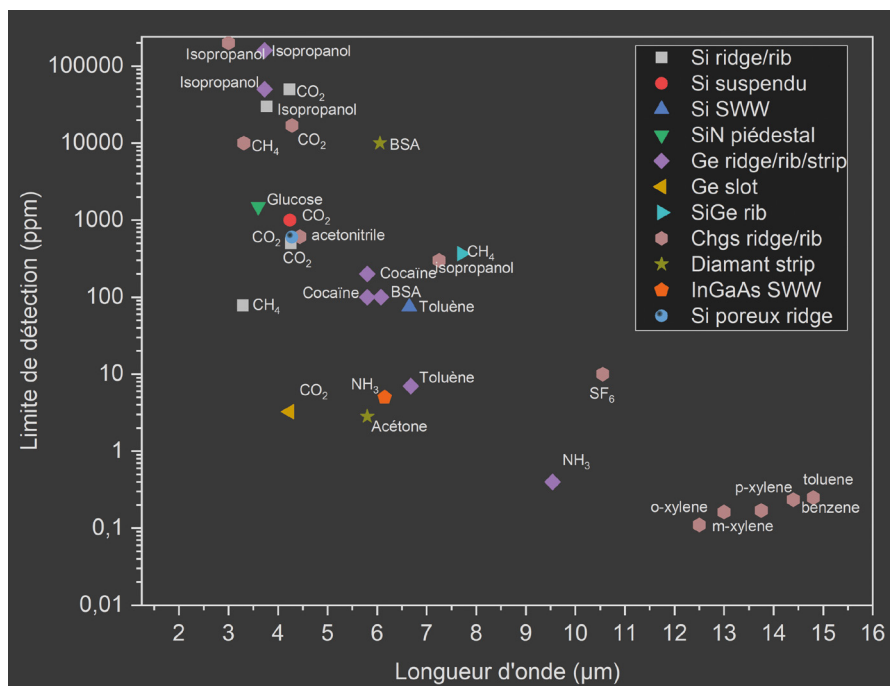


Figure 4. Résumé non exhaustif des LoD selon les matériaux et de leurs structures en optique intégrée [1, 4].

comme précisé précédemment. Bien que ces méthodes puissent être améliorées par l'utilisation de techniques telles que la spectroscopie par modulation de longueur d'onde (WMS) pour accroître la sensibilité, les limites de détection obtenues expérimentalement démontrent d'ores et déjà le fort potentiel des dispositifs photoniques intégrés pour de nombreuses applications *in situ*.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La photonique intégrée dans le moyen infrarouge constitue aujourd'hui une voie particulièrement prometteuse pour le développement de systèmes de spectroscopie infrarouge compacts, sensibles et sélectifs. En tirant profit des bandes d'absorption fondamentales des molécules, cette approche permet une détection spécifique et quantitative de nombreuses espèces chimiques, ouvrant des perspectives majeures dans des domaines tels que l'environnement, la santé, le contrôle industriel et la défense.

L'exploitation de l'interaction par onde évanescente ou en volume pour la transduction au sein de circuit photoniques intégrés offre un levier intéressant pour miniaturiser les dispositifs tout en améliorant leurs performances.

L'une des perspectives réside dans la réalisation de spectromètres entièrement intégrés dans le moyen infrarouge, combinant sur une même plateforme les sources de lumière, les structures de guidage et de transduction ainsi que les

détecteurs. Différentes technologies de sources sont envisagées, telles que les lasers à cascade quantique (QCL), les sources supercontinuum ou encore les peignes de fréquences optiques, chacune présentant des avantages spécifiques en termes de largeur spectrale, de cohérence et de puissance. Leur intégration avec des détecteurs adaptés (par exemple à base de matériaux III-V ou de technologies compatibles CMOS) constitue une étape déterminante vers des systèmes autonomes et performants. Toutefois, plusieurs verrous scientifiques et technologiques subsistent. Ils concernent notamment la gestion des pertes optiques de ces plateformes dans le moyen infrarouge et la compatibilité des matériaux pour une intégration hétérogène des différentes fonctions (sources, guides, détecteurs). À cela s'ajoutent des défis liés à la dissipation thermique, à la stabilité des sources, ainsi qu'à l'optimisation du couplage optique entre les différents composants.

En dépit de ces défis, les avancées récentes en photonique intégrée et en ingénierie des matériaux laissent entrevoir la possibilité de spectromètres miniaturisés, robustes et à faible coût. À terme, ces dispositifs pourraient révolutionner l'accès à la spectroscopie infrarouge en la rendant portable et déployable à grande échelle, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles applications en analyse *in situ* et en temps réel. ●

RÉFÉRENCES

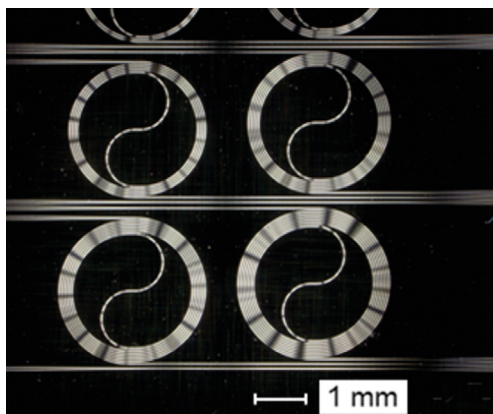
- [1] Sofiane Meziani, « Développement de capteurs spectroscopiques en photonique intégrée dans le moyen infrarouge », thèse, Université de Rennes, (2024), <https://theses.fr/2024URENS027>
- [2] Aldo Gutierrez-Arroyo *et al.*, *Sensors and Actuators B: Chemical* **242**, 842 (2017), <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.09.174>
- [3] Rami Zegadi *et al.*, *J. Opt.* **23**, 035102 (2021), <https://doi.org/10.1088/2040-8986/abdf69>
- [4] Sofiane Meziani *et al.*, *Opt. Express* **33**, 17002 (2025), <https://doi.org/10.1364/OE.553730>

LES CIRCUITS PHOTONIQUES INTÉGRÉS DANS L'INFRAROUGE MOYEN: VERS DES SYSTÈMES ULTRA COMPACTS POUR LA SPECTROSCOPIE

Carlos ALONSO-RAMOS, Adel BOUSSEKSOU, Delphine MARRIS-MORINI*

C2N, Université Paris Saclay, CNRS, 10 boulevard Thomas Gobert 91120 Palaiseau, FRANCE

*delphine.morini@universite-paris-saclay.fr



La spectroscopie dans l'infrarouge moyen est un outil essentiel pour l'analyse et l'identification de composés chimiques. Par exemple la détection et la quantification de traces de gaz à effet de serre et de composés toxiques représentent un enjeu majeur pour la protection de l'environnement. Dans ce contexte, les circuits photoniques opérant dans l'infrarouge moyen, capables de manipuler et de façonner les faisceaux optiques de manière intégrée et miniaturisée, suscitent un intérêt croissant et ont connu des avancées significatives ces dernières années.

<https://doi.org/10.1051/photon/202613835>

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 spectroscopie dans l'infrarouge moyen (au sens large, entre 2 et 20 μm de longueur d'onde) constitue une méthode universelle d'identification des substances chimiques et biologiques, ainsi qu'un outil de diagnostic non invasif. En effet, les molécules présentent des résonances caractéristiques, responsables de raies d'absorption dans cette gamme spectrale. Ces signatures peuvent être exploitées par exemple pour détecter des traces de substances dangereuses et toxiques pour l'environnement.

Les domaines d'application sont nombreux, et couvrent notamment

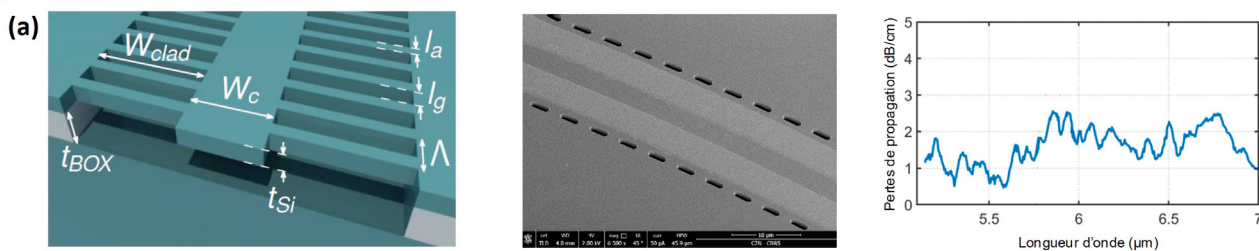
la surveillance environnementale, la sécurité et le contrôle des procédés industriels. Toutefois, démocratiser l'usage de la spectroscopie au-delà des laboratoires de recherche représente un défi majeur, qui stimule le développement de systèmes photoniques intégrés et compacts.

Dans ce contexte, la recherche sur les circuits photoniques opérant dans l'infrarouge moyen, capables de manipuler et de façonner les faisceaux optiques de manière intégrée et miniaturisée, a connu un essor considérable ces dernières années.

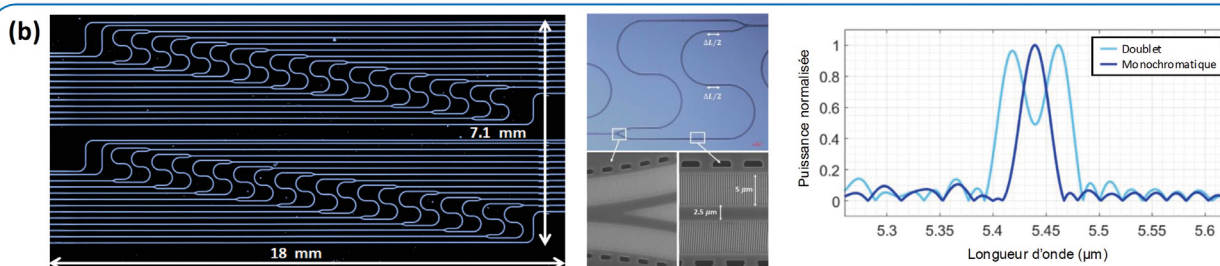
À l'heure actuelle, plusieurs approches sont explorées et seront

présentées dans la suite. Chacune offre des avantages spécifiques et répond à des enjeux technologiques distincts :

- La photonique silicium, notamment via l'utilisation des substrats silicium sur isolant (SOI) constitue une solution particulièrement attractive en raison de sa compatibilité avec les technologies de circuits photoniques déjà commercialisées pour les applications télécoms.
- Le recours au germanium permet quant à lui d'étendre le domaine spectral au-delà de 8 μm de longueur d'onde, qui correspond à la limite de transparence du silicium, ouvrant ainsi la voie à des dispositifs ●●●



Guides d'onde en silicium nanostructurés à l'échelle sub-longueur d'onde pour l'infrarouge moyen



Circuits photoniques complexes : spectromètre par transformée de Fourier

opérant à de plus grandes longueurs d'onde.

- Enfin le développement de circuits photoniques à base de matériaux III-V présente l'avantage d'une compatibilité naturelle avec les sources lasers à cascade quantique, facilitant l'intégration des sources dans les systèmes photoniques infrarouge moyen.

Pour chacune de ces plateformes photoniques intégrées, les enjeux actuels concernent le développement des fonctions optiques élémentaires, en tenant compte des contraintes spécifiques associées à la gamme spectrale de l'infrarouge moyen. Il est à noter qu'à ce stade, la détection du signal optique est généralement envisagée de manière externe. En effet les contraintes associées aux photodétecteurs, notamment en termes de refroidissement, rendent leur intégration directe sur les circuits photoniques difficiles.

À terme, différentes architectures pourront être envisagées pour la réalisation de systèmes spectroscopiques intégrés, en fonction des performances atteintes pour chacune des fonctions optiques élémentaires. Parmi les approches possibles figurent l'utilisation d'une source optique large bande couplée à un spectromètre intégré, le recours à

Figure 1. Circuits photoniques intégrés basés sur des guides d'onde en silicium nanostructurés à l'échelle sub-longueur d'onde. (a) Schéma d'un guide d'onde en membrane de silicium suspendue, dans lequel deux réseaux sub-longueur d'onde forment une gaine métamatériau assurant à la fois le confinement optique et l'accès à l'acide fluorhydrique pour le retrait de la couche d'oxyde enfouie. Image au microscope électronique à balayage (MEB) de la structure fabriquée, accompagnée de la caractérisation expérimentale des pertes de propagation, comprises entre 1 et 2 dB/cm dans la gamme de longueurs d'onde de 5 à 7 μm . (b) Circuit photonique complexe dans l'infrarouge moyen réalisé à l'aide de guides d'onde en silicium sub-longueur d'onde : spectromètre intégré à transformée de Fourier permettant une restitution spectrale autour de 5,5 μm , correspondant à une longueur d'onde record pour des circuits photoniques complexes en silicium dans l'infrarouge moyen [1].

une source optique accordable ou encore la mise en œuvre d'un système à double peigne de fréquence optiques.

LA PHOTONIQUE SILICIUM POUR L'INFRAROUGE MOYEN: UTILISATION DES TECHNOLOGIES CMOS

La photonique sur silicium (Si) basée sur la plateforme silicium-sur-isolant (SOI) s'est imposée comme la technologie dominante pour les télécommunications optiques, grâce à sa compatibilité avec des procédés de fabrication CMOS matures, son fort contraste d'indice et son potentiel pour une production à grande échelle à faible coût. Le contraste d'indice élevé entre le silicium ($n \approx 3,44$) et la silice ($n \approx 1,44$) permet un confinement optique important et une forte densité d'intégration, rendant la

plateforme SOI particulièrement adaptée à la réalisation de circuits photoniques complexes.

Le silicium présente par ailleurs une large fenêtre de transparence s'étendant jusqu'à environ 8 μm , ce qui en fait une plateforme prometteuse pour la photonique dans l'infrarouge moyen. Toutefois, l'exploitation de la plateforme SOI dans ce domaine spectral est fondamentalement limitée par l'absorption de la couche d'oxyde enterrée (BOX), qui devient significative au-delà de longueurs d'onde de l'ordre de 3,5–3,6 μm . Les approches reposant sur l'augmentation des dimensions des guides d'onde permettent de réduire le recouvrement modal avec la silice absorbante, mais au prix d'une interaction diminuée avec le milieu environnant, ce qui limite leur pertinence pour les applications de détection.

Les plateformes de guides d'onde en silicium suspendus offrent une solution efficace à cette limitation en supprimant la couche de silice sous-jacente et en la remplaçant par de l'air. Cette approche permet d'exploiter pleinement la fenêtre de transparence du silicium tout en conservant la compatibilité avec des procédés de fabrication standard. En particulier, les guides d'onde conçus à base de réseaux sub-longueur d'onde (SWG) introduisent des régions en métamatériau assurant simultanément le confinement optique, la stabilité mécanique et l'accès nécessaire au retrait sélectif de la couche BOX (voir Fig. 1a). Les structures obtenues combinent ainsi un fort contraste d'indice (silicium/air), de faibles pertes de propagation et une grande flexibilité de conception.

Les guides d'onde en silicium suspendus à gaine SWG ont démontré de faibles pertes de propagation dans l'infrarouge moyen, avec des valeurs de l'ordre de 1-2,5 dB/cm dans la gamme de longueurs d'onde 5-7 μm . Ces performances constituent une avancée significative par rapport aux approches SOI conventionnelles dans ce domaine spectral et permettent la réalisation de systèmes photoniques fonctionnels et évolutifs dans l'infrarouge moyen.

En s'appuyant sur ces propriétés, des circuits photoniques complexes ont été réalisés sur cette plateforme pour des applications de spectroscopie. En particulier, un spectromètre à transformée de Fourier à hétérodyne spatiale (SHFSTS) a été démontré, opérant dans la gamme de longueurs d'onde 5-6 μm [1]. Le dispositif, basé sur un réseau d'interféromètres de Mach-Zehnder présentant des différences de chemin optique variables, illustré en Fig. 1b, atteint une résolution spectrale de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres sur une bande passante de plusieurs centaines de nanomètres. Cette démonstration met en évidence le potentiel de la photonique sur silicium suspendu sub-longueur d'onde pour la spectroscopie d'absorption intégrée, en combinant large bande spectrale, compacité et compatibilité avec des procédés de fabrication à grande échelle.

