

# Photoniques

LA LUMIÈRE ET SES APPLICATIONS

N° 93 · Septembre - Octobre 2018

## ■ FOCUS

L'optique en Bourgogne-Franche-Comté



## ■ ACHETER

Un minispectromètre à réseau



## ■ PORTRAIT

Zhang Heng, astronome chinois



## ■ COMPRENDRE

Les lasers à cascade quantique



Du labo  
au dispo !

# OPTO- ÉLECTRONIQUE

*Technologies & Dispositifs*

# Des instruments pour aller plus loin



## AWG – Générateur d'ondes arbitraires

à partir de

EUR 4.950,-

par sortie

- 2.4 GSa/s, 16 bit, 750 MHz
- 4, 8 et plus de canaux
- <50 ns latence de déclenchement

### Applications courantes

Tests semiconducteurs, ordinateur quantique, design et validation d'antennes réseau à commande de phase, lidar, spectroscopie, RMN

## Analyseur d'impédance

à partir de

EUR 9.300,-

- De 1 mHz à 5 MHz, de 1 mΩ à 1 TΩ
- 0.05% de précision de base
- Compensation des parasites et indicateur de fiabilité

### Applications courantes

Diélectriques à facteur de qualité élevé, détecteurs capacitifs, supercondensateurs, matériaux PV, caractérisation de composants

## Détection synchrone

à partir de

EUR 5.200,-

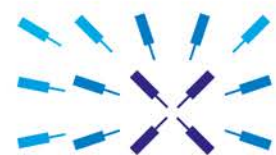
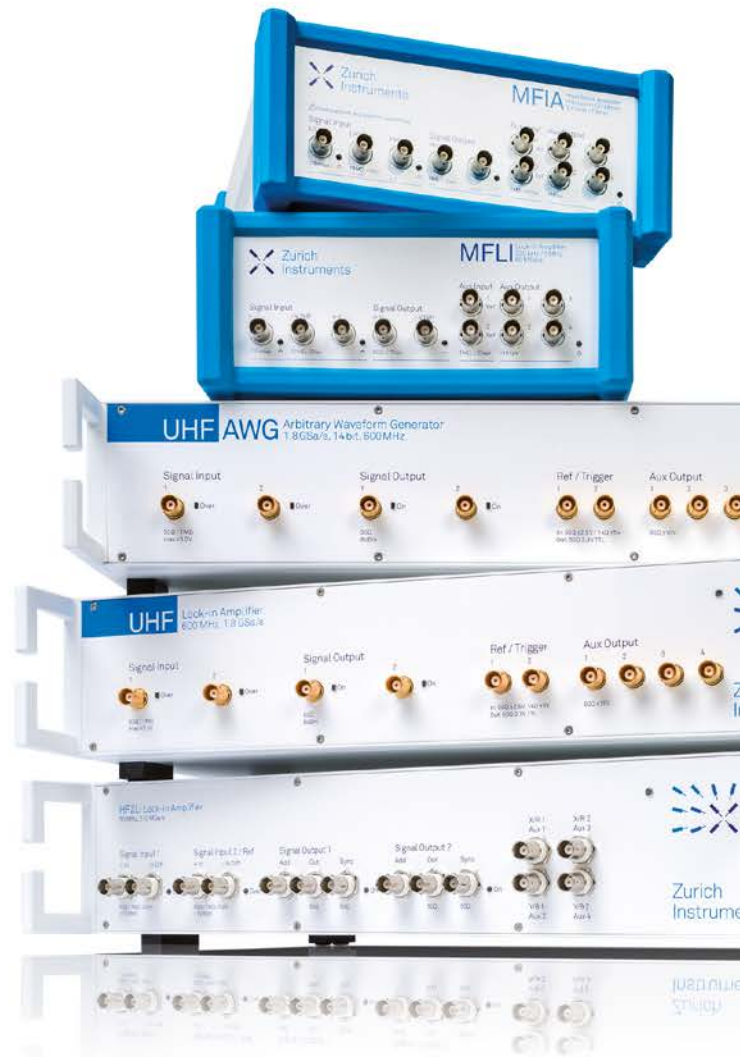
- Jusqu'à 600MHz
- Oscilloscope, FFT, FRA, balayage paramétrique, outils d'imagerie
- Options: AWG, PID, PLL, Boxcar, Counter, AM & FM

### Applications courantes

AFM, LVP, CARS, SRS, SNOM, graphene, PLL optique, THz, Pompe-sonde, RFID, MEMS, NEMS, gyros, NDT, MRFM

## Logiciel inclus

Tous les appareils sont équipés de LabOne®, le logiciel de contrôle de Zurich Instruments, qui offre une multitude de fonctionnalités, une interface intuitive pour une utilisation efficace. Chaque appareil est accessible depuis n'importe quel navigateur web ou commandé depuis un environnement de programmation en LabVIEW, MATLAB, Python, C, et .NET.



Zurich  
Instruments

## Opto-Électronique, une histoire qui marche !

Il est évident que la technologie électronique a dominé le 20<sup>e</sup> siècle, et nombreux sont ceux qui parient que la photonique règnera sur le 21<sup>e</sup> siècle. Pourtant, bien qu'elles soient perçues comme étant de générations différentes, il est bien possible que notre avenir technologique réside dans leur association, l'opto-électronique.



Riad HAIDAR  
Rédacteur en chef

Car c'est un fait, photons et électrons font bon ménage : pulser, traiter, stocker, convertir, mélanger, filtrer, amplifier, coder etc... le miracle réside sans doute là : parvenir à transposer sur les photons tout (ou à peu près) ce que l'on peut faire avec les électrons. Et parfois, on réussit aussi l'inverse : utiliser les propriétés des signaux optiques pour exploiter des signaux électroniques.

Comme vous le lirez dans notre dossier, l'opto-électronique a un matériau de choix (le semiconducteur), une application-phare (le photovoltaïque), un domaine scientifique de prédilection (la mécanique quantique)... et, sans aucun doute, un bel avenir.

*Bonne lecture !*

## SOMMAIRE 93 Septembre - Octobre 2018

■ <b>ÉDITORIAL ET ACTUALITÉS DE LA SFO</b> .....	2
■ <b>ACTUALITÉS DES PÔLES ET ASSOCIATIONS</b> .....	4
■ <b>ACTUALITÉS DE LA PROFESSION</b> .....	9
■ <b>FOCUS</b> L'optique photonique en Bourgogne Franche Comté .....	13
■ <b>PORTRAIT</b> Opticien Célèbre. Zhang Heng .....	16
■ <b>TECHNOLOGIES OPTO-ÉLECTRONIQUES ET DISPOSITIFS</b>	
Circuits intégrés photoniques silicium .....	18
L'optique hyperfréquence : un défi perpétuel .....	24
Des MEMS à l'optomécanique en cavité .....	30
Où en est la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire ? .....	37
■ <b>CAHIER TECHNIQUE</b>	
<b>Comprendre.</b> Les lasers à cascade quantique : vers la démocratisation ! .....	44
■ <b>PRODUITS</b>	
<b>Acheter.</b> Un mini spectromètre à réseau .....	49
Nouveautés .....	3 <sup>e</sup> de couv.



Crédit photo (couverture) : © iStockPhoto

ANNONCEURS			
Aerotech .....	41	IDS Imaging .....	29
Ardop Industrie .....	39	Imagine Optic .....	45
Edmund Optics .....	25	Institut d'Optique Graduate School .....	43
First Sensor .....	47	iXblue .....	23, 33
Forum de la Photonique .....	8	Laser Components .....	27
Idil Fibres Optiques / Ocean Optics .....	49	Newport .....	31
Optical Business & Services Fiber .....	13	Trioptics .....	51
Opton Laser International .....	IV <sup>e</sup> de couverture	TSA .....	21
Santec .....	35	Université de Bourgogne .....	15
ScienTec .....	37	Zurich Instruments .....	II <sup>e</sup> de couverture
Spectrogon .....	11		
Spectros Optical Systems .....	9		

Photoniques est éditée par EDP Sciences,  
17 avenue du Hoggar,  
P.A. de Courtabœuf,  
91944 Les Ulis Cedex A, France  
Tél.: +33 (0)1 69 18 75 75  
Fax: +33 (0)1 69 07 45 17  
RCS: 308 392 687 – ISSN: 1629-4475  
[www.photoniques.com](http://www.photoniques.com)  
[www.edpsciences.org](http://www.edpsciences.org)



Photoniques est la revue de  
la Société française d'optique  
2 avenue Augustin Fresnel  
91127 Palaiseau Cedex, France  
[mariam.mello@institutoptique.fr](mailto:mariam.mello@institutoptique.fr)

Tél.: +33 (0)1 64 53 31 82  
Fax: +33 (0)1 64 53 31 84

**Directeur de publication** Jean-Marc Quilbé  
Tél.: +33 (0)1 69 18 75 75

#### Rédaction

**Rédacteur en chef** Riad Haidar,  
Mobile: +33 (0)6 85 04 78 52,  
[riad.haidar@edpsciences.org](mailto:riad.haidar@edpsciences.org)

**Journaliste et secrétaire de rédaction** Vincent Colpin  
[vincent.colpin@edpsciences.org](mailto:vincent.colpin@edpsciences.org)

**Mise en page** Studio wake up!  
<https://studiowakeup.com>

#### Comité de rédaction

Pierre Baudoz (Observatoire de Paris),  
Nicolas Bonod (Institut Fresnel, Marseille),  
Azzedine Boudrioua (Institut Galilée, Paris 13),  
Émilie Colin (Lumibird),  
Céline Fiorini-Debuisschert (CEA),  
Wolfgang Knapp (Club laser et procédés),  
Patrice Le Boudec (IDIL Fibres Optiques),  
Christian Merry (Laser Components),  
François Piuze (Société Française de Physique),  
Marie-Claire Schanne-Klein (École polytechnique),  
Christophe Simon-Boisson (Thales Optronique),  
Costel Subran (F2S - Fédération des Sociétés Scientifiques),  
Ivan Testart (Photonics France).

**Publicité** Annie Keller  
Mobile: +33 (0)6 74 89 11 47  
Tél./Fax: +33 (0)1 69 28 33 69  
[annie.keller@edpsciences.org](mailto:annie.keller@edpsciences.org)

#### Gestion des abonnements

Photoniques  
EDP Sciences  
17 avenue du Hoggar - PA de Courtabœuf  
BP 112 – 91944 Les Ulis cedex A  
[abonnements@edpsciences.org](mailto:abonnements@edpsciences.org)

#### Impression

Fabrégue imprimeur  
B.P. 10  
87500 Saint-Yrieix la Perche

**Dépôt légal** Octobre 2018

**Routage** STAMP (95)



## LE MOT DE LA PRÉSIDENTE



**Pascale NOUCHI**  
Présidente de la SFO

Chers adhérentes et adhérents à la Société Française d'Optique,

Comme vous le savez, nos clubs constituent la colonne vertébrale de notre société savante. Ils sont au nombre de vingt : 15 clubs thématiques qui reflètent parfaitement la richesse et la diversité de l'optique française ; mais aussi 3 « students clubs » EOS/SFO et 2 commissions, la commission enseignement et la toute jeune commission « Femmes et Physique, réussir la parité en optique » créée sous l'impulsion de mon prédécesseur Benoit Boulanger. La parité est un sujet qui reçoit beaucoup d'attention dans les médias et dans l'actualité en général. C'est donc tout naturellement que ce « mot de la présidente » est dédié à nos actions en faveur de la parité.