Dans l'ensemble, les guides d'onde en silicium suspendus nanostructurés à l'échelle sub-longueur d'onde constituent

une technologie clé pour la photonique intégrée dans l'infrarouge moyen, ouvrant de nouvelles perspectives en détection, imagerie et communications optiques en espace libre, tout en conservant les avantages d'une fabrication à grande échelle basée sur le silicium.

LES ALLIAGES SIGE POUR LES PLUS HAUTES LONGUEURS D'ONDE

Les circuits photoniques utilisant la plateforme SOI présentent un avantage indéniable lié à la compatibilité avec des technologies déjà industrialisées. Cependant une grande partie du spectre de l'infrarouge moyen est inaccessible quand la lumière est guidée dans le silicium, en raison de l'absorption multiphonon au-delà de 8 μm .

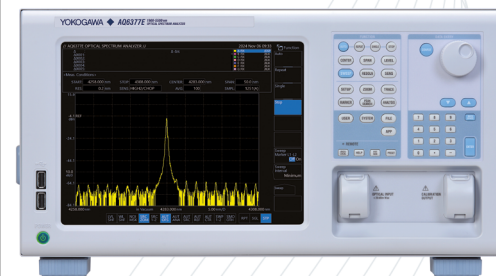
En parallèle il est intéressant de noter que le Germanium (Ge), un semi-conducteur largement utilisé en photonique silicium, notamment pour son absorption dans le proche infrarouge, est transparent sur une large gamme spectrale, de 1,9 à 15 μm de longueur d'onde. De nombreux travaux sont donc menés pour développer des structures intégrées photoniques à base de Ge ou d'alliages SiGe, en utilisant différentes plateformes : Ge sur Si, Ge sur SOI, SiGe sur Si, SiGe graduel, etc.... Parmi les avantages attendus, outre la gamme spectrale de transparence, on peut noter que le Ge possède un indice de réfraction élevé de l'ordre de 4 qui permet un confinement important du champ électromagnétique et un indice non linéaire Kerr élevé, de deux ordres de grandeur supérieur à celui du nitrure de silicium couramment utilisé pour des applications d'optique non linéaire.

Cependant un défi majeur est lié à la différence de paramètre de maille entre le Ge et le Si, couramment utilisé comme substrat. C'est cette raison qui a poussé au développement des structures graduelles à base d'alliage SiGe, comme représenté sur la Figure 2a. Sur un substrat Si, une croissance épitaxiale de SiGe, dont la concentration en Ge augmente progressivement lors de la croissance, permet une adaptation progressive du paramètre de maille, et l'obtention d'une couche supérieure en Ge ou en SiGe riche en Ge, de bonne qualité cristalline. Par ailleurs, l'indice de réfraction du SiGe étant ●●●

Caractérisation avancée des sources laser IR & QCL

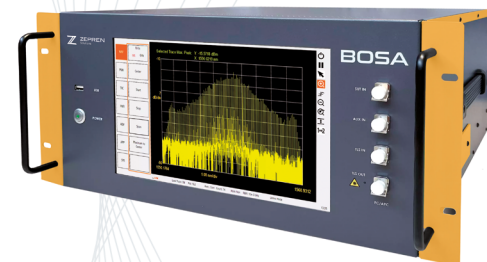
Analyse spectrale MWIR, cohérence et mesure de phase

YOKOGAWA 



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

 **ZEPREN**
Solutions



BOSA : Mesure haute résolution, phase et polarisation.



INFOS 

www.wavetel.fr
about@wavetel.fr

 ARAGON PHOTONICS

YOKOGAWA 

QUANTIFI PHOTONICS™

 ZEPREN Solutions

 ACTIVE TECHNOLOGIES

FIBERPRO

etsc

 LIGHTEL

 FBG KOREA

 SHINHU
SHINHU - CONNECTING FUTURE

 LIFECORE

 Bktel
photonics

croissant avec la concentration en Ge, la structure graduelle permet également une variation graduelle de l'indice de réfraction, et un confinement optique en haut du guide, là où la teneur en Ge est la plus grande.

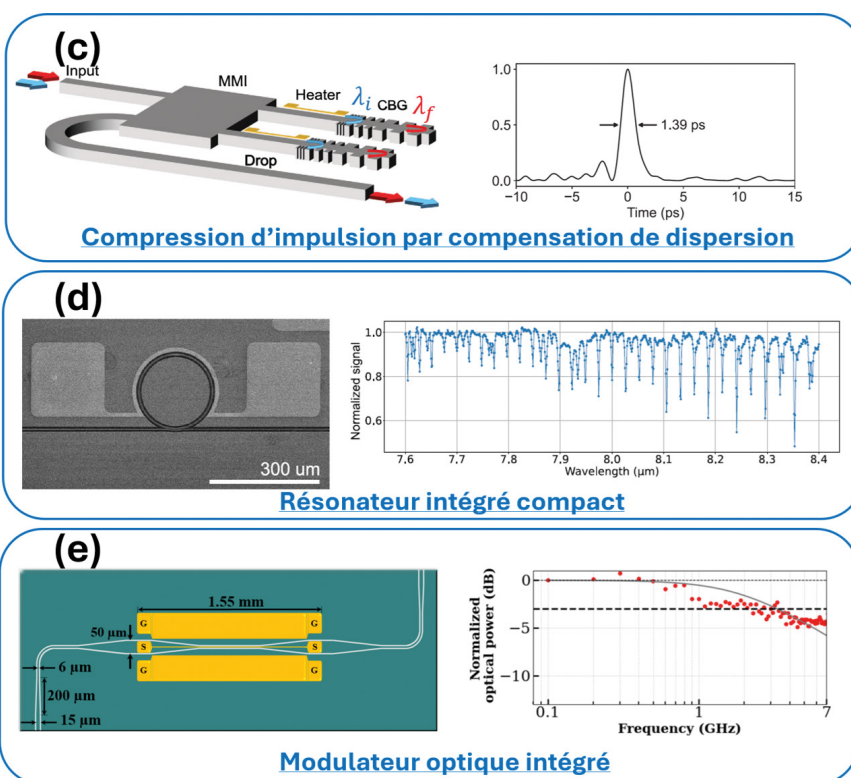
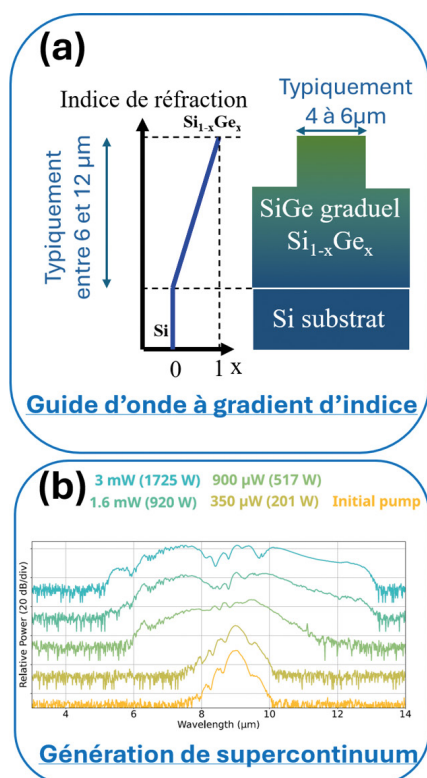
Ce type de circuits photoniques est développé depuis plusieurs années et un ensemble de composants a été démontré, montrant les performances de ces guides d'onde pour la photonique dans l'infrarouge moyen, principalement pour les longueurs d'onde au-delà de 7-8 μm où les plateformes Si ne sont plus adaptées. À titre d'exemple il a été montré que le fort coefficient non linéaire permet un élargissement spectral d'un train d'impulsion (génération de supercontinuum) et qu'une puissance moyenne de l'ordre du milliwatt était suffisante pour générer un signal couvrant plus d'une octave, de 6 à 12 μm de longueur d'onde (Figure 2b) [2]. Par ailleurs, l'ingénierie des guides et de la dispersion dans des miroirs de Bragg « chirpés » a permis de compenser la dispersion de source laser QCL à peigne de fréquence, permettant la génération d'impulsions temporelles (Figure 2c) [3]. Des résonateurs

compacts (anneaux de rayon 100 μm) ont également démontré de bonnes performances au-delà de 8 μm de longueur d'onde (Figure 2d) [4]. Finalement des modulateurs optiques ont été développés, et une bande passante de plus de 3 GHz a pu être obtenue (Figure 2e) [5]. Ces modulateurs utilisent la variation du coefficient d'absorption par variation de densité de porteurs libres dans des diodes intégrées dans les guides d'onde.

Ces exemples montrent la versatilité et les performances de la plateforme photonique à base d'alliages SiGe pour l'infrarouge moyen. Différents blocs de base ont pu être démontrés ces dernières années et chacune de

ces fonctions pourra être utile pour la réalisation de systèmes spectroscopiques. Les sources à supercontinuum sont des sources large bande permettant l'analyse simultanée de plusieurs molécules ayant des raies d'absorption à différentes longueurs d'onde dans l'infrarouge moyen. La compression temporelle d'impulsion optique permet d'envisager dans le futur le pompage de ces sources à supercontinuum par des lasers à cascades quantiques compacts. Quand aux résonateurs en anneau et aux modulateurs optiques, ce sont deux éléments clés pour la réalisation de peignes de fréquence optiques, qu'il soient obtenus par effet Kerr ou par génération électro-optique.

Figure 2. Circuits photoniques intégrés utilisant les alliages SiGe. (a) Vue schématique des guides d'onde utilisés : une couche graduelle de SiGe à partir du substrat Si permet le confinement optique dans la région supérieure du guide ; (b) Génération de supercontinuum optique par effet non-linéaire dans le guide. Un signal couvrant plus d'une octave, de 6 à 12 μm de longueur d'onde est obtenu pour une pompe d'entrée à 9 μm de longueur d'onde, de puissance moyenne de l'ordre de 1 mW [2]; (c) La compensation de dispersion dans des miroirs de Bragg « chirpés » est utilisée pour comprimer temporellement des signaux optiques issus de sources QCL [3]; (d) des résonateurs intégrés compacts fonctionnent sur une large bande spectrale, de 7.6 à 8.4 μm de longueur d'onde [4]; (e) des modulateurs optiques utilisant la variation de coefficient d'absorption par variation de densité de porteurs libres fonctionnent avec une bande passante supérieure à 3 GHz [5].



Par ailleurs au fur et à mesure de ces travaux, différents challenges scientifiques et techniques ont été mis en évidence et surmontés. A titre d'exemple, les composants commerciaux existants pour les bancs de caractérisation sont bien moins développés dans l'infrarouge moyen que dans l'infrarouge proche, ce qui limite les possibilités pour faire des mesures à haute résolution spectrale sur une large gamme spectrale. Pour surmonter ce défi, des techniques innovantes ont été proposées et développées, permettant par exemple, dans le cas des résonateurs compacts, de faire varier la phase de l'onde dans l'anneau et non la longueur d'onde du laser incident pour décrire et caractériser les pics de résonance. Cette technique est maintenant largement utilisée [4].

LES CIRCUITS PHOTONIQUES À BASE DE MATÉRIAUX III-V ET LA COMPATIBILITÉ AVEC LES SOURCES LASER QCL

Les circuits photoniques utilisant la plateforme à base de matériaux semiconducteurs à gap direct (III-V) présentent, quant à eux, l'avantage d'être compatible en termes de filière technologique avec les composants optoélectroniques développés dans l'infrarouge moyen comme des sources que sont les lasers à cascade quantique ou encore des détecteurs photoniques que sont les QWIP ou QCD. Ces matériaux offrent aussi des fenêtres de transparences couvrant la quasi-totalité de l'infrarouge moyen. Ils offrent aussi des coefficients non-linéaires comparables à d'autres plateformes. Par ailleurs les composants optoélectroniques opérant dans l'infrarouge moyen, en contraste aux composants existants aux plus courtes longueurs d'onde étaient, jusqu'il y a quelques années, essentiellement développés dans des systèmes en espace libre. Il y a un effort récent de la communauté scientifique pour proposer des versions intégrées/intégrables offrant ainsi des solutions plus compactes, plus simples et moins chères à produire pour répondre aux nouveaux enjeux dans les domaines de la détection et de la spectroscopie pour l'environnement et la santé.

La figure 3a présente les résultats récents [6] concernant des guides d'onde à faibles

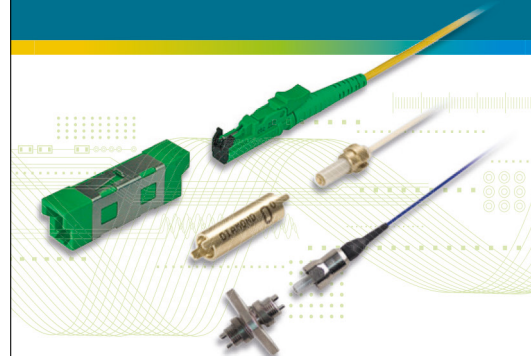
pertes dans l'infrarouge moyen formés de matériaux $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ sur InP, développés par épitaxie en phase vapeur métal-organique (MOCVD/MOVPE). Ce résultat est confirmé par une caractérisation complète des pertes de propagation optique dans ce système à des longueurs d'onde représentatives des deux fenêtres atmosphériques (4,6 μm et 8,5 μm). Nos résultats suggèrent que la plateforme $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ sur InP constitue un système prometteur pour démontrer des peignes de fréquences Kerr dans l'infrarouge moyen, avec à long terme l'avantage supplémentaire d'une intégration complète avec des composants actifs tels que les lasers et détecteurs à cascade quantique. La conception des guides passifs a été optimisée avec un empilement offrant un confinement optimal et un fonctionnement monomode. Aussi, une attention particulière est faite pour minimiser les sources de pertes liées aux absorptions intrinsèques des matériaux utilisés mais aussi aux sources de pertes liées aux paramètres géométriques des guides. Pour évaluer les performances de cette plateforme InP, des mesures de pertes ont été réalisées sur des guides d'onde diélectriques en spirale de différentes longueurs (1,77 cm, 3,77 cm et 5,22 cm, répétés trois fois sur la même puce).

La fabrication commence par le dépôt d'un masque dur SixNy par PECVD. Les guides sont ensuite définis par lithographie électronique (EBL), puis le motif est transféré dans le masque par gravure ionique réactive (RIE). La structure semi-conductrice est gravée par ICP-RIE utilisant une chimie HBr/O_2 . Enfin, le masque est retiré dans de l'acide fluorhydrique pur, puis l'échantillon est clivé pour obtenir des facettes propres. Les pertes ont été mesurées à l'aide de deux lasers à cascade quantique (DFB-QCL) émettant à 8,5 μm et 4,6 μm . La longueur d'onde est ajustée en modifiant finement le courant du laser.

Les pertes sont déterminées à partir des oscillations Fabry-Perot dues aux facettes clivées. Elles sont reliées aux maxima et minima de transmission [6]. À une longueur d'onde de 8,5 μm , on obtient des valeurs de pertes de l'ordre du dB/cm et des pertes de moins de 0,3 dB/cm à une longueur d'onde de 4,6 μm . Ces résultats valident la plateforme InP gravée ●●●

2BLighting Technologies

High performance and reliable fiber optic assemblies



PM+

Ultra high Polarization Extinction Ratio (PER)

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

16W



NEW

E-2000® PS+

Contact expanded beam

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

100W



E-2000® PSm

Contact pump laser connector

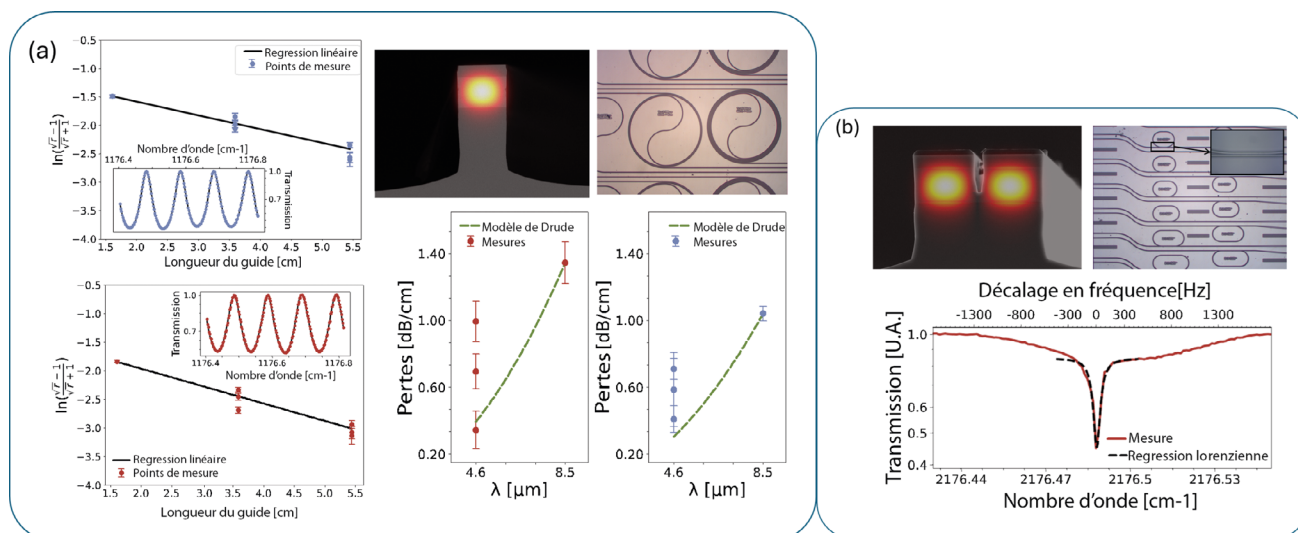
- Low loss
- Interlock solution optional
- MM 105 0.22NA (MM 200 0.22NA optional)



www.2blighting.fr

info@2blighting.com

+33 1 64 59 21 30



ICP comme système à faibles pertes pour les circuits photoniques mid-IR. Les étapes de désoxydation jouent un rôle clé, notamment pour la polarisation TE.

La figure 3b montre les mesures des facteurs de qualité des résonateurs de type « racetrack » à une longueur d'onde de 4,6 μm, obtenues à partir de mesures de transmission de guides d'onde couplés aux résonateurs, en polarisation TM. Les mesures ont été réalisées en ajustant spectralement l'émission d'un laser à cascade quantique DFB par le courant d'injection. La largeur à mi-hauteur (FWHM) de la résonance mesurée n'est que de 101 MHz, ce qui correspond à un facteur de qualité chargé de $6,4 \times 10^5$ (ce qui correspond à un facteur de qualité intrinsèque de $7,4 \times 10^5$).

Il s'agit d'une valeur record pour des résonateurs à ultra-haut facteur de qualité sur une plateforme semi-conductrice III-V. De plus, cela correspond à des pertes dans le guide d'onde de 0,24 dB/cm, en excellent accord avec les mesures obtenues par la méthode de Fabry-Perot.

Des marges d'amélioration existent encore pour réduire les pertes de propagation, notamment via un dopage au fer. En effet, contrairement à d'autres travaux de la littérature, la gaine supérieure en InP et le cœur en InGaAs n'ont pas été dopés au fer dans cette étude, ce qui laisse entrevoir un potentiel d'optimisation supplémentaire.

Figure 3. Circuits photoniques intégrés utilisant des matériaux semiconducteurs III-V, le système de matériaux InGaAs/InP sur un substrat d'InP. (a) Résultats obtenus sur des guides passifs pour la mesure des pertes de propagation linéaire à des longueurs de 8,5 μm et 4,6 μm. (b) Résultats des cavités en anneaux avec des hauts facteurs de qualité utilisant des coupleurs évanescentiels.

CONCLUSION

Trois approches complémentaires pour le développement de circuits photoniques dans l'infrarouge moyen ont été présentées. La photonique silicium « classique » utilise les techniques déjà développées industriellement pour couvrir la bande spectrale jusqu'à 7 μm de longueur d'onde. L'utilisation du germanium et des alliages SiGe permet d'étendre la plage de fonctionnement jusque 10-12 μm, et notamment de couvrir les gammes spectrales autour de 8 μm où les lasers QCL sont très performants. Enfin les circuits photoniques à base de matériaux III-V fonctionnent dans la même gamme de longueur d'onde et présentent une compatibilité naturelle avec les sources QCL.

Ces trois approches sont actuellement développées dans les laboratoires, avec de très bonnes performances en terme de pertes de propagation et de développement de fonctions optiques. L'application principale de cette gamme spectrale concerne la spectroscopie optique. Parmi les challenges à résoudre avant de voir le développement de solutions commerciales, on peut retenir des challenges techniques

et technologiques (intégration des sources lasers, développement d'outils de caractérisation dans ces gammes de longueur d'onde, etc...), mais on peut aussi noter un challenge plus applicatif, lié à la diversité des applications potentielles (détection de gaz, analyse de polluants dans des liquides, etc...), avec chacune des spécifications différentes en terme de longueur d'onde, gamme spectrale ou résolution. Il est probable que de grandes applications « phares » doivent être définies pour diriger le développement de futurs systèmes intégrés pour la spectroscopie dans l'infrarouge moyen. ●

RÉFÉRENCES

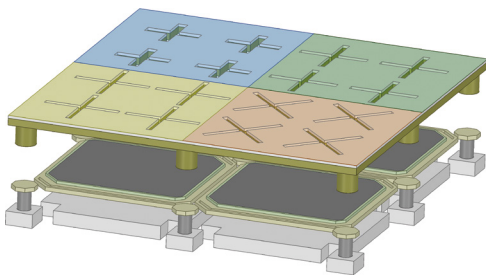
- [1] T. T. D. Dinh *et al.*, *Opt. Lett.* **47**, 810 (2022)
- [2] V. Turpaud *et al.*, *APL Photonics* **10**, 090804 (2025)
- [3] H. Dely *et al.*, *Opt. Express* **33**, 39715 (2025)
- [4] A. Bricout *et al.*, *Laser Photon. Rev.* **20**, e01485 (2025)
- [5] J. Huertas-Pedroche *et al.*, *Opt. Express* **33**, 42408 (2025)
- [6] L. Lucia *et al.*, *APL Photonics* **11**, 036108 (2026)

MATRICES DE MICROBOLOMÈTRES POUR L'IMAGERIE INFRAROUGE MULTISPECTRALE

Laurent DUSSOPT*, Thomas PERRILLAT-BOTTONET

CEA-Léti, Grenoble, France

*laurent.dussopt@cea.fr



Les technologies matérielles et logicielles de l'imagerie infrarouge sont de plus en plus accessibles et leurs usages se diversifient à des domaines nécessitant à la fois des spécifications plus exigeantes (compacité, performance, coût) et des fonctions plus complexes. L'information spectrale fait partie de ces fonctions qui échappent encore aujourd'hui aux imageurs intégrés commerciaux mais sont au cœur d'applications industrielles à fort enjeu.

<https://doi.org/10.1051/photon/202613841>

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'imagerie infrarouge s'est imposée comme une technologie clé dans de nombreux domaines : surveillance, défense, contrôle industriel, observation scientifique ou de loisir. D'autres applications sont en émergence tels que l'automobile et les drones civils. Au cœur de ces applications se trouvent les matrices de microbolomètres, des détecteurs thermiques compacts, sensibles et peu coûteux, capables de fonctionner à température ambiante. Ils fonctionnent typiquement dans la

bande thermique 8-14 μm mais dans certains cas peuvent être étendus à l'infrarouge moyen (3-5 μm) [1].

Depuis quelques années, des fonctions complémentaires sont en développement telles que l'imagerie multispectrale et l'imagerie polarimétrique afin d'extraire davantage d'informations physiques sur les scènes observées. L'imagerie multispectrale peut être utilisée pour la thermographie absolue, c'est-à-dire une mesure précise de la température et de l'émissivité des objets constituant la scène observée. Elle est aussi utilisée pour la détection

de gaz dans la surveillance de sites industriels ou la surveillance environnementale car de nombreux gaz présentent des raies d'absorption dans la gamme infrarouge. Le tri de matériaux est aussi une application envisagée. L'imagerie polarimétrique apporte également une information dans l'analyse d'une scène en aidant à qualifier la nature d'un objet ou en améliorant les contrastes, des capacités importantes dans la défense ou pour les transports.

Ces fonctions sont réalisées aujourd'hui par des dispositifs optiques (filtres, polariseurs, ●●●

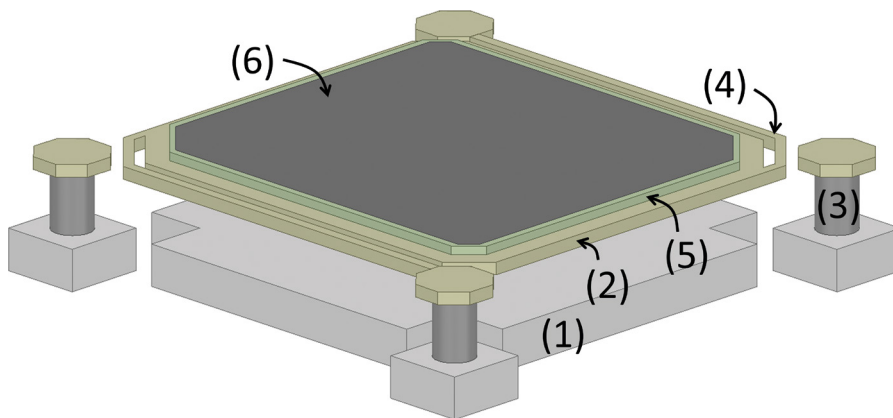


Figure 1. Vue simplifiée d'un bolomètre : (1) réflecteur, (2) planche, (3) pilier, (4) bras, (5) thermomètre, (6) absorbeur.

interféromètres, etc.) indépendant des imageurs. Leur intégration au sein du capteur d'imagerie peut ouvrir la voie à des systèmes plus compacts, plus robustes, plus économiques et peut-être plus performants par certains aspects.

MATRICES DE MICROBOLOMÈTRES MULTISPECTRALES

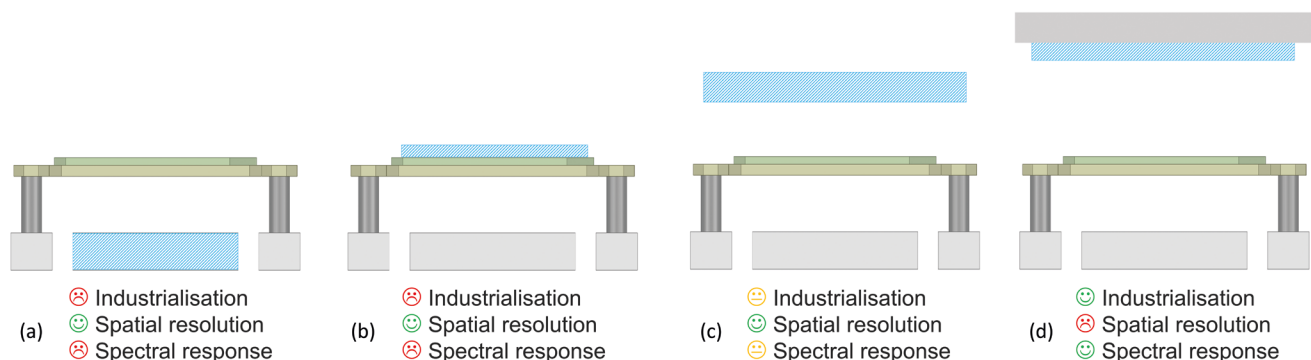
Un microbolomètre est un détecteur de la famille des systèmes micro-électro-mécaniques (MEMS) (Fig. 1). Il est généralement constitué d'une planche centrale comprenant un absorbeur optique, typiquement un film métallique résistif, et un transducteur électro-thermique, typiquement un matériau thermo-résistif tel que l'oxyde de vanadium. La planche est suspendue à 1-2 μm au-dessus d'un réflecteur grâce à deux bras très fins qui ont une triple

fonction : maintien mécanique de la planche, isolation thermique de la planche et connexion électrique entre le transducteur et l'électronique de lecture. Le principe de fonctionnement peut se résumer simplement : le flux optique incident est converti en échauffement par l'absorbeur et cet échauffement est mesuré électriquement grâce au transducteur. Les imageurs actuels comprennent jusqu'à plus d'1 million de pixels, chacun de taille entre 8 et 17 μm .

Pour un imageur multispectral, l'enjeu consiste à intégrer au plus près ou au sein du bolomètre un dispositif capable d'imposer une réponse spectrale sélective et différenciée

en différentes zones de la matrice, idéalement différente pixel à pixel. Plusieurs approches ont été envisagées et peuvent être comparées au regard de plusieurs critères que sont i) la réponse spectrale obtenue et sa compatibilité avec l'application visée, ii) la résolution spatiale de l'image dans chaque bande spectrale, iii) et enfin l'industrialisation ou la capacité à fabriquer des imageurs en grande série à un coût compétitif (Fig. 2). Ainsi, une première solution pour rendre le dispositif spectralement sélectif est de modifier le réflecteur qui détermine la longueur d'onde de résonance de la cavité optique sous le bolomètre. Une seconde option est de placer une structure absorbante résonante sur la planche bolométrique en lieu et place de l'absorbeur large bande habituel. Ces deux options n'ont pas permis des réponses spectrales intéressantes dans l'état de l'art actuel et sont difficiles à industrialiser car elles remettent en cause la structure même du bolomètre. La troisième option, que nous retenons, sera décrite plus en détails dans la section 3. Une quatrième option consiste à placer une matrice de filtres sous la fenêtre de boîtier du capteur. Cette dernière option ne permet pas de varier la réponse spectrale pixel à pixel pour des raisons optiques car la fenêtre est placée à une distance nécessairement grande

Figure 2. Quatre stratégies de réalisation de matrices bolométriques multispectrales consistant à intégrer un dispositif de sélection spectrale sous le bolomètre (a), sur le bolomètre (b), au-dessus du bolomètre à courte distance (c), ou sous la fenêtre du boîtier sous vide (d).



devant la taille des pixels. Elle a fait l'objet néanmoins d'une démonstration industrielle récente par la NASA et Leonardo DRS [2].

FILTRES INTÉGRÉS SUR PLAN FOCAL

La solution technique en développement au CEA-Léti consiste à suspendre un filtre métallique fin au-dessus de chaque bolomètre (Figure 2c). Les filtres appartiennent à la famille des surfaces sélectives en fréquences (acronyme FSS en anglais) bien connue dans le domaine micro-onde pour les radars

et les communications hertziennes. Des ouvertures résonantes quasi-périodiques dans un film métallique constituent un filtre passe-bande à la longueur d'onde de résonance (Figure 3). Dans notre cas, ces ouvertures sont des croix dont la longueur et la période sont dans la gamme de la demi-longueur d'onde (4-6 μm). Ces motifs ont été choisis car ils sont non polarisés optiquement et ils permettent de définir une bande passante de l'ordre de 2-3 μm dans la gamme LWIR (8-16 μm). Ils sont définis avec une lithographie standard et peuvent varier pixel à pixel. ●●●

LUMINANCE ET THERMOGRAPHIE

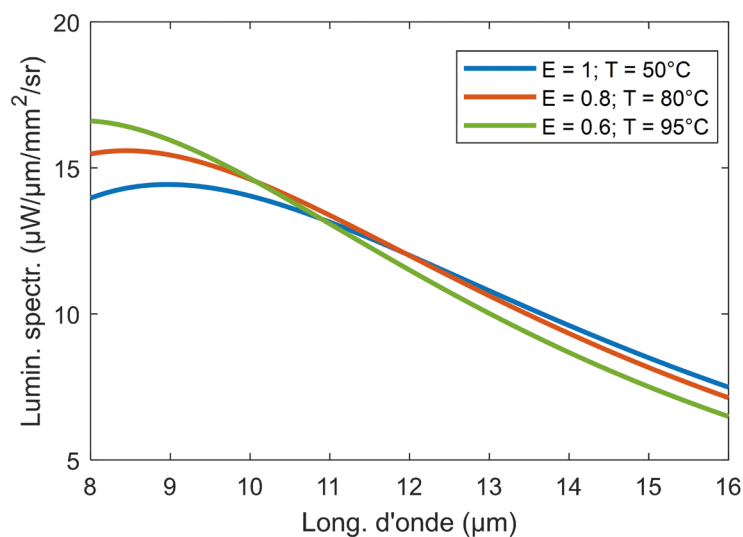


Figure. Luminance spectrale de trois objets de températures et émissivités différentes mais présentant une luminance totale identique sur la bande 8-14 μm .