La commission « Femmes et Physique, réussir la parité en optique » est animée avec beaucoup de conviction et de dynamisme par Caroline Champenois (Laboratoire PIIM - Physique des Interactions Ioniques et Moléculaires), et Marie Géléoc (LIDYL - Laboratoire Interactions, Dynamiques et Lasers). Cette commission est conjointe avec celle de la Société Française de Physique (SFP). Parmi les objectifs principaux, il s'agit de donner une plus grande visibilité et d'améliorer la place des femmes en physique/optique. Parmi les actions, je tiens à souligner le mentorat pour aider les jeunes femmes dans leur choix et orientation de carrière, ainsi que la mise en place d'une charte pour l'organisation des conférences ; cette charte assurant une représentation équitable F/H.

Cette commission a participé activement à notre grand congrès OPTIQUE Toulouse, avec un vif soutien de l'équipe locale Philippe Arguel, Emmanuelle Daran et Antoine Monmayrant. Nous avons eu le plaisir d'accueillir en conférence plénière une sociologue, Nathalie Lapeyre, spécialiste des études de genre, notamment dans la sphère professionnelle. C'est une première dans l'histoire de nos congrès OPTIQUE. Nathalie Lapeyre nous a présenté un panorama très détaillé et chiffré de la place des femmes dans la recherche publique en optique, ainsi que des exemples de politique active de parité mise en place dans des pays voisins. Cette présentation a suscité de nombreuses questions de la part de l'auditoire et les débats ont continué bien au-delà de la conférence elle-même. Enfin, je l'avais déjà noté dans mon précédent « Mot de la Présidente », mais les conférences plénières ont affiché une parité parfaite. C'est un très bel exemple pour les chercheuses et un bel encouragement pour nos jeunes chercheuses.

Bien amicalement,  
Pascale NOUCHI

## Le bilan parité d'OPTIQUE Toulouse 2018

Les conférences plénières d'Optique Toulouse 2018 se sont tenues dans le grand auditorium Marthe Condat de l'Université Toulouse III Paul Sabatier, symbole fort du congrès que la SFO a voulu sous le signe de la parité. Marthe Condat (1886-1936), née dans le Tarn, effectue à Toulouse ses deux premières années de médecine. En 1923, elle est la première femme à être reçue au concours d'agrégation. Elle enseigne ensuite à Toulouse et publie des travaux consacrés surtout à la pédiatrie. En 1935, elle est élevée au grade de Chevalier de la Légion d'honneur.

La création, les motivations et les objectifs de la commission « Femmes et Physique, réussir la parité en Optique » ont été annoncées à tous les congressistes. La conférence plénière de la sociologue Nathalie Lapeyre a permis à l'assemblée de prendre la mesure du

déficit de femmes chez les chercheurs et enseignants-chercheurs travaillant dans les domaines concernés par l'optique, ainsi que les difficultés qu'elles peuvent rencontrer dans leur évolution de carrière. Cette conférence a suscité beaucoup de discussions, et c'était aussi le but. On a entendu de nombreux points de vue exprimés et les débats se sont poursuivis autour des tasses et des gobelets, certains montrant que les idées reçues et les stéréotypes ont la vie dure et que tout le monde n'est pas encore prêt à changer de mentalité ni de façon de travailler.

Nos jeunes collègues féminines se sont senties soutenues et encouragées par la volonté affichée de la SFO de ne pas ignorer ce problème et de mettre en avant les femmes scientifiques tout autant que leurs homologues masculins, en invitant autant de femmes que d'hommes à donner une conférence plénière. Ainsi, nous avons pu

assister à la 1<sup>re</sup> conférence de la SFO affichant la parité au niveau des sessions plénières. À ce titre parmi d'autres, la conférence en tandem d'Alain Brillet et Nary Man restera dans les mémoires. Malgré l'effort du comité d'organisation qui avait fait de la promotion des femmes scientifiques un thème fort de son congrès, la présence des femmes oratrices dans l'ensemble des sessions suffit tout juste à leur assurer un temps de parole en proportion de leur nombre, soit 22 %. On peut se réjouir que ce nombre soit supérieur à la proportion de femmes chercheuses et enseignantes-chercheuses dans les sections où l'optique est présente, qui a du mal à dépasser les 18 %. Ces quelques chiffres ont pour but d'alerter toute la communauté que des efforts sont nécessaires sur le long terme pour que la visibilité des femmes opticiennes soit à la hauteur de leur engagement pour leur discipline et leur communauté.

## École thématique SFO 2019 :

### Peignes de Fréquences et Liens Fibrés Optiques pour les Mesures de Précision - Les Houches, 23-26 avril 2019

Cette école s'inscrit dans le cadre du développement national et international des liens optiques fibrés qui permettent de transférer un signal de référence de fréquence ultrastable et exact et ouvrent ainsi la voie à des expériences de très grande précision dans de larges domaines de la physique. Pour exploiter au mieux les performances métrologiques, celles-ci peuvent être transférées dans n'importe quel domaine spectral grâce à un peigne de fréquence optique. Ces peignes sont par ailleurs des outils idéaux pour la spectroscopie de très haute résolution. L'école ciblera donc ces deux sujets fortement liés : le transfert ultrastable d'une référence de fréquence par lien optique, son principe, ses limites fondamentales, les diverses implémentations mais aussi les peignes de fréquences optiques et leurs multiples applications. Les applications envisagées concernent les tests des modèles fondamentaux, la géodésie et les observations astrophysiques, ainsi que les nouveaux protocoles de spectroscopie atomique ou moléculaire rendus possibles par ces outils.

L'ambition de cette école est de rassembler les acteurs des récents développements dans ce domaine, et un panel de futurs utilisateurs de disciplines variées, qui peuvent mettre à profit ces outils pour des mesures de haute précision. Cette rencontre se produit après 15 ans de développement au sein de la communauté de la métrologie temps-fréquence, au moment où les outils et méthodes disponibles sont suffisamment matures pour être partagés et utilisés par tous.

Au niveau national, cette école est en particulier indispensable pour les futurs utilisateurs du réseau Refimeve, qui donnera accès à une vingtaine de laboratoires à un signal de référence de fréquence généré au Syrte, Paris. Au niveau européen aussi, les liens fibrés sont en pleine expansion et cette école pourra ainsi bénéficier au projet CLONETS qui a pour objectif de promouvoir le développement de liens optiques à l'échelle européenne.

**CONTACTS :** Caroline Champenois (PIIM) et Anne Amy-Klein (LPL)

**EN SAVOIR PLUS :** [www.sfoptique.org/pages/ecoles-thematiques/](http://www.sfoptique.org/pages/ecoles-thematiques/)

#### AGENDA

##### PXRNMS 2018

7-11 novembre 2018,  
EDF Lab Paris-Saclay – Palaiseau  
Physics of X-Ray and Neutron  
Multilayer Structures : l'objectif  
de ces trois journées est de  
réunir doctorants, chercheurs et  
industriels intéressés par la physique  
des empilements de couches minces  
d'épaisseur nanométrique pour  
des applications aux domaines des  
rayons X et extrême UV ainsi que  
des optiques pour les neutrons.  
*Parrainage SFO*

##### Congrès C'Nano 2018

11-13 décembre 2018,  
Centre de congrès Neptune – Toulon  
La deuxième édition du congrès.  
*Parrainage SFO*

##### C2i 2019

28 au 30 janvier 2019, ENSAM  
Bordeaux – Talence  
8<sup>e</sup> Colloque Interdisciplinaire  
en Instrumentation  
*Parrainage SFO*

Tous les événements de l'agenda SFO :  
[www.sfoptique.org/agenda/](http://www.sfoptique.org/agenda/)

## Sécurité et défense : un nouveau projet européen « EU KETs4Dual-Use »

OPTITEC est le coordinateur du projet « European Key Enabling Technologies for Dual-Use Worldwide », financé dans le cadre du programme COSME – programme européen pour la compétitivité des PME. Le consortium de partenaires inclut le pôle Minalogic, le cluster danois de la sécurité & défense CenSEC et l'Association estonienne de l'industrie de la défense.

Le projet vise à mettre en place un partenariat de clusters européens afin de faciliter l'accès aux marchés de la sécurité et de la défense pour les PME européennes dans trois zones géographiques :

- Amérique du Nord
- Moyen-Orient
- Asie et l'Océanie

4 étapes clés permettront de réaliser le projet sur une période de 18 mois :

- une cartographie d'écosystèmes locaux devra identifier les besoins et les synergies – les technologies et les domaines d'applications les plus pertinents – entre les PME membres du partenariat ;
- la sélection des pays ciblés sera réalisée sur la base de la cartographie, d'une analyse documentaire et d'une série d'entretiens avec les membres et les contacts basés dans les pays d'intérêt ;
- la validation des pays ciblés se fera au travers de missions économiques ;
- l'élaboration d'une stratégie internationale commune et sa réalisation opérationnelle fera l'objet d'un projet COSME Go International Strand 2.

Le projet a démarré avec une réunion « Kick-off » le 19 septembre 2018 à Marseille. Sur la photo : Mme Laure Quintin - Chargée de projet Europe au Pôle Minalogic, M. Klaus Bolving – DG du Cluster CenSec, M. Ziga Valic – Responsable Europe & International OPTITEC, Mme Anu Eslas – Responsable International & Export EDIA et Mme Regina Zainetdinova – Chargée d'affaires Europe & International OPTITEC. Si vous souhaitez obtenir plus d'information ou être impliqué dans le projet, n'hésitez pas à contacter M. Ziga Valic, Responsable Europe & International.



### AGENDA

#### Salon Vision

6 au 8 novembre 2018, Stuttgart

Organisé tous les deux ans à Stuttgart, le Salon Vision est considéré comme le salon mondial pour le traitement d'images. Pour ce rendez-vous incontournable, OPTITEC accompagnera sur ce salon les entreprises : First Light Imaging, Nexvision, Phlox, Scortex, Silios Technologies et Stil. Le pôle OPTITEC et ses adhérents vous invitent à venir les rencontrer sur le pavillon 1A72.

**CONTACT :** Regina Zainetdinova, Chargée d'affaires Europe / International  
[regina.zainetdinova@pole-optitec.com](mailto:regina.zainetdinova@pole-optitec.com)

#### Journée de Networking Européen

20 novembre 2018, Marseille

Le pôle Optitec, en partenariat avec Eurobiomed organise la quatrième étape du « European Photonics Roadshow » le 20 novembre 2018 au Palais du Pharo, dans le cadre du Salon Innov'inMed, sur le thème : « Relevez les défis d'accès au marché médical européen » (session plénière, ateliers, Rdv B2B).

### Partenariat Optitec / Robotics Place

Optitec et Robotics Place ont signé une convention de partenariat afin de renforcer les interactions et les synergies entre leurs réseaux d'adhérents sur le territoire d'Occitanie.

Optitec est pôle de compétitivité Photonique et Imagerie sur les régions Sud Paca et Occitanie, et Robotics Place un cluster robotique et drones en Occitanie. Les deux structures portent des familles de technologies complémentaires, dont le croisement peut faire émerger des solutions nouvelles, des réponses innovantes à des problématiques existantes, qui *in fine* peuvent aboutir à la création de nouveaux produits,

des projets collaboratifs, ouvrant l'accès à de nouveaux marchés. La convention prévoit plus particulièrement une collaboration autour de la plateforme Light2Share, marketplace technologique lancée par Optitec. Ce partenariat permettra aux roboticiens d'accéder aux technologies et à l'expertise photonique et imagerie disponible sur Light2Share, et aux adhérents d'Optitec d'avoir accès à des intégrateurs et roboticiens d'expérience pour développer les technologies dont ils ont besoin.

Le partenariat porte aussi sur l'organisation conjointe de journées thématiques. Un premier exemple concret de ce

partenariat est la journée « Robotique & Capteurs », organisée par les deux clusters en partenariat avec Cap'tronic, l'Institut d'Électronique et des Systèmes (IES), le LIRMM et l'AD'OCC Région Occitanie le 13 juin dernier à Montpellier. À l'occasion de cette journée, qui a rassemblé une soixantaine de participants, les experts du domaine ont présenté leurs travaux de recherche, les avancées scientifiques et solutions dans les domaines de la robotique et des capteurs et ont pu faire connaissance à travers des rencontres en B2B. Des projets technologiques innovants vont sans aucun doute émerger de ces échanges fructueux.

## Business meeting

### La photonique pour le médical, le vivant et la cosmétique

Après une 1<sup>re</sup> édition couronnée de succès, Photonics France vous propose une 2<sup>e</sup> journée de business meeting. En compagnie de Biomérieux, L'Oréal, Stago et bien d'autres, passez une journée dédiée au business dans Paris avec présentations des besoins des grands donneurs d'ordre suivies de tables-rondes.

22 novembre 2018, Paris - ouvert à tous sur inscription.

Tarif 120€ adhérents AFOP / 180€ non-adhérents.

Plus d'informations sur [www.photonics-france.org](http://www.photonics-france.org)

## Pavillon France sur Laser World of Photonics Munich

Laser World of Photonics Munich 2019 aura lieu du 24 au 27 juin. Photonics France, Photonics Bretagne, Alpha - Route des Laser et des Hyperfréquences, Minalogic et Business France travaillent actuellement ensemble pour proposer un pavillon Français commun. Une offre unique et commune à l'ensemble des exposants est diffusée depuis mi-octobre, adaptée selon les aides de chaque région et pratiques de chaque pôle.

## Horizon Europe : la photonique en danger – la photonique doit rester une technologie clé pour l'Europe !

Suite d'Horizon 2020, « Horizon Europe » est le futur programme cadre qui définira la politique européenne de soutien à la recherche et à l'innovation de 2021 à 2027. Or selon nos échanges avec les autorités et nos partenaires européens, Horizon Europe remet en cause le soutien actuel à la photonique dont nos acteurs français bénéficient largement.

Ce qui est remis en cause et dont nous voulons le maintien :

- La KET photonique, instaurée en 2009 par la Commission européenne, devrait fusionner avec la micro-électronique.
- Le PPP photonique qui ne sera peut-être pas renouvelé.
- Le budget de 700 M€ pour la photonique dans Horizon 2020 ne sera plus « sanctuarisé ».

En coordination avec les autres pays européens et en accord avec Photonics21, les fédérations nationales photoniques vont manifester auprès de la Commission européenne leur attachement fort au programme spécifique pour la photonique.

Nous avons alerté les pouvoirs publics français pour soutenir la photonique auprès de la Commission européenne.

Signez la pétition en ligne et diffusez-la à vos réseaux dès que possible. Sur : <https://www.unepetition.fr/soutien-la-photonique-europeenne>

## NOUVEAUX ADHÉRENTS

### GAGGIONE (01 – MONTREAL-LA-CLUSE)

Depuis plus de 40 ans, Gaggione développe et fabrique des composants optiques standards et sur-mesure en injection plastique, dans différents types de polymères : PMMA, PC, COC et COP.

Contact : Laurent BAREL – [www.gaggione.fr](http://www.gaggione.fr)

### FIBERTECH (59 – LILLE)

Fibertech Lille est une centrale technologique dédiée à la fabrication de fibres optiques innovantes qui concentre de nombreux équipements originaux, des outils de caractérisation et de modélisation. La centrale est inhérente au PHLAM et localisée depuis 2007 sur le campus Haute-Borne, au sein de l'IRCICA.

Contact : Arnaud MUSSOT – [www.fibertech.univ-lille.fr](http://www.fibertech.univ-lille.fr)

### OPTOSIGMA FRANCE (91 – LES ULIS)

Optosigma propose une large gamme de composants optiques et optomécaniques, montures, platines manuelles et motorisées, tables optiques en standard mais peut répondre également aux besoins hors catalogue.

Contact : Guy EAR – [www.optosigma.com](http://www.optosigma.com)

### QIOVA (42 – SAINT-ETIENNE)

QiOVA propose son expertise dans le domaine du marquage et micro-usinage laser depuis les premières phases de test de faisabilité sur matériaux jusqu'à la conception ou la proposition de solutions complètes.

Contact : Benjamin DUSSER – [www.qiova.fr](http://www.qiova.fr)

### [www.photonics-france.org](http://www.photonics-france.org) : un nouveau site pour la fédération

Découvrez le nouveau site de Photonics France : plus clair, plus complet... [www.photonics-france.org](http://www.photonics-france.org) reprend des rubriques « historiques » qui ont fait le succès de l'ancien : mini-site adhérent avec vitrine produits, communiqués de presse, offres d'emploi mais également une place de marché pour toutes les demandes de produits ou services photoniques.

De nouveaux modules ont été mis en place : un marché aux candidatures photoniques pour vous permettre un canal supplémentaire de recrutement, des bulletins de veilles (normative, économique, filière), la réservation de notre salle de réunion, l'agenda interactif des événements de la filière et de Photonics France...

De nouvelles rubriques seront mises à jour régulièrement ou déployées prochainement notamment sur la formation.

### POUR CONTACTER PHOTONICS FRANCE

Tél. : 01 53 46 27 09

[contact@photonics-france.org](mailto:contact@photonics-france.org) - [www.photonics-france.org](http://www.photonics-france.org)

## EKINOPS primé aux Trophées Futur40

**E**KINOPS, fournisseur de solutions de télécommunications dédiées aux opérateurs et entreprises, a été distingué lors des Trophées Futur40, regroupant les 40 PME et ETI qui ont affiché le plus fort taux de croissance de leur chiffre d'affaires au cours des trois derniers exercices. Coté en bourse depuis 2013, EKINOPS a délivré une croissance soutenue, de +40% en moyenne par an entre 2015 et 2017. L'an dernier, la société a affiché un développement très intense, avec un chiffre d'affaires consolidé de 34,29 M€ en croissance de +89%, notamment grâce à l'acquisition du groupe OneAccess, concepteur de produits d'accès au réseau (routeurs) et logiciels. Ce rapprochement a donné naissance à un acteur majeur des solutions de transport, de services ethernet et de routage d'entreprise pour les réseaux.

## Projet européen STEPHANIE : 4<sup>e</sup> rencontre interrégionale

Les partenaires du projet Interreg Europe Stephanie (dont Photonics Bretagne) se sont réunis à Dusseldorf mi-juillet pour échanger sur les bonnes pratiques pouvant être mises en place pour favoriser les interactions entre les acteurs du spatial et ceux de la photonique. Cela a aussi été l'occasion de dévoiler le e-bulletin (disponible en téléchargement : <https://www.interreurope.eu/stephanie/library/>) présentant les partenaires du projet et la spécificité de leurs écosystèmes respectifs. Une visite du centre Fraunhofer ILT et de l'université RWTH d'Aix-la-Chapelle a par ailleurs permis de mieux cerner sur le terrain le fonctionnement et les complémentarités des structures locales. Le prochain meeting d'échange aura lieu à Séville début 2019.

### PLUS D'INFORMATION :

[www.interreurope.eu/stephanie/](http://www.interreurope.eu/stephanie/)



## AGENDA

**ASSL, OSA Laser Congress**  
4 au 8 novembre 2018, Boston, États-Unis

## Des opportunités pour les bretons à OFS-26

**D**u 24 au 28 septembre se tenait à Lausanne, en Suisse, le 26<sup>e</sup> Congrès International des Capteurs à Fibres Optiques (OFS-26). On note cette année une forte croissance du nombre de participants venus rencontrer les 37 exposants parmi lesquels les photoniciens bretons :

Photonics Bretagne, IDIL et iXblue. Ces deux derniers ont d'ailleurs profité de cet événement mondial pour également présenter leurs publications scientifiques. De vraies opportunités dans un secteur en pleine expansion !



## La filière photonique au salon SPACE

**D**u 11 au 14 septembre, se tenait à Rennes le SPACE, salon international de l'élevage. Tous les ans, il rassemble plus de 1440 exposants dont près de 500 internationaux et plus de 114 000 visiteurs dont 14 000 internationaux de 128 pays.



Grâce à son positionnement au cœur de la Bretagne, grande région d'élevage en Europe, à son ancrage professionnel et à son rayonnement international, le SPACE est le rendez-vous mondial incontournable des professionnels de toutes les productions animales.

Toujours dans un objectif de croisement de filière et parce que les technologies photoniques ont beaucoup à apporter au domaine de l'élevage, Emagein3D, Euro-Process, NeoTec-Vision et Polytec France, adhérents de Photonics Bretagne, y exposaient leurs innovations. En parallèle, le jeudi 13 septembre, une visite personnalisée du salon a été organisée avec Photonics Bretagne, ZOOPOLE développement, Greentropism et Photon-Lines, afin d'aller à la rencontre des équipementiers de l'élevage pour connaître leurs besoins et échanger. Une belle opération à renouveler l'année prochaine.

## Evosens met au point un éclairage laser forte puissance

**C**réé en partenariat avec la société lorientaise GEIM et avec l'appui de Laser Conseil et Photonics Bretagne, ce système est destiné à des applications de dissuasion pour la protection des sites sensibles et des armées. Le laser a un effet d'éblouissement permettant de ralentir ou neutraliser les personnes situées dans le faisceau, mais n'est pas traumatisant au-delà de 100 m (produit classé Classe 2M). Evosens a conçu le système optique de mise en forme du laser ainsi que les drivers et l'optimisation d'un système de sécurité basé sur la technologie Lidar. Après une première série industrielle à destination des pays du Golfe, l'objectif est de produire plusieurs dizaines d'appareils par an. Une parfaite illustration du savoir-faire et des capacités d'Evosens dans le secteur de la photonique, alliant mécanique, électronique, et optique depuis le bureau d'étude jusqu'à la production.





## 110 participants réunis à La Rochelle autour du Smart Building



Lors de la journée « Du bâtiment au territoire intelligent » organisée le 28 juin 2018 par le pôle de compétitivité ALPHA-RLH et le Cluster Eco-Habitat, une vingtaine d'intervenants ont apporté leur expertise et leur vision sur les bâtiments, les quartiers et les territoires connectés de demain.

Trois conférences plénières et une table-ronde prospective animée par l'université de La Rochelle ont abordé les évolutions et les enjeux du bâtiment intelligent.

Puis 5 start-ups de Nouvelle-Aquitaine, dont 3 membres du pôle (Onegates, Panga et Wobility) ont fait un « Pitch » pour présenter leur activité en lien avec les innovations technologiques du bâtiment.

En clôture de cette journée, le site Atlantech a ouvert ses portes aux participants : présentation du projet Parc Bas Carbone de La Rochelle, visite du Lab In'Tech, bâtiment démonstrateur de la réhabilitation, découverte des premières réalisations de bâtiments BEPOS et connectés.

Cette manifestation fait suite à une première édition sur la thématique « Smart Home, Smart Building, Smart City » tenue à Limoges en novembre 2017. Le pôle envisage de poursuivre ce type de rendez-vous en 2019 sur un autre site de la Nouvelle-Aquitaine. À l'occasion de ce premier évènement organisé à La Rochelle, ALPHA-RLH et la Communauté d'Agglomération de La Rochelle ont signé une convention de partenariat/financement qui formalise le soutien aux actions du pôle et au développement de projets d'innovation.