La luminance propre d'un objet à une température T est le produit de son émissivité ϵ et de la luminance du corps noir à la température T . Le corps noir est un objet théorique dont la luminance est donnée par la loi de Planck. L'objet est donc caractérisé par deux grandeurs (T, ϵ). La Figure 5 présente la luminance spectrale de plusieurs objets d'émissivité et de température très différentes. Une caméra infrarouge classique ne sera pas capable de distinguer ces objets car ils ont la même luminance totale sur la gamme 8-14 μm . En revanche, une caméra multispectrale mesurant la luminance en plusieurs sous-parties de ce spectre permettra d'estimer les paramètres (T, ϵ) de chaque objet, donc de fournir une mesure plus précise de la température et d'estimer la nature du matériau. On parle alors de thermographie absolue et de séparation température-émissivité.



Lasers
pour applications
scientifiques, spatiales,
médicales, industrielles
et de défense

www.lumibird.com



LE SPÉCIALISTE
DES TECHNOLOGIES
LASER

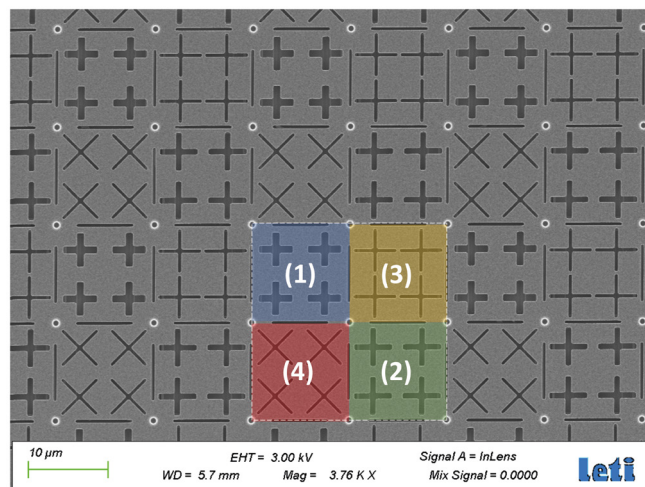
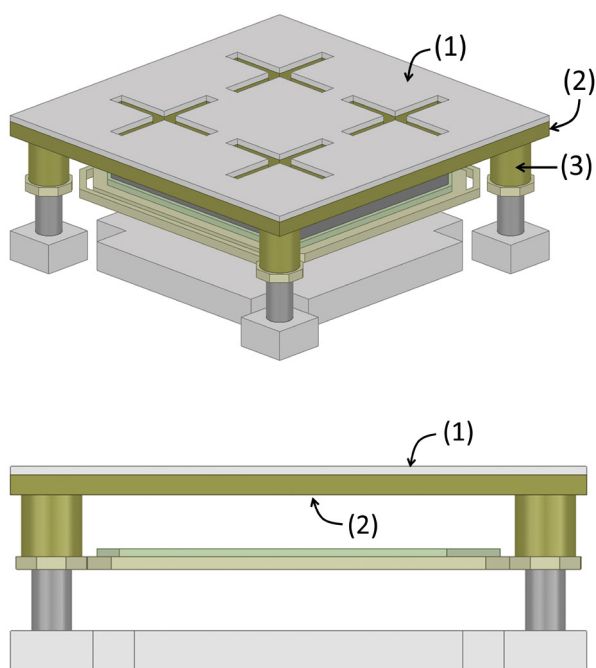


Figure 3. Vues simplifiées d'un bolomètre avec filtre : (1) filtre FSS, (2) couche de support, (3) piliers. Vue de dessus au microscope électronique à balayage (MEB) d'une partie de matrice multispectrale ; (1) à (4) désignent 4 pixels de bandes différentes constituant le motif périodique de la matrice.

Le film métallique est constitué d'aluminium et il est déposé sur une couche de silicium amorphe qui n'a pas de fonction optique mais contribue à la rigidité mécanique. La structure est en appui sur les piliers des bolomètres, ce qui permet à la fois d'avoir une grande densité de points d'appuis et de ne pas imposer un encombrement supplémentaire sur la puce. Ce type d'appui est un savoir-faire relativement unique dans le domaine et le fruit de plusieurs années de développement, les verrous en sont la tenue mécanique de la structure et l'intégrité des bolomètres situés en-dessous.

Cette solution présente deux avantages importants : elle repose sur des matériaux et procédés standards dans le monde industriel et elle permet de réaliser les différents filtres de la matrice avec un seul niveau de lithographie. La figure 3 présente un exemple de matrice dans laquelle quatre filtres différents sont intégrés et distribués en macro-pixels ($24 \times 24 \mu\text{m}^2$) de 4 pixels élémentaires ($12 \times 12 \mu\text{m}^2$ chacun).

Cette solution a été conçue pour la bande LWIR (8-16 μm) et mise en œuvre sur des matrices VGA (640×480 pixels) au pas de 12 μm , une taille de

pixel qui représente aujourd'hui une part significative du marché de l'imagerie IR. Nos premiers prototypes nous ont permis de démontrer des réponses spectrales et des performances électro-optiques en très bon accord avec nos modèles (Fig. 4) [3]. Une perspective possible est de la décliner sur une gamme spectrale

plus large, par exemple pour inclure la bande MWIR (3-5 μm).

APPLICATIONS ET PERSPECTIVES

Le prototype présenté ci-dessus est une preuve de concept de la technologie, il va permettre de tester son fonctionnement sur différents cas

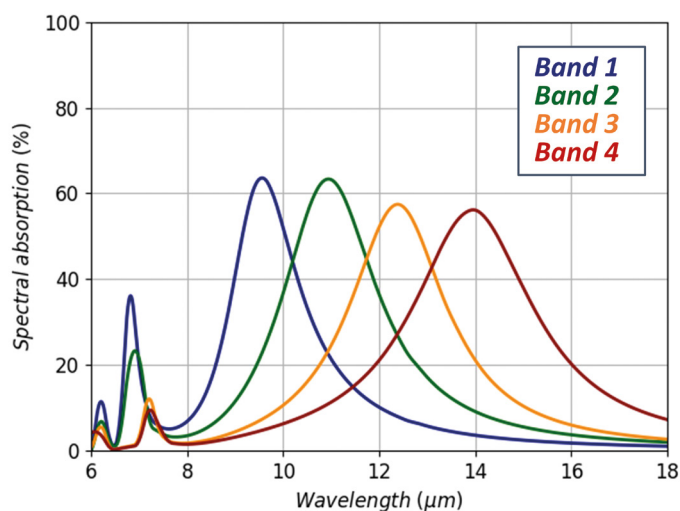


Figure 4. Réponses spectrales en absorption de bolomètres avec filtres FSS intégrés.

d'usages intéressant les partenaires du projet Brighter [4] dans le domaine de la thermographie absolue (Encart 1) avec un travail important sur les algorithmes associés. Ce nouveau type de capteur nécessite également des algorithmes dédiés de dématricage pour restituer une image de résolution et qualité optimales dans chaque bande spectrale.

La technologie d'intégration présentée ici est relativement versatile : elle offre de multiples perspectives d'évolutions, notamment sur l'élargissement de la gamme spectrale au moyen infrarouge et sur la conception de filtres dédiés à la détection de gaz. L'imagerie polarimétrique, utilisant des filtres polarisants, suscite également un grand intérêt pour l'analyse de scène.

Enfin, à ces technologies matérielles et ces modalités d'imagerie sont associées des technologies logicielles, dont l'intelligence artificielle, capables d'une grande capacité d'analyse automatique et de compréhension d'une scène [5].

CONCLUSION

L'imagerie multispectrale en gamme IR comprend de nombreuses applications dans les domaines de la thermographie, de la détection de gaz, de la surveillance ou des futurs véhicules autonomes. Nous avons développé et démontré une nouvelle technologie d'imageur holométrique multispectral en rupture avec les solutions commerciales existantes et qui peut conduire à des compromis de performance, compacité et coût très intéressants. Ces prototypes sont maintenant en phase de tests applicatifs au CEA et chez nos partenaires afin de qualifier leurs performances opérationnelles dans différents cas d'usage applicatifs. ●

REMERCIEMENTS

Ces activités sont co-financées par la société Lynred et le projet Brighter (KDT Joint Undertaking et Programme d'Investissement d'Avenir) [4].

RÉFÉRENCES

- [1] Jobert *et al.*, "Broadband uncooled microbolometers array unlocks new applications for midinfrared thermal imaging", Vol. 13904. SPIE, 2026
- [2] Schimert *et al.*, "Uncooled 2100×2048 focal plane array for NASA sustainable land imaging technology sensor", Vol. 13469. SPIE, 2025
- [3] Perrillat-Bottonet *et al.*, "12- μ m micro-bolometer Focal Plane Array with on-chip filters for multispectral LWIR imaging", Vol. 14023, SPIE, 2026
- [4] www.project-brighter.eu
- [5] Bao *et al.*, Nature **619.7971**, 743 (2023)



CHINA INTERNATIONAL
OPTOELECTRONIC EXPO

CIOE 2026

THE 27TH CHINA INTERNATIONAL OPTOELECTRONIC EXPOSITION

Powering Optical Innovations

September 9-11, 2026

Shenzhen World Exhibition & Convention Center

260,000M² Exhibition Area

150,000+ Visitors

4,000+ Exhibitors

Exhibit Profile

Optical Material
Optical Component
Optical Processing Equipment
Sapphire Processing & Application
Optical Film Component
Optical Coating Material
Optical Coating Equipment
Optical Lens
Camera Module
Camera
Camera Accessory
Camera Module Processing Equipment
Optical Measuring Instrument
Optical Imaging System
Machine Vision & Industrial Automation
Endoscope & Accessories
Telescope & Astronomical Photography

Colocated with



IICIE

INTERNATIONAL
INTEGRATED CIRCUIT
INNOVATION EXPO

elexcon



Contact Us on WhatsApp



Sign-up to Visit

#CIOE2026



BLACK SILICON ET IA POUR LA VISION À BAS NIVEAU DE LUMIÈRE

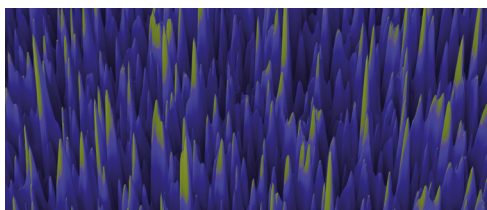
Esteban MONSALVO^{1,2}, Léo RUEFF^{1,3}, François ATTEIA¹, Ludovic ESCOUBAS^{1,*}

¹ 3L-OPTRONICS, Marseille, France

² Aix Marseille Univ, Université de Toulon, CNRS, IM2NP, Marseille, France

³ Aix Marseille Univ, Centrale Méditerranée, CNRS, Institut Fresnel, Marseille, France

*ludovic.escoubas@3l-optronics.com



<https://doi.org/10.1051/photon/202613846>

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

La texturation de surface du silicium, sous forme de Black Silicon, couplée à du traitement d'images par IA, est utilisée pour pousser les performances des imageurs en silicium et permettre la vision numérique à bas niveau de lumière. Dans cet article, nous montrons comment le Black Silicon appliqué aux imageurs permet de mieux capter le spectre du visible jusqu'au proche infrarouge. L'article décrit les résultats de texturation Black Silicon, de modélisation et de traitement d'images par réseaux de neurones pour réhausser et débruiter en vision à bas niveau de lumière.

La vision de nuit ou plus généralement la vision à bas niveau de lumière repose sur un ensemble de technologies plus ou moins anciennes plus particulièrement développées pour le domaine de la défense. On peut citer entre autres les jumelles de vision de nuit qui utilisent un intensificateur de lumière mais restent analogiques, sans possibilité de transmission des images obtenues (seul le porteur des jumelles voit les images). Elles équipent une grande partie des forces armées de nos jours. Les détecteurs à base de matériaux semiconducteurs III-V tels que l'In-GaAs permettent de réaliser des capteurs d'images fonctionnant dans le SWIR (Short Wave InfraRed – entre 1

et 2 microns de longueur d'onde). Les détecteurs à base de HgCdTe sont, quant à eux, sensibles dans l'infrarouge thermique dans les bandes 3 – 5 microns (MWIR – Medium Wave InfraRed) et 8 - 12 microns (LWIR – Long Wave InfraRed). Ces technologies militaires très performantes restent onéreuses car complexes à mettre en œuvre industriellement et souffrent également de résolutions d'images faibles. C'est ce qui explique pourquoi elles restent principalement utilisées pour la défense et pour le spatial. Les matrices de microbolomètres (membranes sensibles de type MEMS – Micro-ElectroMechanical Systems) permettent aussi de réaliser de l'imagerie dans l'infrarouge thermique, à moindre coût, mais souffrent également d'une faible

résolution. Une partie de ces technologies trouve aussi des applications dans le domaine civil, par exemple dans le secteur automobile pour les microbolomètres avec l'ADAS (Advanced Driver Assistance System).

L'industrie microélectronique, avec des acteurs majeurs comme Samsung, Sony, STMicroelectronics, TSMC, a développé depuis le début des années 2000 des imageurs à base de silicium en technologie CMOS. Ils présentent aujourd'hui les avantages d'une très grande résolution (plus de 200 Mpixels avec des tailles de pixels submicroniques) et de coûts de fabrication faibles et fiabilisés en raison de leur production en volume par exemple pour l'industrie du téléphone mobile avec plus d'1,3 milliards de téléphones vendus par an,

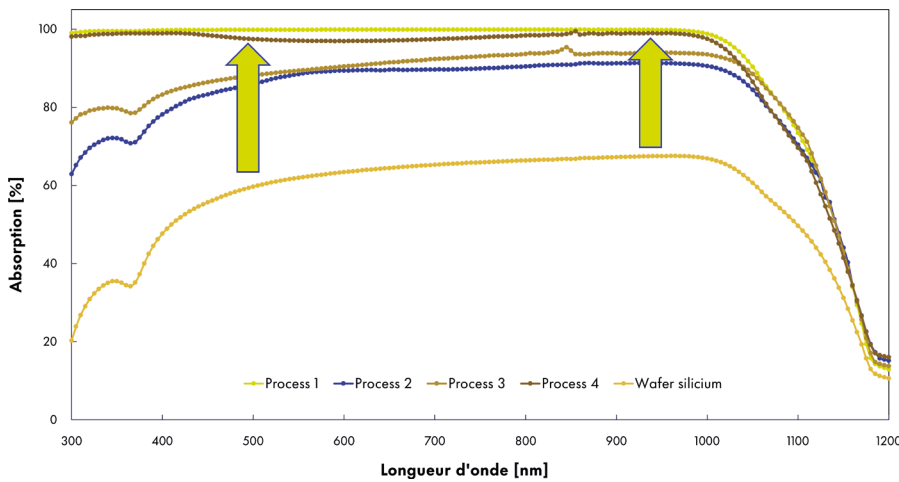


Figure 1. Courbes d'absorption spectrale du black silicon sur wafer avec 4 jeux de paramètres de process et comparaison à l'absorption d'un wafer de silicium nu [2].

comprenant chacun plusieurs imageurs en silicium.

Dans cet article, nous expliquons comment il est possible de donner des capacités de vision à bas niveau de lumière à des imageurs CMOS en silicium pour répondre à des besoins dans les domaines de la défense mais aussi civils dans l'automobile, le spatial, l'industrie, le médical, le scientifique, ...