## USA : un plan d'actions avec le French Tech Hub



Le pôle ALPHA-RLH a renouvelé son partenariat avec le French Tech Hub (FTH) permettant un accompagnement commercial et marketing de ses membres sur le marché américain pour l'année 2018.

En 2019, ce partenariat évoluera avec une offre de services revisitée, visant notamment à développer les opportunités business des entreprises (TPME) du pôle. Il concerne trois salons professionnels majeurs : BiOS et Photonics West, dédiés à la photonique, au laser et à l'optique biomédicale, et International Microwave Symposium (IMS), le rendez-vous mondial de l'industrie micro-ondes. Pendant Photonics West à San Francisco en février 2019, le French Tech Hub organisera le « Photonics Fast Pitch Lunch ». Les entreprises à la recherche de fonds ou de partenaires industriels disposeront de 2 minutes pour présenter leurs technologies. L'accompagnement du French Tech Hub consistera en des sessions de préparation au « Pitch » et des workshops pour les exposants membres du pôle. Pour IMS qui se tiendra à Boston en juin 2019, l'organisation d'une journée « Bootcamp » couplée au salon est envisagée dans les locaux du FTH. Au programme : des workshops thématiques (stratégie de vente aux USA, marketing associé...) et des sessions de « mentoring » en B-to-B avec des experts industriels. Le partenariat avec le French Tech Hub s'inscrit dans le cadre de l'action export SIRENA (Stratégie Internationale Régionale des Ecosystèmes de Nouvelle-Aquitaine) soutenue par le Conseil régional.

## VLM Robotics lauréat de l'appel à projets du PIA3 Région

VLM Robotics, adhérent du pôle ALPHA-RLH, possède un savoir-faire singulier sur la robotique agile (dite robotique autonome) qui permet de produire des pièces uniques (sans effet de série) à des cadences industrielles. La société fabrique des cellules robotisées de manufacturing 4.0 pour les industriels, notamment des secteurs de l'aéronautique, du spatial et de la défense (Stelia, Lauak, Airbus Défense and Space...).

Le projet Comp@qt a pour objectif de structurer en Nouvelle-Aquitaine une offre française sur la technologie clé de fabrication additive métal XXL, enjeu prioritaire pour les grands donneurs d'ordre, avec la mise sur le marché d'une machine compacte d'ALM fil (fabrication additive) et la mise en place d'une « Business Unit » dédiée à sa commercialisation. Les secteurs ciblés par le projet concernent les acteurs de l'aéronautique, du spatial, du nautisme, de l'énergie, de la fonderie ou encore de l'outillage industriels... L'entreprise compte actuellement 17 salariés pour un CA de 1,5 M€ et prévoit une croissance à 2 chiffres pour les prochaines années.



### AGENDA

**Mission Partenariale Optique-Photonique**  
21 au 25 octobre à Singapour

**SMART LIVING DAY**  
29 novembre à Limoges

**PHAROS EVENT 2018**  
5 au 7 décembre à Bordeaux

# FORUM DE LA PHOTONIQUE

15 Novembre 2018

9h-18h

Entrée Libre

Jobs  
Interviews

Emplois  
Stages et Thèses

Conférences

Institut d'Optique Graduate School

2 Avenue Augustin Fresnel

91 127 Palaiseau Campus Paris-Saclay

FORUM  
PHOTONIQUE  
EUROPEAN PHOTONICS CAREER FAIR

Photoniques

promotion 2019  
THALES

LE JOURNAL  
DES GRANDES ÉCOLES

EPIC  
European Photonics  
Industry Consortium

promotion 2020  
HGH Infrared  
Systems

Studyrama  
emploi

promotion 2021  
LUMIBIRD  
MORE THAN LASERS

INSTITUT  
d'OPTIQUE  
GRADUATE SCHOOL  
ParisTech

100  
ans



## Un laboratoire commun CNRS / Hitachi High Technologies Corporation

Les relations entre le Centre d'élaboration de matériaux et d'études structurales (CEMES) du CNRS et HHT ont débuté en 2009, alors que le laboratoire cherchait à acquérir un nouveau microscope électronique en transmission (MET) permettant de réaliser des expériences impossibles avec les instruments conventionnels : les ingénieurs d'HHT ont modifié un de leurs produits et mis au point une « plateforme d'optique électronique » inédite. Les deux partenaires ont poursuivi leurs relations, tout

d'abord autour d'un contrat de collaboration visant à valoriser cet instrument. Une équipe du CEMES a mis au point en parallèle une source cohérente d'électrons ultra-rapide, testée avec succès sur une ancienne génération de microscope d'HHT, faisant de ce prototype le premier MET ultra-rapide cohérent. Le CEMES et HHT décident aujourd'hui de créer un laboratoire commun autour de cette technologie ; la collaboration s'articule autour du transfert de la source d'électrons cohérente vers un

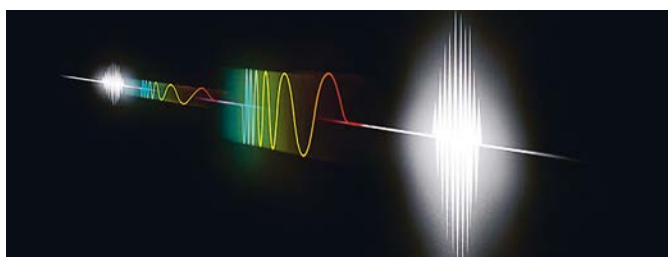
modèle de pointe prêté par HHT dans le cadre de ce nouveau partenariat. La technologie baptisée FemtoTEM, pourra être intégrée à un MET moderne avec de nouveaux modes d'imagerie, permettant d'étudier des phénomènes physiques - tels que la dynamique des champs électriques, magnétiques ou de contrainte au sein de nanomatériaux - sur des durées de l'ordre de la femtoseconde ( $10^{-15}$  seconde) tout en les observant à l'échelle sub-nanométrique ( $10^{-9}$  mètre).

## Prix Nobel de Physique 2018

Le Prix Nobel de Physique 2018 a été attribué à Gérard Mourou, professeur et membre du Haut-collège de l'École polytechnique, ainsi qu'à la canadienne Donna Strickland avec qui il a élaboré une méthode de génération d'impulsions optiques ultra-courtes de haute intensité.

Gérard Mourou est un pionnier du développement des lasers au niveau mondial. Après avoir passé une grande partie de sa carrière aux Etats-Unis, particulièrement à l'Université du Michigan dont il est aujourd'hui professeur émérite, il a dirigé le Laboratoire d'optique appliquée (une UMR ENSTA ParisTech/CNRS/École polytechnique) de 2005 à 2008. Il est à l'origine de trois initiatives majeures en matière de lasers de puissance : le lancement du projet XCAN à l'École polytechnique, du laser Apollon sur le plateau de Saclay et de la grande infrastructure européenne ELI (Extreme Light Infrastructure) qui abritera les lasers les plus puissants du monde en Hongrie, Roumanie et en République Tchèque. Il est également directeur de IZEST (International Zetta-Exawatt Science and Technology) auquel sont associés plus de 27 laboratoires à travers le monde pour anticiper l'avenir des lasers de haute puissance.

Ses travaux ont largement contribué à l'avancement de la science dans plusieurs domaines de la physique en permettant notamment de fabriquer des lasers de plus en plus intenses pour sonder la matière. Cette technique, adaptée au médical, a permis des avancées nouvelles dans le domaine de la chirurgie réfractive de l'œil et de la cataracte.



### EN BREF

Des chercheurs de l'Institut Femto-ST et de la Tampere University of Technology ont réalisé un dispositif expérimental permettant d'étudier les **mécanismes de génération d'impulsions laser ultra courtes**. Une première, qui devrait faciliter la conception de sources laser plus performantes, et apporter des réponses à des questions de physique fondamentale. P. Ryczkowski et al., *Nature Photonics*, <https://doi.org/10.1038/s41566-018-0106-7>

Les sources de rayonnement idéales sont très recherchées en spectroscopie : leur rayonnement est maîtrisé au point de suivre des modèles simples basés sur les lois statistiques d'équilibre. Des chercheurs du laboratoire Lasers, plasmas et procédés photoniques, du NILPRP (Roumanie), de l'université allemande de Wildau (Allemagne) et de l'université de Belgrade (Serbie) ont ainsi développé une **source plasma idéale**. J. Hermann et al., *Phys. Rev. E*, <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.96.053210>

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

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

[www.spectros.ch](http://www.spectros.ch)

**SPECTROS  
OPTICAL SYSTEMS**

## Témoignage d'entrepreneur : Christian Merry, Laser Components

Les innovations nées de la photonique sont présentes partout dans notre vie quotidienne, dans les laboratoires de recherche, et sur les chaînes de production ou de contrôle des industriels. Certaines innovations débouchent sur une activité économique, et deviennent un moteur de création et de développement des entreprises. Dans ce numéro, nous interviewons Christian Merry, directeur général de Laser Components.

### Photoniques : Pouvez-vous décrire votre produit en 3 mots-clés ?

Il est toujours restrictif de se présenter en trois mots-clés, je dirais cependant que les activités de base de Laser Components sont le développement, la production et la vente des composants optiques et optoélectroniques avec un fort accent sur les développements clients. La gamme de produits est très large et comprend des photodiodes, y compris les composants IR, laser (diodes), dispositifs de mesure, des optiques et leurs traitements, ainsi que des fibres optiques.

Les trois quarts de nos activités sont réalisés avec les produits que nous concevons et fabriquons.

Nous sommes également distributeur de sociétés étrangères reconnues dans leurs domaines respectifs.

### Pouvez-vous décrire la genèse du concept-phare ou de l'idée-phare ?

La force de Laser Components réside principalement dans nos installations de production entièrement distinctes (par exemple les optiques laser, les photodiodes avalanche, ou les diodes lasers pulsées) et donc l'énorme savoir-faire technologique local, combiné avec la structure de nos équipes de R&D, qui fonctionnent sur un mode collaboratif interdépartemental. Lors des développements des nouveaux produits, nous pouvons compter sur l'expertise de spécialistes dans des domaines très différents. Pour donner un exemple : en seulement un an, 5 départements ont travaillé ensemble pour développer nos compteurs de photon COUNT qui vous ont été présentés dans le précédent numéro de Photoniques ; et juste une année plus tard, ces produits étaient intégrés par des clients internationaux dans leurs équipements.



### Pouvez-vous dire un mot sur la genèse de l'entreprise (comment passer de l'idée au produit) ?

Un avantage déterminant de Laser Components est d'être à la fois fabricant et distributeur, avec une parfaite connaissance des deux métiers, et ce depuis plus de 35 ans. Avec nos ingénieurs, nous cherchons à offrir le conseil le plus pertinent en tant que leader technologique, nous connaissons les besoins de nos clients, et nous pouvons estimer la faisabilité des nouveaux produits. Les produits OEM constituent notre ADN. Nous proposons des développements de nouveaux produits surtout pour nos

propres fabrications mais également pour les produits de nos fournisseurs. Nos fabrications s'étendent depuis le produit unique jusqu'à des séries complètes selon les caractéristiques des clients. Du développement à la production de série, une source, un partenaire unique.