LE BLACK SILICON : L'ANTIREFLET ULTIME

Le Black Silicon (BS) est obtenu par une texturation aléatoire de la surface du silicium. La littérature est extrêmement fournie sur le BS car il peut être obtenu par différents procédés :

- tirs lasers dans une vapeur soufrée, lors de sa découverte, il y a plus de 25 ans, par l'équipe d'Eric Mazur à l'Université d'Harvard [1]
- gravure chimique humide avec catalyseur métallique
- gravure sèche par plasma à basse température ou même à température ambiante.

Chaque procédé conduit à un BS dont les nanostructures diffèrent en termes de morphologie, de densité et de caractéristiques géométriques. Du point de vue des propriétés optiques, le BS est un antireflet qui se comporte comme une couche homogène d'indice de réfraction graduellement

croissant entre celui de l'air et celui du silicium. Une de ses caractéristiques les plus importantes est son caractère aléatoire ce qui donne à cet antireflet des performances exceptionnelles :

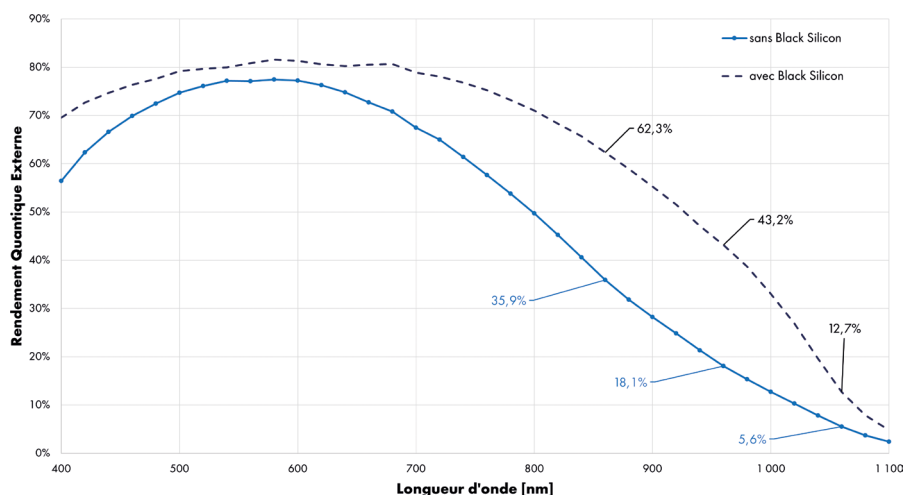
- à la fois efficace (généralement en dessous du pourcentage de réflexion) sur une très large gamme de longueurs d'onde : du visible au proche infrarouge (Near InfraRed – NIR et même jusqu'au SWIR, MWIR et LWIR en adaptant les tailles des nanostructures)
- et présentant une très large acceptance angulaire jusqu'à plus de 50° d'incidence.

Ce sont ces propriétés qui donnent au BS cette couleur noire si particulière, même en incidence ou en lumière diffuse.

Nous avons développé un procédé breveté qui permet de réaliser du BS par un procédé de gravure sèche par plasma. Ce procédé a été conçu pour pouvoir traiter industriellement à vitesse élevée de grandes surfaces de silicium - jusqu'à des wafers de 8 pouces dans nos installations et 12 pouces chez des fondeurs en microélectronique - sur lesquels ont préalablement été fabriqués des imageurs CMOS. Le traitement BS est exclusivement réalisé sur la matrice de pixels, en remplacement des couches antireflet qui sont habituellement déposées en surface. Il est optimisé en termes de paramètres statistiques des nanostructures (longueur de corrélation, distribution des hauteurs) pour que la performance de l'antireflet soit maximale pour les longueurs d'onde du visible et du proche infrarouge et pour toutes les incidences. Dans le NIR, le BS diffuse la lumière dans le volume du pixel maximisant ainsi l'interaction optique avec le matériau et donc son absorption. Ainsi l'ensemble de ces rayonnements est absorbé à plus de 99% dans le silicium (Figure 1).

La texturation de la surface du silicium par gravure plasma ●●●

Figure 2. Efficacité quantique d'un imageur CMOS traité black silicon comparée à celle de l'imageur identique de référence sans black silicon.



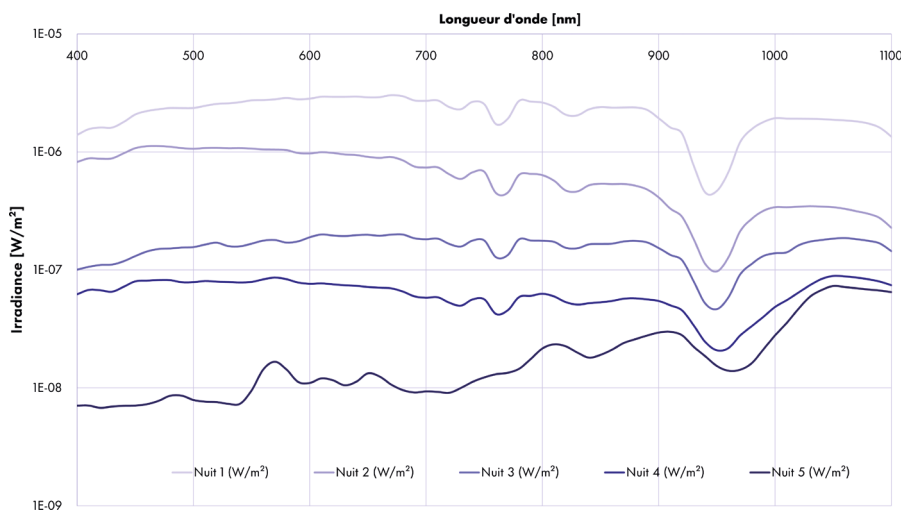


Figure 3. Courbes d'éclairement spectral en niveau de nuit [3]

peut cependant créer des défauts (défauts d'interfaces recombinants) pour les charges photogénérées par absorption des photons et conduire à augmenter les bruits électroniques dans les imageurs traités BS. Le courant d'obscurité de l'imageur peut ainsi être affecté négativement. Nous avons cependant développé un savoir-faire breveté qui permet de passiver électroniquement la surface du BS et de conserver un faible courant d'obscurité.

Le BS, en permettant une absorption maximale des photons dans le visible et le NIR et leur conversion particulièrement efficace en charges

collectées dans l'imageur, accroît très fortement l'efficacité quantique de l'imageur (Figure 2), jusqu'à plus de $\times 2$ dans le NIR.

Comme le rayonnement de la nuit est constitué d'une partie du spectre visible, certes faible, et d'une partie relativement importante dans le NIR (Figure 3), le BS confère ainsi des capacités d'imagerie de nuit, à bas niveau de lumière, aux imageurs en silicium.

Dans la suite de l'article, nous précisons comment nous modélisons les

propriétés optoélectroniques du BS pour affiner les paramètres de procédé de réalisation. La dernière partie de l'article montrera comment il est possible de coupler aux imageurs des codes de rehaussement et de débruitage des images pour permettre l'imagerie à des niveaux de lumière encore plus bas.

LA MODÉLISATION OPTOÉLECTRONIQUE : UNE MÉTHODE PRÉDICTIVE DES PERFORMANCES D'UN IMAGEUR

Au sein de l'industrie microélectronique, les coûts prohibitifs de développement et d'intégration de nouveaux procédés tendent à figer les architectures de pixels, privilégiant la rentabilité des lignes de production. Toutefois, cette contrainte stratégique se révèle comme un atout majeur dans la démocratisation du BS pour la vision à bas niveau de lumière puisqu'il ne nécessite aucune modification du procédé de fabrication de base des imageurs. Dans cette optique, la modélisation des performances optoélectroniques devient un levier primordial permettant d'évaluer la compatibilité technologique avec l'architecture du pixel et estimer le gain de performance apporté par la texturation de surface aléatoire du silicium.

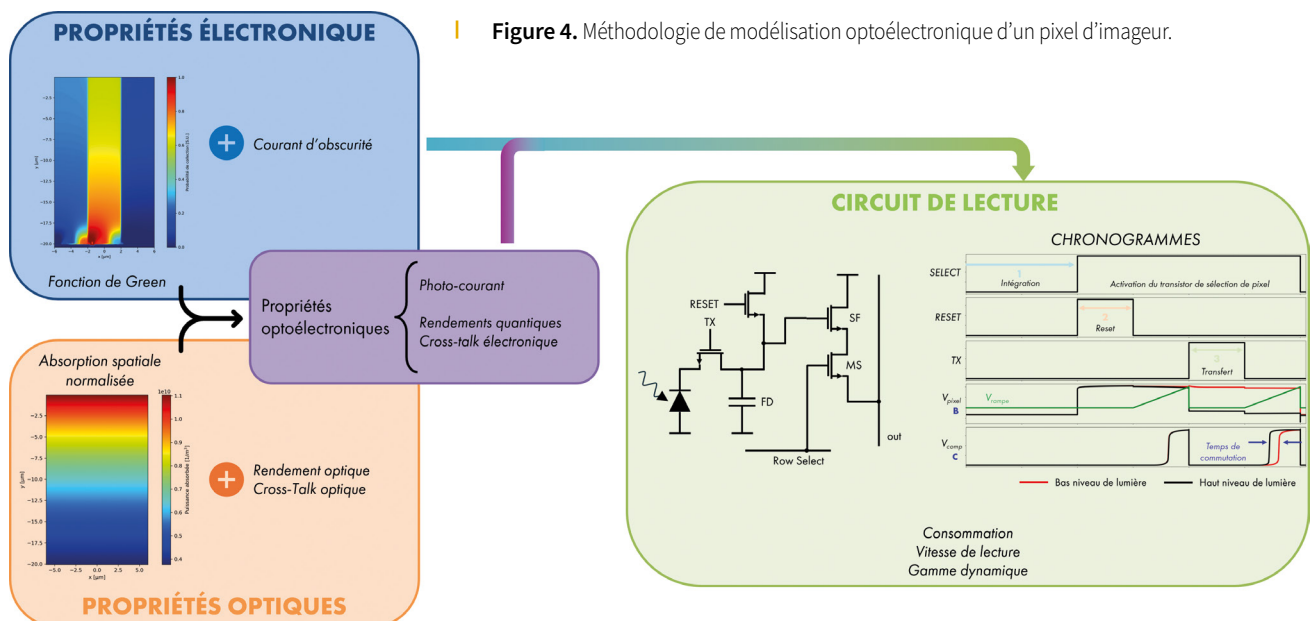


Figure 4. Méthodologie de modélisation optoélectronique d'un pixel d'imageur.

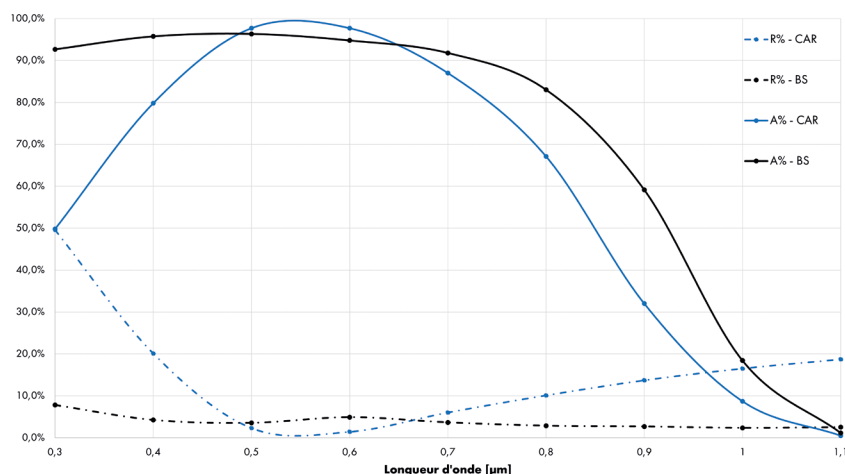


Figure 5. Comparaison des absorptions et réflexions spectrales d'un pixel d'imageur (épaisseur de Si = 10 μm) recouvert soit d'un anti-reflet couches minces (CAR), soit de black silicon (BS).

De la même manière que pour concevoir un pixel d'imageur, la modélisation optoélectronique se décompose en deux champs d'expertise : une expertise photonique par l'étude de la propagation de la lumière dans le dispositif et une expertise électronique par l'analyse de l'acquisition du signal électrique. En effet, les simulations photoniques permettent d'observer l'interaction entre la lumière et la matière, et en particulier la génération d'électrons par effet photo-électrique, alors que les simulations électroniques examinent la probabilité de collection de ces charges par le dispositif. La modélisation optoélectronique consiste alors à coupler les propriétés optiques, comme l'absorption et le cross-talk optique, avec les propriétés électroniques, en particulier la probabilité de collection des charges, afin de déterminer les propriétés optoélectroniques, comme les rendements quantiques internes et externes et le cross-talk électronique.

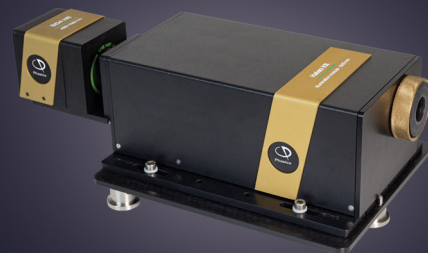
Nous avons développé nos propres modèles à l'aide d'outils commerciaux de simulation et évalué la valeur ajoutée du BS dans différentes architectures de pixels au travers des nombreuses métriques explicitées (Figure 4).

La base de ces modèles repose sur la capacité à modéliser des surfaces rugueuses aléatoires fidèles aux caractéristiques de rugosité du BS. Bien que la gravure permettant d'obtenir le BS

soit aléatoire, la texturation résultante répond à des statistiques de rugosité en termes de hauteur H et de longueur de corrélation L_c . Le logiciel de simulation photonique utilisé dans la méthode de modélisation optoélectronique permet de générer des surfaces rugueuses aléatoires selon trois paramètres [4]: σ_{RMS} qui représente l'écart-type moyen de la hauteur des structures, L_c qui est la longueur de corrélation spatiale, et δ pour l'échantillonnage spatial numérique de la surface. En jouant sur ces réglages, il est possible d'obtenir une surface ayant des propriétés optiques semblables au BS intégré dans des capteurs d'images et de comparer ses propriétés de réflexion et d'absorption spectrales à d'autres technologies d'anti-reflet, comme les couches minces (Figure 5).

En cohérence avec les résultats expérimentaux obtenus, le développement de cette méthodologie de modélisation optoélectronique montre que le BS permet d'améliorer le rendement quantique externe d'un pixel d'imageur, c'est-à-dire sa capacité à convertir les photons en électrons et à collecter ces charges, de l'ultraviolet jusqu'au proche infrarouge.

Le circuit de lecture de l'imageur permet de restituer l'image à l'utilisateur. À partir des résultats issus des simulations photoniques et électroniques, il est possible de déterminer l'amélioration des caractéristiques de fonctionnement ●●●



MWIR & LWIR wavefront sensing for optics testing



Wavefront and MTF
for any optical system



Tailored modules for
your requirements



Factory & workshop-
ready solutions

de ce circuit, pour l'imageur intégrant du BS, en termes de vitesse de lecture, de consommation et de gamme dynamique.

QUAND L'IA ENTRE EN JEU

Nous avons développé des architectures de réseaux de neurones optimisés, capables de traiter les flux de données brutes en temps réel, en s'adaptant aux contraintes strictes des supports embarqués (NVIDIA Jetson, Raspberry Pi, FPGA, etc.). Pour les besoins des marchés adresses - défense, spatial et automobile en particulier - cette démarche s'inscrit dans la thématique d'« IA frugale », qui vise à concevoir des modèles d'intelligence artificielle sobres en termes de données, de calcul et de consommation énergétique, tout en conservant des performances adaptées à une application donnée.

En injectant une image dans un réseau profond optimisé, l'architecture du modèle permet d'isoler l'information pertinente avec précision, garantissant une restauration du signal brut supérieure aux méthodes de filtrage conventionnelles. In fine, l'algorithme ajuste le rendu ou applique les corrections nécessaires en s'appuyant sur un ensemble de paramètres — les poids — rigoureusement calibrés durant la phase d'apprentissage.

Les performances des réseaux de neurones, particulièrement en vision par ordinateur, reposent essentiellement sur la qualité des images et des vidéos utilisées lors de l'entraînement. Ces données doivent être acquises en très grande quantité (plusieurs milliers d'images/trames vidéos) et représenter des scénarios réalistes d'utilisation d'une caméra.

Afin de guider un entraînement supervisé de réseau de neurones de rehaussement ou de débruitage, il est nécessaire d'avoir des images ou vidéos sous forme de paires (*paired data*). Chaque image « Nuit » (scène nocturne, bruitée) doit être associée à une image « Jour » de référence, dite « vérité terrain » (*ground truth*). C'est

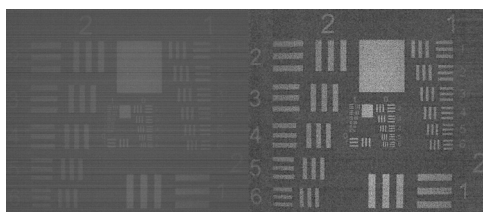


Figure 6. Comparaison entre une image d'une mire USAF 1951 d'un capteur de référence (gauche) et celle d'un capteur BS avec traitement d'image (droite).

ce couplage qui permet de guider le réseau durant l'entraînement ; il apprendra à passer d'une image sombre et/ou bruitée à une image claire et/ou débruitée. Ces données sont organisées en bases de données (ou *data-sets*), en libre accès ou non et nous avons fait le choix de construire nos propres bases de données.

Un dispositif adapté d'enregistrement de bases de données garantit une parfaite cohérence entre les données d'acquisition et les conditions opérationnelles réelles. En respectant la physique du bruit propre à l'imageur en basse luminosité, le jeu de données ainsi constitué permet une calibration spécifique de l'apprentissage des réseaux de neurones, assurant ainsi des performances optimales. L'association de la technologie BS et du traitement d'image permet d'étendre les capacités d'un capteur en conditions de très faible luminosité. Les images traitées (Figure 6) présentent un meilleur rapport signal sur bruit (19,72dB pour l'image du capteur de référence contre 21,19dB

pour l'image traitée du capteur BS) et une meilleure qualité d'image au global.

Ce couplage hardware et software permet d'optimiser le signal à chaque étape de la chaîne d'acquisition. Cette approche hybride augmente à la fois la qualité de la visualisation et accroît l'efficacité des traitements d'image additionnels pour la détection, la reconnaissance ou la segmentation. Les enjeux technologiques sont donc majeurs, et ouvrent la voie à un large éventail d'applications.

CONCLUSION

Disposer de capacités numériques de vision à bas niveau de lumière, reposant sur des technologies que l'on peut positionner à l'échelle industrielle et pour lesquelles des perspectives de production en volume existent, est un enjeu majeur pour nombre de domaines civils – automobile, médical, industrie, spatial – et pour la défense. Nous avons fait le choix de combiner un procédé qui transforme, à l'échelle nanométrique, le matériau de choix de l'industrie microélectronique – le silicium – avec du traitement d'image pour répondre à cette demande. Dans le futur, l'embarquabilité des algorithmes permettant le rehaussement de contraste, le débruitage et des fonctions plus évoluées de détection, reconnaissance et identification, au plus près du capteur d'image ou directement dans les circuits CMOS (« Edge computing ») permettront d'accroître les performances et l'autonomie énergétique des systèmes d'imagerie. ●

RÉFÉRENCES

- [1] C. Wu *et al.*, Appl. Phys. Lett. **78**, 1850 (2001), doi:10.1063/1.1358846
- [2] F. Atteia *et al.*, Mater. Res. Bull. **131**, 110973 (2020), doi:10.1016/j.materresbull.2020.110973
- [3] T. Midavaine, Imagerie à bas niveau de lumière - Fondamentaux et perspectives, Opt. Photonique (2012), doi:10.51257/a-v1-e6570
- [4] S. Ma *et al.*, AIP Adv. **8**(3), 035010 (2018), doi:10.1063/1.5018642
- [5] Bao, *et al.*, Nature **619.7971**, 743 (2023)



Make it EPIC!

In Photonics We Unite,
In Europe We Thrive

UN BAC PROFESSIONNEL POUR LES FUTURS TECHNICIENS EN PHOTONIQUE

Ivan TESTART^{1,*}, Karine REITTER², Christofer KÜHL², Violaine LALBA³, Franck BARRO⁴, Ludovic LESCIEUX⁵

¹ Photonics France, ² Ministère de l'Éducation nationale, ³ Thales, ⁴ Lycée International de Palaiseau, ⁵ PYLA-ALPhANOV

*contact@photonics-france.org



Le bac professionnel « Optique Photonique : Technologies de la Lumière », créé par le ministère de l'Éducation nationale sous l'impulsion de Photonics France, est mis en place depuis la rentrée 2024. Il est maintenant implanté dans de nombreux lycées professionnels et ses premiers diplômés devraient sortir à l'été 2027. Retour sur les grandes étapes de sa création.

<https://doi.org/10.1051/photon/202613852>

Dès 2018, les entreprises de la photonique ont manifesté leurs besoins croissants en recrutement d'ingénieurs, de techniciens et d'opérateurs. Le projet « EDEC Photonique et Électronique », mené avec le Ministère du Travail et de l'OPCO 2i (Opérateur de compétences inter-industriel) a permis d'identifier à l'échelle nationale les besoins et les freins en recrutement par niveaux de diplômes. Les besoins annuels ont été estimés à environ 2000 recrutements d'opérateurs et techniciens et autant en ingénieurs et ingénieurs commerciaux.

COMPLÉTER L'OFFRE DE FORMATION EN PHOTONIQUE

La filière n'avait, jusqu'à présent, aucune offre de diplôme de niveau 4, correspondant au bac professionnel. Les entreprises recrutaient des diplômés à bac +2/3 pour combler leurs besoins sur les métiers d'opérateurs. Pour faire face à cette lacune, Photonics France a sollicité le ministre de

l'Éducation nationale en mars 2020. Sur la base d'un dossier d'opportunités proposé par Photonics France, le ministère a créé un groupe paritaire – éducation nationale et industriels – pour construire le référentiel de compétences. Grâce à ce travail collectif un nouveau Bac Pro a été conçu.

Le paysage éducatif français en photonique est riche et diversifié. On compte une centaine de formations en photonique. Le nouveau Bac Pro "Optique Photonique : Technologies de la Lumière", est venu compléter l'offre en proposant une formation dès la classe de seconde. Ce cursus de trois ans inclut 20 semaines de formation en milieu professionnel, offrant aux élèves une

Chiffres clés de la filière photonique en France.



expérience pratique et une immersion dans le monde professionnel.

Le nouveau bac pro formera les futurs techniciens et opérateurs de niveau 4 en charge de la fabrication, de l'assemblage-réglage, de la mise en œuvre et de la maintenance de composants et systèmes photoniques. A long terme, la formation spécifique du bac pro renforce la visibilité et donc l'attractivité de la filière. C'est un levier de recrutement pour les formations bac +2/+3, en particulier le BTS Photonique qui a été rénové.

DES OUVERTURES PROGRESSIVES

Annoncé par décret en février 2023, la création du diplôme a ensuite nécessité des sollicitations par Photonics France auprès des recteurs des académies qui décident des ouvertures de classe et des régions qui financent les plateaux techniques dans les lycées, avec le soutien des entreprises et des acteurs régionaux de la formation. Ce travail est toujours en cours dans certaines académies qui n'ont pas encore de classe de bac pro.

Quatre lycées ont ouvert cette formation dès 2024 : Félix Le Dantec à Lannion, Victor Bérard à Morez, Alfred Kastler à Talence et Edouard Branly à Châtelleraut. Deux autres lycées ont suivi en 2025 : le lycée International de Palaiseau et le lycée Edouard Branly à Lyon, cette fois en classes entières de 24 élèves. Ces formations se sont remplies dès la première année.

Rendez-vous est donné pour la rentrée 2026 ! D'autres formations sont en préparation en 2026 : bac pro à la nouvelle École de production iXcampus et formation d'opérateurs / techniciens adaptée à Saint-Étienne), avec l'ambition d'arriver à une douzaine de classes d'ici cinq ans. Ce déploiement massif vise non seulement à répondre aux besoins croissants du secteur en main-d'œuvre qualifiée, mais aussi à offrir aux jeunes de nouvelles opportunités d'orientation vers des métiers d'avenir dans la photonique. À l'horizon 2028 se sont plus de 300 techniciens diplômés qui pourront s'épanouir dans les différentes branches des entreprises de la filière Photonique.

L'épopée des bacs pro Optique Photonique, encore à ses débuts, s'annonce



I Inauguration des plateformes techniques du lycée Edouard Branly à Lyon (5 février 2026).

riche de promesses. Rappelons que les premiers bacheliers seront diplômés en 2027 puisque les jeunes commencent ce « bac pro » en seconde ! Elle illustre comment un partenariat entre

des acteurs engagés - Photonics France et son réseau d'adhérents, les professionnels de la formation initiale et continue, ainsi que les institutions comme le ministère de l'Éducation, le ministère ●●●

OUVERTURE DÈS 2024 POUR LE LYCÉE EDOUARD BRANLY DE CHÂTELLERAUT

Le baccalauréat professionnel Optique Photonique du lycée Edouard Branly de Châtelleraut a été lancé en 2024. À la suite, la signature d'un partenariat a été mise en place avec le site Thales La Brelandière. Cette collaboration s'inscrit dans une volonté commune de développer les compétences dans un domaine stratégique et de renforcer l'attractivité des métiers de la photonique auprès des jeunes.

Thales s'engage activement pour accompagner le développement du bac professionnel. Leurs équipes participent depuis 3 années consécutives aux journées portes ouvertes du lycée pour présenter la filière, les débouchés professionnels ainsi que les produits de la photonique, en lien avec les enseignements. Cet événement est un moment clé dans l'orientation des élèves.

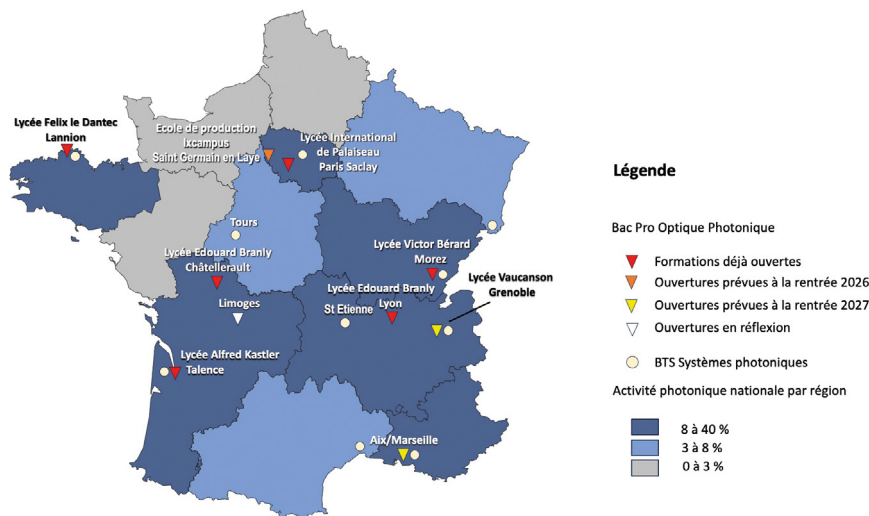
Les enseignants de la filière sont régulièrement accueillis sur le site de Thales pour renforcer leurs compétences techniques et se familiariser avec les équipements et pratiques industrielles. Cet accompagnement de proximité garantit un complément de formation en adéquation avec les besoins de notre secteur.

Thales accueille également, à chaque période de stage, deux élèves du bac pro. Un parcours structuré a été mis en place pour leur permettre de découvrir les différents métiers en lien avec leur formation, comprendre les environnements de travail et évoluer dans des conditions proches de la réalité industrielle. Ce partenariat permet une collaboration entre le monde éducatif et l'industrie pour permettre la formation des profils de demain dans des domaines de la photonique.



Signature du partenariat entre le lycée Edouard Branly et Thales à Châtelleraut.

du Travail, l'OPCO2i et les rectorats - peut dynamiser l'offre de formations, au bénéfice tant des jeunes que des entreprises. Il reste néanmoins plusieurs défis : recruter et former des enseignants, attirer les jeunes du collège vers cette nouvelle formation, engager les entreprises à accueillir les élèves pendant les périodes de stages. Nos associations et les acteurs de l'éducation nationale s'y emploient et les entreprises doivent davantage s'engager et prendre leurs responsabilités d'employeurs ou de futurs employeurs. Au-delà de la création du bac pro, ce partenariat permettra de garantir une évolution continue de la formation en adéquation avec celles des techniques de l'optique photonique et des besoins industriels.



I Ouverture des formations bac pro en France.

LE LYCÉE INTERNATIONAL DE PALAISEAU OUVRE SON BAC PRO EN 2025



Inauguration de la filière bac pro au lycée international de Palaiseau (septembre 2025).

Le bac professionnel a ouvert au Lycée International de Palaiseau Paris Saclay (LIPPS) en septembre 2025. Le LIPPS a également accueilli le BTS Photonique Technologie de la lumière, situé auparavant au lycée Fresnel à Paris. L'objectif est de créer sur la technopole de Paris Saclay une filière d'enseignement complète de Bac-3 à Bac+8 avec l'IOGS et l'IUT mesures Physiques, les deux faisant partie de l'Université Paris Saclay avec la faculté des Sciences. Au-delà de l'écriture du programme piloté par l'Inspection générale, quatre phases furent essentielles avant l'ouverture du bac pro :

- L'adaptation des locaux : ouvert en 2021, le LIPPS n'avait pas vocation à accueillir de l'enseignement professionnel et encore moins industriel. Des réorganisations des locaux ont été nécessaires. Tous les espaces dédiés à la filière Optique Photonique seront prêts pour la rentrée 2026.

- L'équipement des supports pédagogiques : la Région Ile-de-France a débloqué des sommes conséquentes pour permettre au lycée d'acquérir les supports pédagogiques adaptés. Nous cherchons à mutualiser les supports bac pro et BTS pour être au plus près des réalités industrielles. Les entreprises jouent un rôle essentiel à cette étape pour faire travailler nos élèves sur des supports actualisés.
- Le recrutement et la formation des enseignants : les enseignants viennent d'horizons et de spécialités diverses du génie mécanique à l'électronique, de la physique à l'ingénierie optique. La technopole et les différentes composantes de l'Université Paris Saclay ont organisé des sessions de formation à partir de juin 2025, nécessitant également un immense investissement des enseignants.
- La communication envers les collégiens et leurs familles : il est nécessaire de promouvoir cette formation industrielle à l'aide des entreprises, notamment en prenant des élèves en stage et en communiquant sur cette expérience.

Photonics France et l'Éducation nationale se sont particulièrement mobilisés pour compléter une offre de formation par la création de ce nouveau bac pro. Malgré les défis quotidiens, nous éprouvons une grande fierté d'être entrés dans cette aventure. Nous devons mobiliser nos partenaires et travailler ensemble dans l'objectif commun de fournir de formidables débouchés pour nos élèves, quels que soient leurs appétences scolaires ou leurs talents, afin de servir l'innovation industrielle de la France et de l'Europe.

LUMIFORM 2030 : UN PROJET NATIONAL POUR RENFORCER LA FORMATION EN PHOTONIQUE

LUMIFORM

Le projet LUMIFORM, porté par ALPhANOV en partenariat avec Photonics France, la Société Française d'Optique, le CMQe Numérique Photonique et Cybersécurité de Bretagne, ainsi que les industriels Oxixus, SEDI ATI Fibres Optiques, Lynred et THALES répond à un enjeu majeur pour la filière photonique : le manque de techniciens et d'opérateurs qualifiés. Technologie stratégique au cœur de nombreux secteurs industriels, la photonique connaît une forte croissance, mais se heurte à un déficit structurel de compétences. Les métiers restent encore peu visibles, les formations manquent d'attractivité et les enseignants doivent être accompagnés lors de la création de formations et pour intégrer des technologies en constante évolution.