### Quel est le marché identifié (taille, lieu géographique, public ciblé, marché existant et/ou à construire) ?

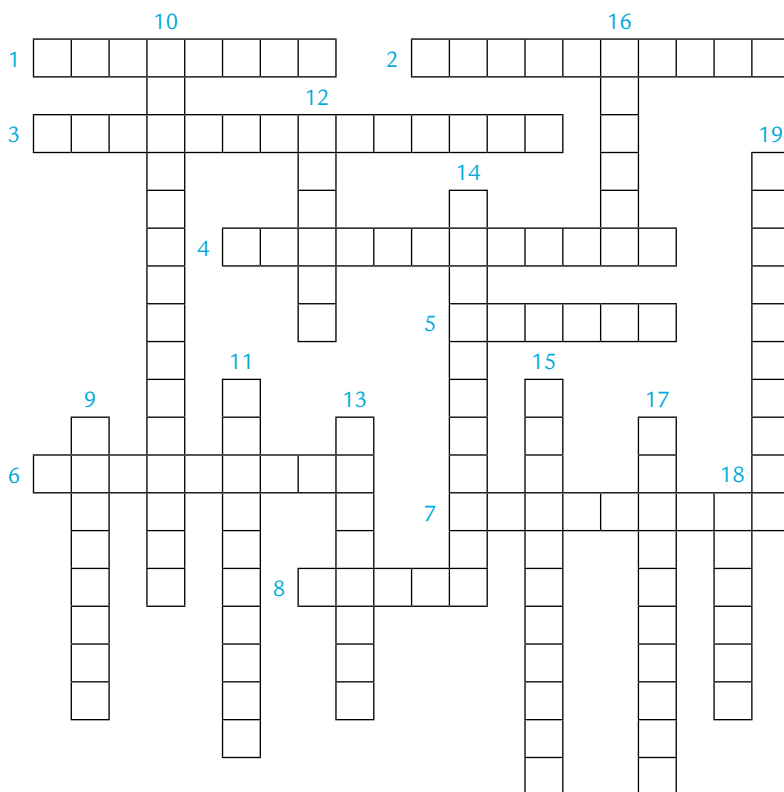
Le marché est très large – et si la photonique a été identifiée par l'Union Européenne comme l'une des technologies-clés du 21<sup>e</sup> siècle, ce n'est bien sûr pas par hasard. Ainsi notre clientèle est extrêmement diversifiée. Acteurs de la recherche, de la défense et clients industriels

constituent le cœur de notre portefeuille clients. Une tendance se dessine, celle des séries de plus grands volumes tirée en particulier par le LIDAR et les composants pour les véhicules autonomes. Ces nouvelles applications associées à de nouvelles exigences nous ont également conduits à monter dans la chaîne de valeur et c'est ainsi que nous avons obtenu la qualification environnementale et opérationnelle pour les applications automobiles AEC-Q101 en 2017.

### Quel est le paysage concurrentiel (France et étranger) ?

Comme déjà évoqué plus haut : dans chaque domaine nous avons des concurrents différents, et l'offre est plutôt importante, mais vous trouvez difficilement des sociétés avec le même portfolio de produits étant fabricant et distributeur en même temps. Grâce à nos filiales et nos distributeurs, nous sommes présents dans plus de 20 pays dans le monde, la collaboration à l'intérieur du groupe LC est un avantage exceptionnel.

## MOTS CROISÉS



- 1 Le roi de la focalisation.
- 2 Il mesure des angles.
- 3 Il fait de jolies franges.
- 4 Dispersez-vous !
- 5 Une optique très pointue !
- 6 Il monte d'un étage.
- 7 Il rapproche les étoiles.
- 8 Elle traverse les océans.
- 9 Un cheveu bien peigné.
- 10 Il module vite !
- 11 Il voit grand.
- 12 Il est souvent blazé.
- 13 Verte, blonde ou noire.
- 14 Il mesure notre activité.
- 15 Rentre dans le rang et marche droit.
- 16 Dis-moi, suis-je la plus belle ?
- 17 Séparer pour mieux régner.
- 18 Wollaston, Nomarsky ou Rochon ?
- 19 Ceux de Fresnel nous font tourner la tête.

La solution sur [photoniques.com](http://photoniques.com)

## SOCIÉTÉS

• **IDIL Fibres Optiques** accueille Alain Breteau : avec 30 ans d'expérience dans la vente de composants électromécaniques et électroniques, son rôle sera de consolider l'équipe technico-commerciale sur la moitié nord de la France.

• **Wavetel** annonce un partenariat avec la société coréenne Fiberpro pour la distribution des produits de la gamme Photonic Solutions : composants optiques (*polarization*

*controller, phase modulator...*) et instruments de mesure (source ASE, *PER meter, PDL meter, polarization controller & scrambler...*).

• **Aurea Technology** propose une nouvelle prestation de bureau d'étude, destinée aux entreprises technologiques et incluant l'accès à un panel de compétences ainsi qu'un accompagnement de la phase de rédaction du cahier des charges jusqu'à l'industrialisation en petite et moyenne série.

## 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](mailto:sales.uk@spectrogon.com) • Tel +44 1592770000  
 Sweden (headquarters): [sales.se@spectrogon.com](mailto:sales.se@spectrogon.com) • Tel +46 86382800  
 US: [sales.us@spectrogon.com](mailto:sales.us@spectrogon.com) • Tel +1 9733311191

[www.spectrogon.com](http://www.spectrogon.com)

## ELC : une nouvelle conférence est née !

Visant à rassembler les spécialistes européens de la communauté LIDAR entre deux éditions de la conférence internationale ILRC (International Laser Radar Conférence), ELC 2018 (European Lidar Conférence) a eu lieu pour la première fois du 3 au 5 juillet à Thessalonique en Grèce.

« Il nous fallait une occasion spécifique de regrouper notre communauté européenne LIDAR pour approfondir nos discussions techniques et partager nos dernières avancées » justifiaient les organisateurs qui privilégient une réunion abordable et conviviale.

Dans le domaine environnemental, la technique LIDAR (*light detection and ranging*) est une technique déportée permettant de



mesurer la composition de l'atmosphère sur des longues distances, de plusieurs centaines de mètres à plusieurs dizaines de kilomètres. Embarqués ou installés au sol, les systèmes LIDAR, en forte expansion, permettent de réaliser des mesures météorologiques, de température et d'humidité, mesures de vents ou de poussières.

Pour cette première édition, 160 participants Grecs, allemands, anglais, italiens, espagnols, russes, français et roumains se sont donc retrouvés au cours de sessions plénières, exposés oraux, sessions posters ou autour d'un verre. Après avoir réalisé un bilan des grandes missions européennes et des projets spatiaux, les experts ont partagé leurs expériences et difficultés en matière d'incertitudes de mesures. Leurs débats visaient à parfaire la technique afin de la déployer plus largement dans le domaine du contrôle environnemental et industriel pour monitorer les gaz à effet de serre, les principaux aérosols dans les différentes couches de l'atmosphère, les fuites de gaz etc. Prochaine édition en 2020 !

Emilie Colin

## NFO15

La 15<sup>e</sup> édition de la conférence internationale Near Field Optics s'est tenue à Troyes du 26 au 31 août 2018. C'est la première fois, depuis la première édition organisée en 1992 à Besançon, que cette conférence revenait en France. Cette édition a été particulièrement réussie puisqu'elle a réuni plus de 450 participants.

Cette conférence est traditionnellement précédée par une école le dimanche, qui a réuni 5 intervenants présentant des cours en nanophotonique devant 250 participants. Les thématiques abordées lors de cette conférence ont porté entre autres sur la nano-optique quantique, les métasurfaces, les matériaux 2D, la plasmonique, la nano-thermique... Les sessions plénières ont été l'occasion de découvrir les thématiques

émergentes en recherche et développement autour de la nanophotonique. Parmi l'ensemble des techniques avancées, les optimisations algorithmiques de structures photoniques ont montré des résultats remarquables et les calculs de fonctions mathématiques par des composants optiques ont particulièrement attiré l'attention des participants.

Nicolas Bonod



## METANANO 2018

La troisième édition de la conférence METANANO s'est déroulée du 17 au 21 septembre 2018 dans la ville de Sochi, sur les bords de la mer Noire.



Initiée il y a 2 ans, cette conférence se déroule chaque année dans une ville différente en Russie. La première édition s'était tenue à Anapa et avait attiré 100 participants, la seconde organisée à Vladivostok avait réuni quant à elle 250 participants. Cette troisième édition a réuni plus de 350 participants et cette conférence semble encore appelée à prendre de l'ampleur. Des conférences plénières ont été données par des conférenciers internationaux, comme notamment le prix Nobel de chimie 2010 Andre Geim, Sochi est (il est vrai) sa ville natale, mais également Stefan

Maier de l'impérial collège de Londres ou encore Javier Garcia de Abajo de ICFO à Barcelone. Des sessions spéciales ont été organisées au cours de cette semaine autour notamment des métamatériaux pour les IRM, des métasurfaces non linéaires, des nanostructures photoniques diélectriques ou encore de l'optique quantique et des sources de photons uniques. L'objectif affiché de la conférence est d'établir des collaborations internationales, notamment avec les groupes de recherche russes.

Nicolas Bonod

## L'optique photonique en Bourgogne Franche Comté

Discrète au premier abord, la région Bourgogne Franche Comté abrite de solides fleurons de l'optique photonique française. La recherche n'est pas en reste, avec des laboratoires prolifiques. Et pour achever ce tableau, des plates-formes mutualisées de haute technologie offrent un appui précieux au transfert.

Renommée pour son savoir-faire dans les usinages de haute précision, la région Bourgogne Franche Comté ne figure pas sur le podium des grandes régions photoniques, et ne possède pas de pôle de compétitivité régional pour doper sa notoriété. Cependant elle n'en abrite pas moins des entreprises en pointe dans leur spécialité, et qui figurent en bonne place sur le devant de la scène photonique française. En voici un rapide panorama.

Fabricant français de lasers industriels depuis 1975, **Laser Cheval** s'est spécialisé dans la conception et la réalisation de machines de micro usinage. La société a déjà installé plus de 1000 machines dans le monde entier, dans tous les domaines d'applications.

Créée au début des années 2000 par des chercheurs du CNRS et de l'Université de Besançon, **ixblue Photonics** est implantée à Besançon où elle conçoit et fabrique modules optiques et RF, avec capacité de production supportée notamment par 300 m<sup>2</sup> de salles blanches et un laboratoire de métrologie. La société a absorbé en 2013 le fournisseur de composants optiques **Phonline Technologies**.

Les microcomposants optoélectroniques et piézoélectriques de **Crystal Device**, issue de l'Institut Femto-ST, entrent dans les domaines d'applications des télécommunications, des lasers, de la défense et des systèmes embarqués ; la société, lancée en 2011, s'est également spécialisée depuis 2015 dans les microsystèmes de récupération d'énergie.

**Lovalite** conçoit et fabrique depuis 2004 des systèmes et composants micro-optiques et des instruments pour les nanotechnologies, avec en particulier, une expertise dans la microscopie à

sonde locale pour l'analyse de surface, ou les circuits intégrés photoniques.

Créée en 2010 à l'initiative du laboratoire Femto-ST, **AUREA Technology** développe, fabrique et commercialise des instruments de mesures optiques basés sur des technologies de comptage de photons, capables de détecter de très bas niveaux de lumières, avec des applications dans la mesure de temps de vie d'éléments biologiques, la cryptographie quantique ou l'analyse de fautes dans les semiconducteurs.

**Digital Surf** a concentré son savoir-faire sur le concept logiciel Mountains, décliné à différents types d'instruments, et choisi par de nombreux fabricants de profilomètres et de microscopes (récemment, Hitachi High Technologies et Carl Zeiss).

Le centre de fabrication de **Safran Electronics & Defense** est implanté à Dijon.

Créée en 2002 après avoir remporté le Concours National à la Création d'Entreprises Innovantes organisé par OSEO (aujourd'hui BPI France), **Optec Industries** conçoit des systèmes de contrôle qualité par voie optique, développe et met au point des technologies pour l'analyse d'état de surface et élabore des systèmes de robotisation intelligente pour des domaines variés : marché du luxe (horlogerie, joaillerie), médical, défense, semi-conducteur...

### Des plates-formes pour la recherche et le transfert

La région dispose de deux instituts de recherche de premier plan : le **Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne** (ICB), qui

## Optran® UV NSS Fibre Silice/silice avec un revêtement carbone hermétique



Ceram Optec® est heureux de proposer un nouveau produit pour la gamme spectrale UVC. Amélioration de la résistance à la solarisation avec une grande stabilité pour la fibre UV NSS ouvrant une grande variété d'applications. C'est le meilleur choix pour les applications incluant la spectroscopie, le diagnostic médical, les nouvelles technologies médicales, les systèmes laser et bien d'autres encore.

Venez nous rendre visite sur  
le stand de OBS FIBER

ENOVA – Stand H25  
23 ET 24 OCTOBRE 2018  
Paris



CeramOptec® GmbH  
Brühler Str. 30 | 53119 Bonn | Allemagne  
Tél.: +49.228.979 670 | sales@ceramoptec.com  
www.ceramoptec.com

est particulièrement actif en optique photonique ; et l'**Institut FEMTO-ST**, qui est une unité mixte de recherche placée sous la quadruple tutelle de l'université de Franche-Comté (UFC), du CNRS, de l'École Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques (ENSM) et de l'Université de Technologie Belfort-Montbéliard (UTBM).

Pour le transfert de technologie, l'université de Bourgogne s'appuie sur sa structure privée de valorisation, **Welience** ; en Franche-Comté, une « business unit », **Femto Engineering**, assure le prolongement industriel des activités de recherche de l'Institut FEMTO-ST.

Ainsi, que ce soit pour la R&D, le transfert, ou pour offrir des prestations aux industriels, la région peut compter sur une large proposition d'équipements mutualisés, non limités à la recherche fondamentale.

Le Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne (ICB) compte plusieurs plates-formes technologiques :

- **ARCEN** (Applications, Recherches et Caractérisation à l'Echelle Nanométrique), appuyée par le CNRS et le CEA, offre des moyens de caractérisation de la matière condensée, et des capacités de micro/nano-fabrication en salle blanche ;
- **PICASSO** est centrée sur l'étude des communications optiques ultra rapides ;
- **FLAIR** (frittage et lasers : applications, innovation et recherche) est dédiée à la métallurgie : métallurgie des poudres, applications des lasers de puissance, science des matériaux.

Femto Engineering, qui a finalisé en 2017 une plateforme d'usinage laser femtoseconde par faisceaux de Bessel assurant des précisions d'usinage submicronique, s'appuie sur la plateforme mutualisée **MIMENTO** (Microfabrication pour la MEcanique, les Nanosciences, la Thermique et l'Optique), dotée de 1400 m<sup>2</sup> de salle blanche et identifiée au niveau national en tant que centrale de référence en Micro-Nano-Optique, Micro-Nano-Acoustique, Microsystèmes Opto-Electro-Mécaniques (MOEMS)

et micro-robotique dans le cadre du réseau RENATECH (LTM (Grenoble), le C2N (Orsay / Marcoussis), l'IEMN (Lille), le LAAS (Toulouse), FEMTO-ST (Besançon), CEA-LETI (Grenoble)).

La plateforme technologique **FRI-LIGHT** (Formation-Recherche-Innovation par la Lumière) de l'Institut Femto ST a quant à elle vocation à offrir à la recherche, à l'enseignement supérieur et aux organismes de transfert technologique, un ensemble mutualisé d'équipements, d'instrumentation et de savoirs-faire en photonique, complété par des ressources spécifiques en modélisations électromagnétiques complexes.

### Une offre de formation dynamique

À l'image de sa performance dans les domaines de recherche, la Communauté d'universités Bourgogne Franche-Comté (UBFC) dispense plusieurs formations d'excellence, dont certaines font appel aux plate-formes technologiques citées plus haut.

- Au sein de l'université de Franche-Comté, la Licence professionnelle instrumentation optique et nano

photonique, ainsi que le Master photonique, micro & nanotechnologie, temps fréquence (PICS, labellisé par le réseau Figure – [www.reseau-figure.fr](http://www.reseau-figure.fr)).

- Le Master optique – nanosciences – lasers de l'université de Bourgogne, adossé au laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne (ICB).

Citons aussi le BTS Systèmes photoniques du lycée Victor Bérard de Morez (Doubs), dont les diplômés sont toujours recherchés par les entreprises du secteur.

À l'UBFC, l'Institut Femto ST et le laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne par ailleurs associés depuis 2010 dans un projet de recherche labellisé LABEX (laboratoire d'excellence), ont lancé en 2017 un projet de grande école baptisé EIPHI (Engineering and Innovation through Physical sciences High technologies and cross-disciplinary research: eiΦ), doté d'un budget de 14 M€ sur 10 ans, et qui proposera des cursus internationaux de MsC (master) et PhD (doctorat) dans les domaines d'expertise des deux laboratoires.

V.C.

#### LIENS UTILES

##### ENTREPRISES

- AUREA Technology : [www.aureatechnology.com](http://www.aureatechnology.com)
- Crystal Device : [www.crystaldevice.com](http://www.crystaldevice.com)
- Digital Surf : [www.digitalsurf.com](http://www.digitalsurf.com)
- ixblue Photonics : <https://photonics.ixblue.com>
- Laser Cheval : [www.lasercheval.fr](http://www.lasercheval.fr)
- Loyalite : <https://loyalite.com>
- Optec Industries : [www.optec-industries.com](http://www.optec-industries.com)
- Safran Electronics & Defense : [www.safran-electronics-defense.com](http://www.safran-electronics-defense.com)

##### RECHERCHE

- Le Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne : <http://icb.u-bourgogne.fr/fr/>
- L'Institut FEMTO-ST : <https://www.femto-st.fr/fr>

##### TRANSFERT

- Femto Engineering : <http://www.femto-engineering.fr>
- Welience : <http://www.welience.com/>

##### FORMATION

- La Communauté d'universités Bourgogne Franche-Comté (UBFC) : [www.ubfc.fr](http://www.ubfc.fr)
- L'université de Bourgogne : <http://www.u-bourgogne.fr/>
- L'université de Franche-Comté : <http://www.univ-fcomte.fr/>
- Le BTS Systèmes photoniques : [www.lyceemorez.fr](http://www.lyceemorez.fr)
- EIPHI : <http://gradschool.eiphi.univ-bfc.fr/>





## Bourgogne Franche-Comté : un nouvel espace d'excellence en photonique

L'Université Bourgogne Franche-Comté (UBFC) est une Communauté d'universités et d'établissements d'environ 60 000 étudiants, située au Centre-Est de la France et étendue sur 13 sites. Les membres fondateurs sont : l'université de Bourgogne (uB), l'Université de Franche-Comté (UFC), l'Université de Technologie Belfort-Montbéliard (UTBM), l'École Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques (ENSM, Besançon), AgroSup Dijon, Burgundy School of Business (BSB, Dijon) et l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM, Cluny). Cet ensemble constitue un puissant levier pour accroître l'attractivité territoriale en stimulant le développement socio-économique et culturel de la Région Bourgogne - Franche-Comté.

### Une longue tradition en recherche de pointe pour le développement des connaissances fondamentales et technologiques en optique et photonique.

Parmi les membres fondateurs UBFC, le laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne (ICB) et l'institut FEMTO-ST sont des acteurs majeurs de la photonique. Le Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne (ICB), unité mixte de

recherche du CNRS et de l'Université de Bourgogne, rassemble des physiciens, chimistes et ingénieurs répartis sur les sites de Dijon, du Creusot et de Châlon-sur-Saône, qui imaginent les fonctions optiques et les matériaux de demain dans les domaines de l'industrie, de la médecine ou des télécommunications. Le département Optique de l'Institut FEMTO-ST développe de nouveaux concepts de propagation lumineuse, d'interactions lumière-matière et de fonctions optiques avancées, de l'amont jusqu'aux applications et à l'éclosion de startups. Ces deux laboratoires s'appuient sur des plateformes technologiques très performantes : microscopies optiques et électroniques, spectroscopies, élaboration de fibres optiques, nanofabrication de composants opto-électroniques, caractérisation de la matière et de fonctionnalités optiques. En optique, les spécialités reconnues internationalement sont l'optique non linéaire, les lasers à fibres, les solitons, les supercontinuum, les fibres infrarouges, la manipulation des molécules par lasers intenses et ultracourts, la nanophotonique (optique intégrée sur niobate de lithium, puce photonique sur silicium), les nanocapteurs, la plasmonique, l'information quantique fréquentielle ou spatiale, la manipulation spatiale de laser fs, le calcul optique neuromorphique. Les travaux vont du fondamental à l'appliqué, de la théorie à l'expérience.

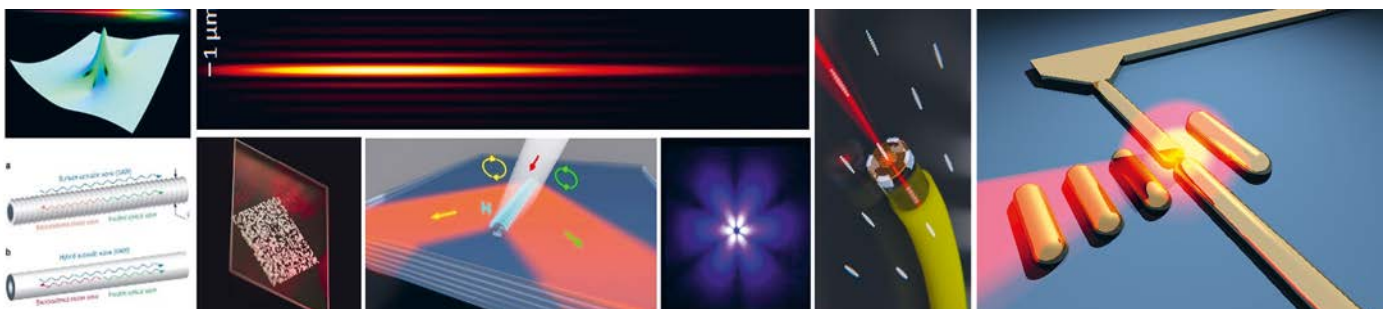
ICB développe également des sources lasers pour applications industrielles : marquage, chirurgie, défense, géologie, tri des déchets.

### Une formation d'excellence par et pour la recherche

EIPHI (Engineering and Innovation through Physical sciences, High technologies and cross-disciplinary research) est une école universitaire de recherche (graduate school) d'UBFC qui coordonne cinq parcours de *Master of science* et délivre le grade de docteur (*PhD*) en *Physics, Maths & Applications* (photonique, technologies quantiques, physique des trous noirs, ...), *Energy, Computer Science, Smart Systems & Structures, Material Science*. Ces formations intègrent des cours spécialisés par des experts (chercheurs, industriels, ...) et s'appuient sur les instruments des laboratoires de recherches et leurs plateformes technologiques.