Face à ce constat, LUMIFORM propose une approche globale et coordonnée à l'échelle nationale. Le projet vise à renforcer et déployer les formations en photonique du Bac au Bac+3, en lien étroit avec les besoins des industriels. Il accompagne également la montée en compétence des enseignants grâce à des dispositifs de formation dédiés et au développement d'outils pédagogiques innovants, tels que la réalité virtuelle, les simulateurs optiques ou les kits expérimentaux.

Enfin, LUMIFORM porte une ambition forte en matière d'attractivité, avec des actions de communication et de sensibilisation destinées à faire connaître les métiers et à susciter des vocations auprès des jeunes.

À horizon 2030, le projet contribuera à structurer durablement la filière, à répondre aux besoins en compétences de l'industrie et à renforcer la compétitivité et la souveraineté technologique françaises.



Avec le soutien financier de France 2030.

[FOCUS] RÉFÉRENTIEL DE COMPÉTENCES DU BAC PROFESSIONNEL

Le référentiel du Bac Pro Optique Photonique est conçu pour initier les élèves aux principes fondamentaux de l'optique et de la photonique, tout en leur permettant de maîtriser des compétences techniques adaptées aux besoins industriels.

Les principales thématiques abordées :

- Procédés de fabrication et d'assemblage en optique de précision.
- Réglage et contrôle de systèmes.
- Installation et mise en œuvre de composants.
- Maintenance de système.
- Développement durable.

Les compétences visées par le Bac pro s'articulent autour de quatre grands

pôles d'activité, chacun correspondant à un bloc de compétences spécifiques (Voir figure). Ces pôles couvrent l'ensemble du cycle de vie des composants et systèmes optiques photoniques, de leur fabrication à leur maintenance.

Avec son implantation dans des régions stratégiques, le Bac Pro « Optique Photonique : Technologies de la Lumière » entend également jouer un rôle majeur dans le dynamisme économique local. En favorisant le développement d'une main-d'œuvre qualifiée et en incitant les jeunes à se tourner vers des métiers d'avenir, cette formation constitue une réponse concrète aux besoins de recrutement des entreprises du secteur, tout en valorisant le savoir-faire français dans les technologies de pointe. ●

PYLA

TRAINING CENTER by ALPhANOV

Immersive Photonics Lab
Laser safety: beams management



The Immersive Photonics Lab is a virtual reality application to learn procedural skills in photonics

The **Laser Safety VR module** offers three levels of difficulty to help learners acquire **best practices** and gestures for **safely managing** a laser beam.

For whom is this module designed?



- ✓ Engineers, technicians and operators
- ✓ Researchers and staff from research laboratories
- ✓ High school and University students
- ✓ Laser safety trainers in training centers

With virtual reality, adopt the right technical gestures



In complete autonomy

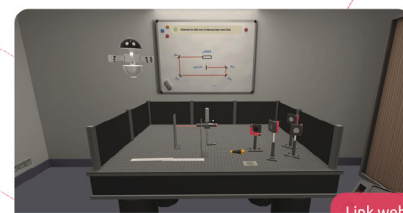


In any location



With no hardware other than a virtual reality headset

Ask for a free trial:
contact@pyla-formation.com



Virtual reality photonics laboratory

Link website:

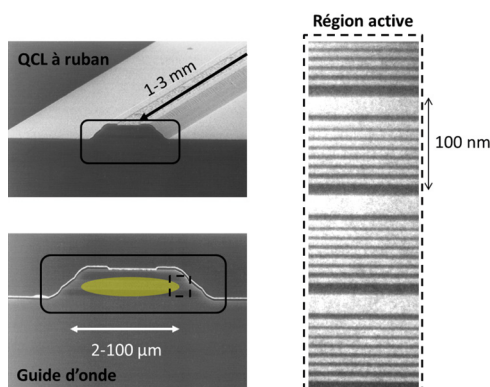


LES LASERS À CASCADE QUANTIQUE

Angela VASANELLI*, Carlo SIRTORI

Laboratoire de Physique de l'ENS, Université Paris Cité, Ecole normale supérieure, Université PSL, Sorbonne Université, CNRS, 75005 Paris (France)

*angela.vasanelli@phys.ens.psl.eu



Les lasers à cascade quantique sont des sources de lumière cohérente qui émettent dans une bande spectrale très large : de l'infrarouge moyen jusqu'aux THz. Ils exploitent des transitions entre niveaux électroniques issus du confinement spatial dans des puits quantiques de semiconducteur. Cet article présentera les principes de fonctionnement des lasers à cascade quantique, notamment l'ingénierie des structures de bande de la région active, permettant de réaliser l'inversion de population.

<https://doi.org/10.1051/photon/202613856>

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

Les lasers à cascade quantiques (QCLs) ont été démontrés pour la première fois en 1994 aux Laboratoires Bell de la compagnie américaine de téléphone AT&T [1,2]. Ils exploitent des transitions optiques entre états confinés de la bande de conduction d'un système de puits quantiques de semiconducteur couplés par l'effet tunnel. Le QCL est en conséquence un dispositif unipolaire, qui emploie uniquement les électrons pour son fonctionnement. À la différence des autres lasers à semiconducteurs, la longueur d'onde d'émission des QCLs n'est pas fixée par la bande interdite du semiconducteur, mais elle est

essentiellement déterminée par le profil de potentiel électronique issu de la séquence de puits quantiques couplés. La conception de ces potentiels, connue comme « ingénierie des structures de bande », donne lieu à des matériaux artificiels et elle est au cœur de la physique des QCLs. Grâce à l'ingénierie des structures de bandes, il est possible de réaliser des QCLs avec longueur d'onde d'émission sur deux décades du spectre électromagnétique ($3 \mu\text{m} < \lambda < 300 \mu\text{m}$), en utilisant toujours les mêmes matériaux semiconducteurs de base. Les principaux systèmes de matériaux utilisés aujourd'hui pour réaliser des QCLs sont InGaAs/AlInAs sur substrat InP pour l'infrarouge moyen et GaAs/AlGaAs sur substrat

GaAs pour le THz. Ces systèmes de matériaux semiconducteurs ont l'avantage de bénéficier de techniques de croissance et de procédés de fabrication très matures, qui ont été développés pour les technologies des télécommunications.

L'objectif de cet article est de présenter le principe de fonctionnement des QCLs [3]. Pour réaliser un QCL, comme tout autre laser, il faut deux éléments de base : un milieu à gain et un résonateur optique. Les résonateurs optiques utilisés pour les QCLs sont généralement similaires à ceux employés pour réaliser les diodes lasers, notamment les Fabry-Perot en ruban (comme dans l'image en début d'article) pour un fonctionnement multi-mode, ou les lasers à

contre-réaction distribuée, pour un fonctionnement mono-mode. En revanche, la conception et les propriétés de la région active sont singulières et propres à ce dispositif unipolaire, et seront présentées par la suite. Nous discuterons en premier lieu de comment l'ingénierie quantique des structures de bande permet d'obtenir du gain. Dans un deuxième temps, nous dériverons les équations de bilan, qui permettent de retrouver les caractéristiques du laser. Nous présenterons ensuite le rôle du schéma en cascade.

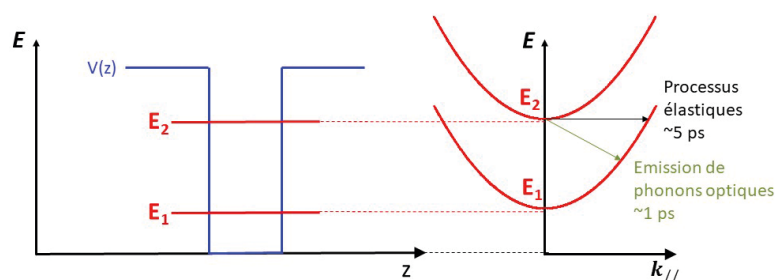
INVERSION DE POPULATION ET INGÉNIERIE DES STRUCTURES DE BANDE

Un système à trois niveaux, comme celui montré en figure 1(a), présente du gain optique si la population du niveau 3 est supérieure à la population du niveau 2 : c'est la condition d'inversion de population. Il se pose donc la question de comment obtenir l'inversion de population dans un système de puits quantiques couplés [4].

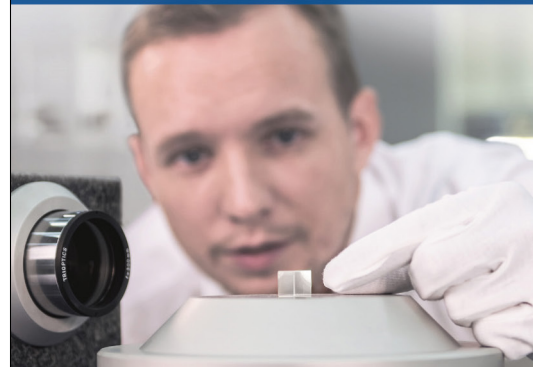
Considérons un électron dans un état excité d'un puits quantique de semiconducteur (encart 1). Son temps de vie est très court, de l'ordre de la picoseconde, ce qui rend très difficile l'obtention de l'inversion de population. Cette durée de vie est principalement limitée par l'interaction des électrons avec les phonons optiques, *i.e.* les quanta de vibration du réseau cristallin [5]. La solution trouvée par l'équipe de Federico Capasso, à l'origine de l'invention du QCL, a été de réaliser l'inversion de population en rendant le temps de vie de l'état 2, τ_2 , encore plus court que le temps de relaxation de 3 à 2, τ_{32} . Pour cela on introduit un niveau 1, tel que la différence d'énergie entre 2 et 1 est proche de l'énergie d'un phonon optique. Ceci permet de satisfaire la condition $\tau_2 < \tau_{32}$ et donc d'assurer une dépopulation rapide du niveau 2 pour réaliser la condition d'inversion de population. On voit donc que l'inversion de population est construite à travers l'ingénierie des temps de vie, grâce à une ingénierie du profil de potentiel électronique.

PUITS QUANTIQUES DE SEMICONDUCTEUR ET TEMPS DE VIE DE L'ÉTAT EXCITÉ

Dans un puits quantique de semiconducteur, les électrons sont confinés dans la direction de croissance du puits (z), ce qui donne lieu à des états discrets, E_n . Comme les électrons sont libres dans le plan des couches, à chaque état confiné est associée une « sousbande », d'énergie $E_n(k_{||}) = E_n + \frac{\hbar^2 k_{||}^2}{2m^*}$, avec m^* la masse effective des électrons en bande de conduction et $k_{||}$ le vecteur d'onde dans le plan des couches semiconductrices. Le temps de vie des électrons excités est limité par les processus non-radiatifs, principalement par l'émission de phonons optiques. Le temps de vie associé est de l'ordre de la picoseconde, et peut atteindre la centaine de femtosecondes pour une relaxation résonante, *i.e.* quand les deux sousbandes sont séparées par l'énergie d'un phonon longitudinal optique (environ 30 meV).



Métrologie des systèmes photoniques



Mesure de la plupart des paramètres d'un système optique

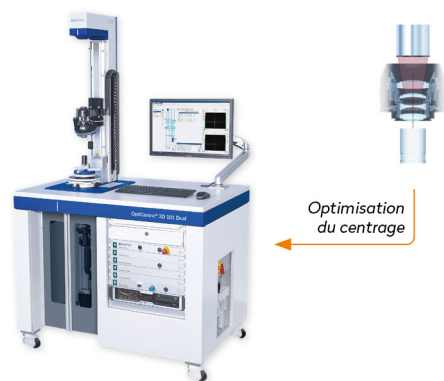
Systèmes imageurs, Lidars, Lasers, Objectifs, AR-VR

Tests en R&D et contrôle en production



Optimisation des alignements CamTest

Station de mesure de la FTM ImageMaster HR2



Optimisation du centrage

Station de Centrage OptiCentric 101

TRIOPTICS France

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

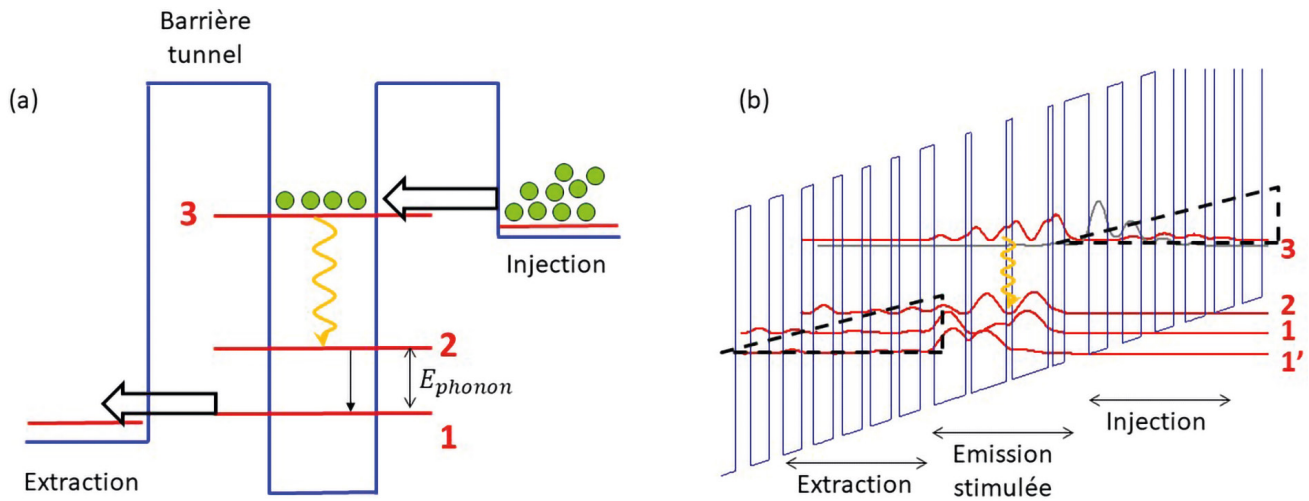


Figure 1. (a) Schéma simplifié d'une période d'un laser à cascade quantique. (b) Profil de potentiel de la bande de conduction, en présence d'un potentiel extérieur appliqué, avec les modules carrés des fonctions d'onde des états les plus importants pour le fonctionnement du QCLs. Chaque fonction d'onde est tracée à l'énergie correspondante.

La figure 1(a) présente la brique de base de la région active d'un laser à cascade quantique. Les électrons sont injectés par effet tunnel dans l'état 3 à partir d'un réservoir d'électrons (région d'injection). L'émission stimulée a lieu entre les états 3 et 2, grâce à la résonance phonon qui permet une relaxation rapide de 2 à 1, et une extraction efficace des électrons vers la région d'extraction. La figure 1(b) montre le dessin du potentiel électronique d'une région active, qui reproduit la brique de base de la figure 1(a). On peut identifier les trois régions importantes : la région à gain, où la transition radiative a lieu, avec les niveaux électroniques (en rouge) et les minibandes d'injection et d'extraction, schématisées par des triangles en tirets. Ces régions fonctionnent comme des « entonnoirs à électrons », qui permettent une injection par effet tunnel résonnant de l'état de plus basse énergie de la minibande (état injecteur, en gris dans la figure 1(b)) vers l'état excité de la transition radiative (état 3). À noter que la région active, illustrée en figure 1(b), est constituée de quatre niveaux, en raison d'une double résonance phonon entre les niveaux 2→1 et 1→1'.

L'ingénierie quantique des structures de bande permet donc de contrôler tous les paramètres clés pour le fonctionnement du QCL : la longueur d'onde d'émission, à travers la séparation en énergie entre 3 et 2 ; le gain, à travers la résonance phonon ; le transport électronique, via les minibandes, séparées par des zones interdites (minigap), où le transport ne peut pas avoir lieu.

L'introduction d'une résonance phonon n'est pas la seule possibilité pour réaliser l'inversion de population, et d'autres dessins de potentiel ont été introduits au fil des ans. Par exemple, la figure 1(b) illustre le cas d'une double résonance phonon, pour améliorer les performances des QCLs à température ambiante. Des structures à super-réseaux peuvent être introduites pour réaliser des QCLs dans les THz, lorsque l'énergie des photons émis est inférieure à celle des phonons optiques.

Le potentiel dessiné est ensuite réalisé dans une structure réelle grâce aux techniques de croissance épitaxiale, qui permettent de contrôler la croissance de puits quantiques et barrières avec une précision de l'ordre de la monocouche atomique.