#### CONTACTS

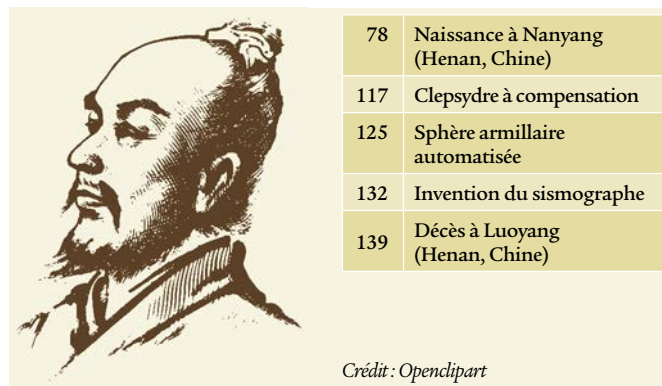
[www.ubfc.fr/](http://www.ubfc.fr/)  
[secretariat@ubfc.fr](mailto:secretariat@ubfc.fr)  
<http://icb.u-bourgogne.fr>  
[dir-secretariat@icb.cnrs.fr](mailto:dir-secretariat@icb.cnrs.fr)  
[www.femto-st.fr](http://www.femto-st.fr)  
<http://gradschool.eiphi.univ-bfc.fr/>  
[gradschool.eiphi@ubfc.fr](mailto:gradschool.eiphi@ubfc.fr)



# Zhang Heng 张衡

Astronome, mathématicien, ingénieur et poète chinois, Zhang Heng a vécu pendant la dynastie Han qui régna sur la Chine de 206 avant J.-C. à 220 après J.-C. Il est connu pour sa connaissance étendue des engrenages et de la mécanique, et pour avoir inventé le premier sismographe, ainsi que la sphère armillaire à énergie hydraulique pour représenter les observations astronomiques. Il a également perfectionné la clepsydre, et amélioré les calculs chinois de la formule du nombre  $\pi$ .

Riad HAIDAR, [haidar@onera.fr](mailto:haidar@onera.fr)



Zhang Heng (qui est parfois orthographié Chang Heng ou Tchang Heng) naît en l'an 78 dans la ville de Xi'e, localisée au nord de Nanyang, une des grandes villes de la province du Henan. Le Henan, au centre-Est de la Chine, est considéré comme le berceau de la civilisation chinoise avec plus de 3000 ans d'histoire. Zhang Heng est issu d'une grande famille. Son grand-père, Zhang Kan, a été gouverneur d'une commanderie et l'un des leaders qui ont appuyé la restauration de la dynastie Han par l'Empereur Han Guang Wudi.

Zhang Heng grandit donc sous la dynastie Han, pendant le règne de l'empereur Han Zhangdi qui a installé sa capitale à Luoyang. C'est une période de forte influence et de prospérité pour la Chine, avec l'essor de la route de la soie qui s'accompagne d'un développement des connaissances et des échanges intellectuels avec l'Inde, voire avec d'autres contrées encore plus éloignées. Sous le règne des Han, on invente le papier, on développe les horloges hydrauliques et les cadrans solaires, on tient à jour les calendriers... Mais en 88, c'est le décès du père de Zhang. Le jeune garçon est laissé aux soins de sa mère et de sa grand-mère. Il vient d'avoir 10 ans. Il est éduqué selon les préceptes du Confucianisme, et se rompt aux subtilités de la littérature chinoise.

Quelques années plus tard, Zhang quitte la demeure familiale pour poursuivre ses études dans les universités de Xi'an (la capitale de la province du Shaanxi) et de Luoyang, au plus proche du pouvoir. Il acquiert ainsi une très bonne connaissance des textes classiques, et se lie d'amitié avec plusieurs personnages importants, tels que le mathématicien et calligraphe Cui Yuan [78-143] ou les philosophes Ma Rong [79-166] et Fu [78-163]. À l'issue de ses études, à l'âge précoce de 23 ans, on lui propose des postes dans plusieurs officines gouvernementales, y compris au sein des prestigieuses *Trois Excellences* qui forment le corps des plus proches conseillers de l'empereur. Mais il décline ces propositions et décide de rentrer à Nanyang, avec le titre d'*Officier du Mérite*, travaillant comme maître des documents sous l'administration du Gouverneur Bao De.

À ce poste, il est responsable du recrutement local à l'office, ainsi que des recommandations pour les candidats qui briguent un office plus élevé à la capitale. Il consacre son temps libre à composer des poèmes, qui lui valent une grande renommée et une solide estime au sein de la haute société ; certaines de ses œuvres (le *Chou Shi* et le *Gui Fu*, notamment) font aujourd'hui partie du patrimoine culturel chinois. Lorsqu'en 111, Bao De est appelé à la capitale Luoyang pour servir comme ministre des finances, Zhang retourne dans sa ville natale de Xi'e et y poursuit son travail littéraire. C'est également à cette époque qu'il s'impose des périodes de retraite qui l'isolent de tout contact, et cours desquelles il entame ses premières réflexions sur de vastes sujets scientifiques, loin de ses préoccupations habituelles et sur des sujets aussi vertigineux que la nature de l'univers ou le calcul du nombre  $\pi$ . Mais c'est plus qu'un loisir, et Zhang Heng est loin de se comporter en amateur : dès 108, il met par écrit ses premiers résultats en astronomie et en mathématiques.

## Astronome impérial

Ses travaux sont remarqués par l'empereur Han Andi qui l'invite à se joindre à sa cour en 112, et le nomme Astronome Impérial en 115. Ce poste lui confère un prestige formidable. En effet, dans la Chine ancienne, l'empereur est supposé recevoir son droit de gouverner du ciel et c'est à l'astronome qu'il revient d'établir le lien entre l'empereur et les astres, notamment via la mise à jour et les réformes du calendrier en fonction des nouvelles observations astronomiques. En plus d'enregistrer les observations et présages célestes, de préparer le calendrier, et d'estimer les jours favorables (ou néfastes), Zhang est aussi chargé de superviser les épreuves littéraires destinées aux candidats du Secrétariat Impérial et du Censorat.

Toutefois, il prend à différentes occasions des positions qui finissent par l'isoler au sein de la cour. Ainsi, lorsque l'officiel du gouvernement Dan Song propose de réformer le calendrier en 123, Zhang émet un certain nombre de



réserves sur des informations qu'il estime discutables, et s'oppose fermement à leur intégration dans le nouveau calendrier... Son intransigeance sur le calendrier, ainsi que sur certaines questions d'histoire, fait de Zhang une figure controversée à la cour, ce qui l'empêche d'obtenir le poste (qu'il ambitionne) d'historien officiel de l'empereur. Cependant, ce revers ne l'empêche pas d'être de nouveau reconduit au poste d'Astronome Impérial en 126, lors de l'avènement du nouvel empereur Han Shundi – mais ce ne sera pas sans mal : sa rémunération est de seulement 600 boisseaux de grains, soit le salaire le plus bas pour un poste au gouvernement central...

## Travaux et découvertes

On doit à Zhang Heng de nombreux résultats majeurs. Il s'intéresse à la formule de  $\pi$ , qui lui sert à comparer la circonférence du cercle céleste au diamètre de la terre, et dont il donne la valeur approximative  $\sqrt{10}$  (ou 3,162) à partir de considérations sur les volumes de cubes inscrits dans des sphères. Quelques siècles plus tard, son algorithme permettra à Liu Hui d'obtenir une valeur plus précise de  $\pi$  (3,14159).

Zhang acquiert très tôt une connaissance étendue des engrenages et de la mécanique. Dès 117, il perfectionne la clepsydre à remplissage, qui était un système de mesure du temps très utilisé en Chine ancienne. Ce système ingénieux souffre toutefois d'une baisse du débit (et donc d'une dérive de la mesure du temps) au fur et à mesure que le réservoir initial se vide. Zhang parvient à résoudre ce problème en ajoutant un réservoir de compensation, qui permet maintenir un niveau d'eau constant dans la clepsydre. Notons qu'à Alexandrie, l'ingénieur Ctésibios mit en œuvre la même idée à quelques siècles d'intervalle. En 125, Zhang utilise cette clepsydre plus précise pour automatiser le mouvement des sphères armillaires<sup>1</sup>, qui sont si utiles à son travail d'astronome.

Mais c'est en 132 que Zhang Heng présente à la cour des Han ce qui est considéré comme son invention la plus marquante, le premier sismographe : un instrument qui permet de détecter les tremblements de terre à distance, et d'indiquer la direction où ils se sont produits. Les séismes sont en effet un phénomène d'importance majeure dans la Chine ancienne, à cause évidemment de leur pouvoir destructeur, mais aussi parce qu'ils sont considérés comme une punition des dieux en cas de mauvaise gestion du pays. De façon plus pragmatique pour le gouvernement, la possibilité de les détecter permet d'envoyer de l'aide et des vivres aux régions dévastées.

Selon les Annales du Livre des Han, compilées par Fan Ye au 5<sup>e</sup> siècle, le sismographe de Zhang se présente sous la forme d'une urne avec un balancier. Il est rapporté qu'il a détecté un tremblement de terre en février 138 et, bien



Une réplique du sismographe de Zhang Heng, exposée au Chabot Space and Science Center à Oakland, Californie.

qu'aucune secousse n'ait été ressentie à Luoyang, Zhang a décidé d'en informer l'empereur, en précisant même que le tremblement de terre s'est produit à l'ouest de la capitale de l'empire. Zhang prenait ainsi un risque politique fort. Mais, quelques jours plus tard, plusieurs courriers urgents arrivent, et confirment qu'un terrible tremblement de terre s'est produit à quelques centaines de kilomètres au Nord-Ouest, dans la province du Gansu. Le succès de son instrument permet à Zhang Heng d'asseoir puissamment sa notoriété scientifique et technique à la cour.

## Ultima Verbae

L'héritage scientifique et technique de Zhang Heng est considérable. Ses inventions mécaniques seront une source d'inspiration pour des générations d'inventeurs, de Chine ou d'ailleurs. Ainsi, sa sphère armillaire à mouvement hydraulique, combinant roue à aubes et clepsydre à réservoir, influencera la conception des premières horloges à eau chinoises. De même, son sismographe à balancier inspirera les sismologues modernes.

Au début des années 130, au terme d'une rivalité politique qui l'oppose aux eunuques du palais, il décide de se retirer de la cour centrale pour servir comme gouverneur de la ville de Hejian dans la province du Hebei, au Nord du Henan. Il retourne à Nanyang pour un court laps de temps, avant d'être rappelé à la cour de Luoyang en 138. Il meurt une année plus tard, en 139, à l'âge de 61 ans.

### POUR EN SAVOIR PLUS

- [1] J.J. O'Connor, E.F. Robertson, *MacTutor History of Mathematics* (2003)  
 [2] R. Temple, *The Genius of China: 3000 Years of Science, Discovery, and Invention* (Simon and Schuster, 1986)

<sup>1</sup> Un instrument astronomique représentant la sphère céleste, inventé par Ératosthène au 3<sup>e</sup> siècle avant JC et perfectionné par des générations d'astronomes chinois.