CARACTÉRISTIQUES DU LASER

Considérons une structure à trois niveaux, comme celle présentée au paragraphe précédent. Nous allons calculer la dépendance entre la puissance émise par le QCL et le courant injecté en utilisant un système d'équations bilan. On appelle N_i la population du niveau i (i.e. la densité d'électrons du niveau i par unité de surface) et S la densité de photons d'énergie $E_{32} = E_3 - E_2$, par unité de surface. Pour une densité de courant injecté J on a :

$$\frac{dN_3}{dt} = \frac{J}{e} - \frac{N_3}{\tau_3} - \sigma S(N_3 - N_2)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{N_3}{\tau_{32}} - \frac{N_2}{\tau_2} - \sigma S(N_3 - N_2)$$

$$\frac{dS}{dt} = \sigma S(N_3 - N_2) - \frac{\alpha_{\text{tot}} c}{n_{\text{eff}}} S$$

Ici e est la charge élémentaire ; σ représente la section efficace par unité de temps associée aux processus d'absorption et d'émission stimulée ; α_{tot} représente les pertes totales de la cavité ; n_{eff} l'indice effectif du mode de cavité et c la vitesse de la lumière dans le vide.

En cavité froide ($S = 0$), on trouve que l'inversion de population est :

$$N_3 - N_2 = \frac{J}{e} \left(1 - \frac{\tau_2}{\tau_{32}} \right)$$

Le gain optique étant proportionnel à l'inversion de population, cette expression indique que, si la condition d'inversion de population est satisfaite ($\tau_2 < \tau_{32}$), le gain est présent

quel que soit le courant injecté dans le dispositif. En d'autres termes, la région active d'un QCL, dont les performances sont déterminées par l'ingénierie des structures de bande, peut être considérée comme un amplificateur de lumière idéal, permettant d'augmenter le flux de photons pour tout courant injecté. En présence de photons dans la cavité ($S > 0$), on trouve que l'inversion de population est fixée par les caractéristiques de la cavité :

$$N_3 - N_2 = \frac{\alpha_{tot}}{\sigma} \frac{c}{n_{eff}}. \text{ Cela veut dire qu'au-dessus du seuil laser, chaque électron injecté sur l'état excité de la transition laser donne lieu à un photon stimulé. En résolvant les équations de bilan à l'état stationnaire, on obtient la densité de photons en cavité en fonction de la densité de courant injecté comme :}$$

$$S = \frac{1}{\sigma \tau_3} \left(\frac{J}{J_{th}} - 1 \right)$$

avec $J_{th} = \frac{\alpha_{tot}}{\sigma} \frac{ce}{n_{eff}} \frac{1}{\tau_3}$ (dans l'approximation $\tau_2 \ll \tau_3$). La puissance émise par le laser est donc linéaire avec le courant injecté.

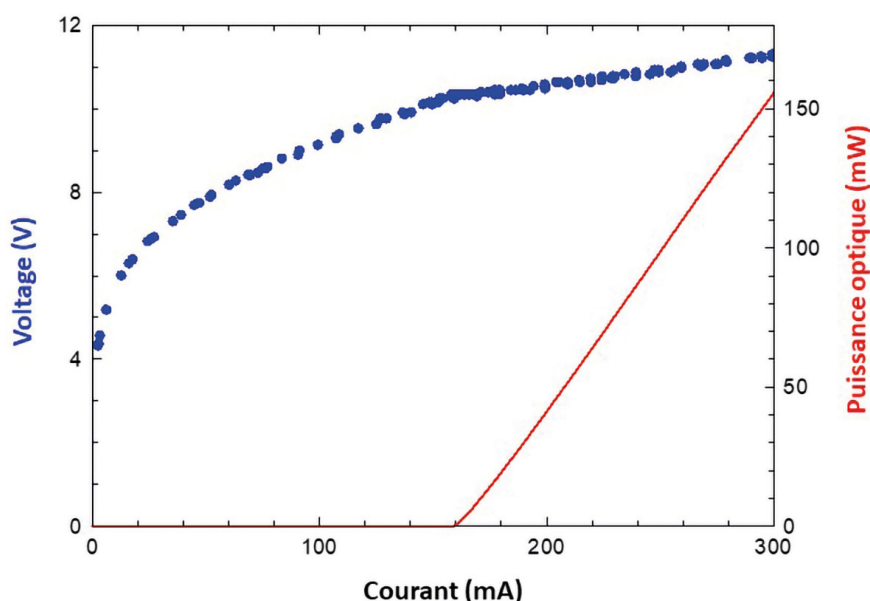
La figure 2 présente les caractéristiques électriques et optiques mesurées d'un

QCL commercial (Alpes Lasers) avec une longueur d'onde d'émission de 4.9 μm . Sur l'axe de gauche on lit le voltage aux bornes du dispositif mesuré en fonction du courant injecté. On peut reconnaître la caractéristique typique d'un dispositif tunnel résonant : pour une certaine valeur de la tension, l'injecteur est résonant avec l'état excité de la transition laser et le courant commence à circuler dans la structure. Sur l'axe de droite est tracée la caractéristique optique du laser, où l'on retrouve le comportement escompté : à partir du courant de seuil la puissance émise, proportionnelle à la densité de photons en cavité, augmente linéairement avec le courant. A noter aussi une brusque variation de la dérivée de la tension au seuil, liée au blocage de l'inversion de population.

L'EFFET CASCADE

L'effet cascade est une caractéristique importante des QCLs, qui les différencie des autres lasers à semiconducteur. En effet, un QCL est composé de la répétition de plusieurs périodes identiques qui permettent aux électrons extraits d'une période d'être injectés dans la période suivante. Le transport ●●●

Figure 2. Caractéristique tension – courant (courbe bleue) et puissance – courant (courbe rouge) d'un QCL commercial émettant à 4.9 μm .



LASERS QCL REPOUSSEZ LES LIMITES DE LA SPECTROSCOPIE MIR

PERFORMANCE | PRÉCISION | FIABILITÉ



Nanosystems and
Technologies
GmbH
nanoplus

- QCL DFB haute précision, longueurs d'onde personnalisées, intégration verticale complète.



**DRS DAYLIGHT
SOLUTIONS**

- Référence mondiale des systèmes QCL accordables et solutions MIR haute performance.

- ✓ Large couverture spectrale
- ✓ Stabilité et faible largeur de raie
- ✓ Solutions CW et accordables
- ✓ Intégration OEM simplifiée

Découvrez également **SPERO®**

Un microscope IR QCL révolutionnaire pour l'imagerie chimique rapide et sans contact.

DRS DAYLIGHT
SOLUTIONS



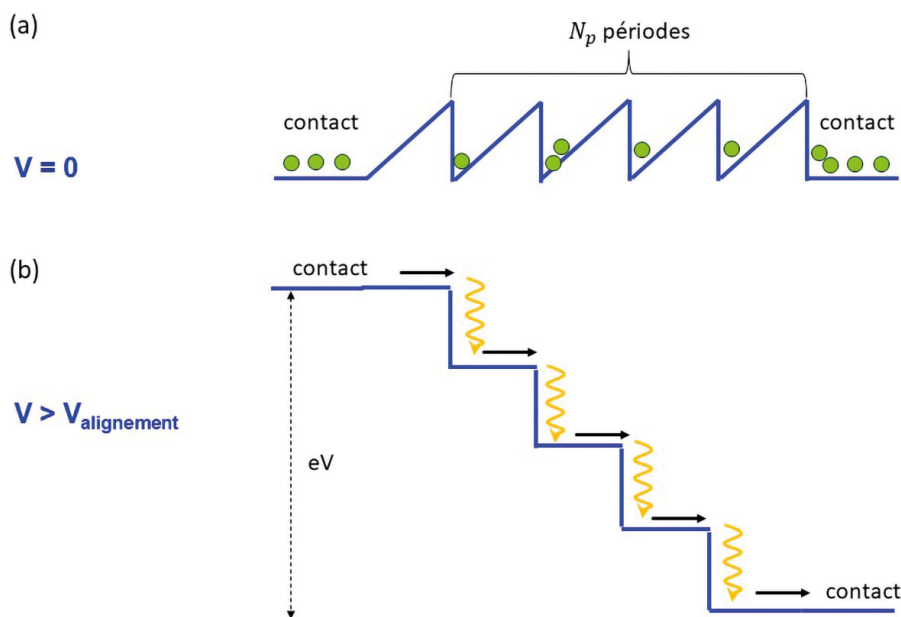


Figure 3. (a) Représentation schématic du potentiel « en dents de scie » dans la région active d'un QCL en l'absence de tension appliquée. (b) A la tension d'alignement, le potentiel en dents de scie est transformé en « marche d'escalier », chaque marche étant une période de la cascade. Un photon est émis chaque fois qu'un électron « cascade » d'une période à la suivante.

électronique est ainsi déterminé par l'ensemble des N_p périodes qui composent la région active.

La figure 3 présente un schéma pour comprendre l'effet cascade, en oubliant la structure fine liée aux fonctions d'onde et en suivant la distribution des électrons en l'absence (partie (a)) et en présence (partie (b)) d'une tension appliquée. Sans tension appliquée, chaque période correspond à un puits de potentiel triangulaire, de sorte que la structure du QCL est décrite par un potentiel en dents de scie. Dans cette configuration, les électrons sont dans le fond des puits triangulaires et y restent aussi pour des faibles tensions appliquées. Le courant ne circule pas dans la région active jusqu'à ce que le champ interne de la structure soit égal en amplitude, mais de signe opposé, au pseudo-champ du potentiel triangulaire. Cette « tension d'alignement » a transformé le potentiel en dents de scie en potentiel en marche d'escalier. Pour $V > V_{\text{alignement}}$, le courant circule dans le dispositif et les électrons cascaden de période en

période, d'un contact à l'autre. À chaque marche d'escalier, les électrons perdent de l'énergie par émission d'un photon. En conséquence, chaque électron qui traverse la région active peut émettre plusieurs photons avant d'arriver au contact d'extraction : l'efficacité quantique des QCLs, définie comme le rapport entre photons émis et électrons qui circulent dans la structure, peut valoir 10 ou plus en fonction du nombre de périodes dans la région active.

Augmenter le nombre de période permet donc d'augmenter la puissance

optique émise par le laser. Toutefois, cela a un prix : en augmentant le nombre de périodes, on augmente aussi la tension d'alignement, et donc la puissance électrique injectée.

CONCLUSION

Dans cet article, nous avons discuté les principes de fonctionnement des lasers à cascade quantique. Trente ans après leur invention portée par l'ingénierie des structures de bandes, les QCLs sont aujourd'hui des dispositifs commerciaux, fabriqués par une dizaine d'entreprises dans le monde. Les dimensions réduites et l'alimentation en courant les rendent des dispositifs parfaits pour être intégrés dans des instruments ou des systèmes pour la spectroscopie, la défense ou les applications médicales. De plus, leur démonstration a inspiré d'autres dispositifs pour les technologies infrarouges, comme les lasers à cascade interbande ou les détecteurs à cascade quantique. Enfin, leurs performances permettent désormais le développement de nouvelles applications dans le moyen et lointain infrarouge, comme les communications en espace libre, le pompage de lasers à gaz pour le THz, la métrologie, la spectroscopie de haute résolution, les capteurs quantiques. En parallèle, les QCLs restent un sujet de recherche très actif, notamment pour les études sur la génération de lumière comprimée et pour leurs propriétés dynamiques qui permettent la réalisation de peignes de fréquences. ●

RÉFÉRENCES

- [1] J. Faist *et al.*, *Science* **264**, 553 (1994)
- [2] C. Sirtori, *Photoniques* **130**, 30 (2025)
- [3] J. Faist, *Quantum Cascade Lasers* (Oxford University Press, 2018)
- [4] R.A. Suris, R.F. Kazarinov, *Soviet Physics. Semiconductors* **5**, 707 (1971)
- [5] R. Ferreira and G. Bastard, *Phys. Rev. B* **40**, 1074 (1989)

Profilomètre d'indice de réfraction pour fibre optique



Arden Photonics a mis à jour son profilomètre d'indice de réfraction nPA-600 afin d'étendre ses capacités de caractérisation

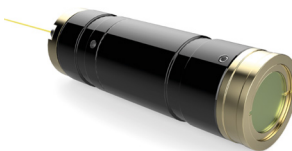
des fibres optiques spéciales. Arden introduit un nouveau guide de fibres adapté aux diamètres compris entre 125 et 160 μm , facilitant la mesure de fibres de plus faible diamètre utilisées dans des applications avancées de photonique et de navigation.

<https://ardenphotonics.com/news/arden-photonics-announcess-major-upgrade-to-npa-600/>

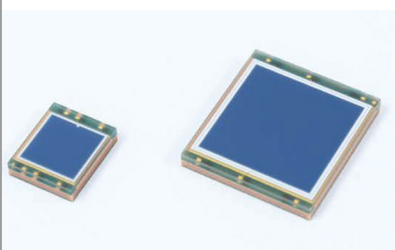
TÊTE DE CAPTEUR POUR MESURES INTERFÉROMÉTRIQUES DE DÉPLACEMENT

La tête de capteur D25/C11 d'attocube est conçue pour les mesures interférométriques de déplacement sur de longues distances, jusqu'à 30 mètres. Optimisée pour offrir une grande tolérance aux désalignements angulaires et latéraux du rétro-rélecteur, elle répond aux besoins des applications de métrologie exigeantes. Elle peut notamment être utilisée pour l'étalonnage de machines-outils de grande dimension, les mesures de déformation sur des installations synchrotron ou des télescopes spatiaux.

www.attocube.com/en/products/laser-displacement-sensor/displacement-measuring-interferometer/standard-sensor-heads/idshd25c11rt



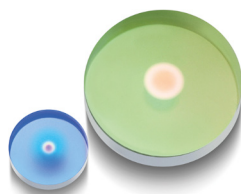
Photodiode Si PIN



La photodiode silicium PIN S15152 est encapsulée dans un boîtier de type chip carrier destiné au montage en surface. Elle est compatible avec les procédés de soudure par refusion, facilitant ainsi son intégration dans les chaînes de fabrication automatisées. Dotée d'une large surface photosensible, elle convient particulièrement aux applications de communication optique en espace libre (FSO) et aux systèmes nécessitant un large champ de vision.

www.hamamatsu.com/eu/en/product/optical-sensors/photodiodes/si-photodiodes/S15152.html

MIROIRS GAUSSIENS À RÉFLECTIVITÉ VARIABLE



LASER COMPONENTS propose des miroirs à réflectivité variable (VRM) dont le profil gaussien présente une réflectivité plus élevée au centre qu'en périphérie. Cette distribution permet un contrôle efficace du mode dans le résonateur, favorisant un fonctionne-

ment stable et une amélioration des performances du faisceau. Utilisés comme coupleurs de sortie dans les résonateurs stables, ces miroirs contribuent à réduire la divergence du faisceau et à augmenter son intensité.

www.lasercomponents.com/fr/photonics-portal/actualites/les-miroirs-gaussiens-de-laser-components-ameliorent-la-qualite-du-faisceau-dans-les-systemes-laser-haute-puissance/

Caméra IR pour le profilage de faisceau laser

La caméra ZephIR 2.5^e (Photon etc.) est destinée à l'imagerie infrarouge et au diagnostic de faisceaux laser dans la gamme spectrale de 900 à 2500 nm. Son détecteur refroidi à -80 °C par refroidissement thermoélectrique (TEC) et air forcé permet d'obtenir de faibles niveaux de bruit sans recourir à un refroidissement par eau ou à l'azote liquide. Elle offre une solution compacte et facilement intégrable pour les environnements de laboratoire comme pour les systèmes industriels.

www.optonlaser.com/fr/produit/camera-swir-hgcdte-zephir-2-5





400-1000 nm

A HAMAMATSU COMPANY

World's Broadest Tunable Laser

SuperK CHROMATUNE

This pulsed laser gives you
an unmatched 400-1000 nm
gap-free tuning range.



Contact us!
nktphotonics.com/contact



NKT Photonics