# CIRCUITS INTÉGRÉS photoniques silicium

Laurent VIVIEN<sup>1</sup>, Delphine MARRIS-MORINI<sup>1</sup>, Eric CASSAN<sup>1</sup>, Carlos ALONSO-RAMOS<sup>1</sup>, Charles BAUDOT<sup>2</sup>, Frédéric BCEUF<sup>2</sup>, Bertrand SZELAG<sup>3</sup>,

<sup>1</sup> Centre de Nanosciences et Nanotechnologies (C2N), CNRS, Université Paris Sud, Université Paris Saclay, UMR9001, 91400 Orsay

<sup>2</sup> STMicroelectronics SAS, 850 rue Jean Monnet, 38920 Crolles

<sup>3</sup> CEA, LETI, Minatec Campus, 17 rue des Martyrs, 38054 Grenoble

[laurent.vivien@c2n.upsaclay.fr](mailto:laurent.vivien@c2n.upsaclay.fr)

La photonique silicium suit la devise : « plus petit, moins cher, plus rapide », comme la microélectronique plusieurs années auparavant, en exploitant une intégration à très grande échelle des composants et circuits intégrés de plus en plus complexes. L'incroyable évolution des systèmes communicants avec en particulier le déploiement des réseaux Internet et mobiles, des objets connectés et des capteurs a fait émerger la photonique silicium pour répondre à ces nouveaux enjeux majeurs.

Le silicium (Si) est l'un des matériaux qui ont radicalement changé le monde scientifique, technologique et sociétal à partir de l'invention du transistor en 1947. L'extraordinaire évolution vers la miniaturisation des transistors et l'augmentation de leur nombre pour la réalisation de circuits intégrés et fonctions complexes ont conduit au développement de l'industrie de la microélectronique et de ses multiples applications résultantes. Cette évolution a principalement suivi la « loi de Moore », énoncée par Gordon Moore en 1965, prévoyant une augmentation exponentielle du nombre de transistors par puce tous les 18 mois. Depuis cette époque, le silicium est le matériau le plus utilisé de l'industrie des semi-conducteurs pour des raisons physiques et technologiques (qualité de son oxyde, la silice, et de l'interface avec son oxyde, propriétés mécaniques et thermiques) et économiques (large accès à la matière première, le silicium ; retour sur investissement des infrastructures rapidement atteint). Cependant, depuis quelques années, les progrès fulgurants de l'électronique silicium atteignent des limites, en particulier en termes de puissance consommée bien trop élevée dans une ère où l'impact énergétique est une priorité majeure, et de bande passante pour

laquelle les débits visés pour répondre à la demande croissante devient trop faible. En effet, les nombreuses interconnexions électriques nécessaires aux transferts de données au sein des puces électroniques sont une source majeure de dissipation de puissance. Pour pallier ces limitations, les interconnexions optiques, consistant à miniaturiser des liens optiques complets en vue de véhiculer des signaux rapides sur puce, sont considérées depuis une vingtaine d'années comme une solution alternative intéressante au tout-électronique.

Afin de conserver la compatibilité avec les technologies de la microélectronique (essentiellement CMOS), l'utilisation du silicium pour la photonique a rapidement été considérée comme la voie principale à explorer, laissant de côté des solutions telles que l'intégration totalement hybride de composants optoélectroniques à base de semi-conducteurs III/V déjà développées pour le domaine des télécoms par fibres optiques. L'évolution vers la photonique Si a été notamment permise grâce à l'émergence de substrats polyvalents en silicium sur isolant (SOI) et aux propriétés optiques intéressantes du silicium offrant une large fenêtre de transparence pour des longueurs d'onde allant de 1,1  $\mu\text{m}$  à 7  $\mu\text{m}$  [2]. En outre, les substrats SOI donnent accès à

un fort contraste d'indice de réfraction entre celui du silicium Si ( $n_{\text{Si}} \approx 3,47$  vers  $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ ) et celui de la silice SiO<sub>2</sub> ( $n_{\text{SiO}_2} \approx 1,45$ ), permettant le développement de composants compacts adaptés à une forte densité d'intégration des composants optiques.

En dépit de ces atouts, le silicium présente plusieurs inconvénients intrinsèques pour la photonique, à savoir principalement une structure de bandes électroniques indirecte et une maille cristalline centrosymétrique. Ces propriétés conduisent à une très faible efficacité du processus d'émission de photons (pour la réalisation de sources), et à l'absence d'effet électro-optique linéaire (Pockels) couramment exploité dans les systèmes de communications modernes avec le niobate de lithium ou les matériaux semi-conducteurs III/V pour la réalisation de modulateurs électro-optiques rapides. Si l'on y ajoute sa transparence dans le proche infrarouge, empêchant la réalisation de photodétecteurs dans cette gamme de longueurs d'onde, il est ainsi notable que le silicium en lui-même ne présente que peu de propriétés favorables à la réalisation des trois fonctions essentielles : source/modulation/détection d'un lien optique intégré. Malgré tout, les efforts de recherche des centres académiques et industriels déployés pour étendre

L'usage du silicium à la photonique ont été très fortement stimulés ces dernières années par des enjeux applicatifs gigantesques : l'augmentation rapide du volume de données numériques diffusées dans le monde, principalement vers/depuis les centres de données gourmands en bande passante, les changements drastiques de l'utilisation d'Internet par les consommateurs équipés très largement d'appareils mobiles (tablettes, smartphones), et le développement plus récent des objets connectés. Dans ce contexte, les inconvénients précités du silicium ont été largement compensés par les atouts d'intégration très dense de la photonique Si et de sa co-intégration possible avec l'électronique CMOS, d'autant que des solutions originales ont été proposées et développées pour la réalisation de modulateurs silicium et de photodétecteurs Ge intégrés, apportant des solutions solides et matures pour répondre aux challenges du départ. Tous ces efforts ont été développés en tenant compte des défis récents de vitesse, de consommation électrique, de flexibilité et de fiabilité pour la réalisation d'émetteurs-récepteurs optiques

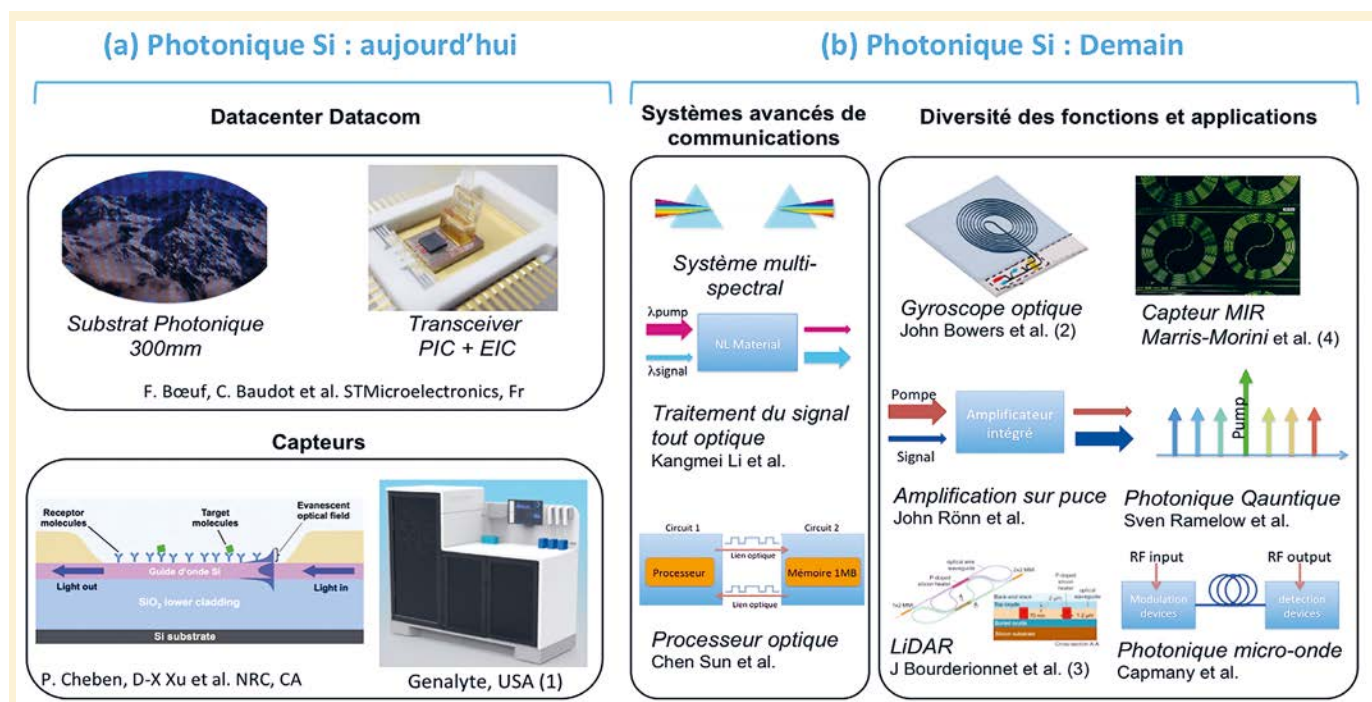
pour les centres de données, de capteurs pour la détection d'agents chimiques, gazeux, biologiques... Ainsi, progressivement, le silicium est devenu une plateforme majeure pour la photonique et une réalité industrielle [2].

Depuis quelques années, des solutions combinant à la fois la photonique et l'électronique sont donc désormais disponibles pour répondre aux exigences du transfert et du traitement de l'information (*figure 1a*). Parallèlement, grâce à la capacité de fabrication peu coûteuse et aux volumes importants de production, des capteurs en photonique silicium sont également disponibles, notamment pour la détection précoce de maladies.

Cette tendance, sous-tendue et rendue possible par des progrès constants en termes de méthodologie de conception, de méthodes de modélisation des composants et des systèmes photoniques, et de maîtrise des spécificités de la fabrication des structures et circuits optiques (motifs en forme de courbes, règles de conception différentes de celle de l'électronique, etc.), a débouché plus récemment sur un panel d'applications

possibles allant au-delà du champ initial des interconnexions optiques point à point (*figure 1b*) : systèmes de routage en longueurs d'onde des signaux et de parallélisations massives par multiplexage en longueurs d'onde (WDM), traitement tout optique des signaux, nouvelles applications variées telles que l'intégration de gyroscopes optiques, d'amplificateurs et d'oscillateurs intégrés, le développement de LIDAR, de spectromètres optiques, l'intégration de fonctions photoniques pour l'optique quantique sur puce, ou la réalisation de circuits photoniques hyperfréquences et opto-hyperfréquences (radio sur guide, oscillateurs optoélectroniques).

Dans ce contexte très riche et rapidement évolutif, la *figure 2* présente une vue non exhaustive de structures photoniques silicium actuellement disponibles incluant des guides d'onde rubans, des guides à base de cristaux photoniques, des structures sub-longueurs d'onde ou à fente, des modulateurs silicium à électro-réfraction basés sur le principe de la déplétion de porteurs et à électro-absorption dans des structures à multipuits quantiques



**Figure 1.** Évolution de la photonique silicium. (a) Aujourd'hui la photonique silicium adresse principalement deux marchés : les communications optiques inter et intra-puce rapides, notamment pour les centres de données, et la réalisation de capteurs pour la détection biologique. (b) En perspectives à court et moyen termes, de nouveaux domaines applicatifs s'offrent à la photonique silicium, comme la photonique quantique, la métrologie sur puce, et la spectroscopie d'absorption dans le moyen infrarouge, notamment pour des applications biologiques. (1) [www.genalyte.com](http://www.genalyte.com) ; (2) S. Srinivasan et al., *Opt. Express* **22**, 24988 (2014) ; (3) A. Martin et al., *J. Lightwave Technology* **36**, 4640 (2018) ; (4) D. Marris-Morini et al., SPIE Photonics West, Jan 2018, San Francisco, United States, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01798825/>

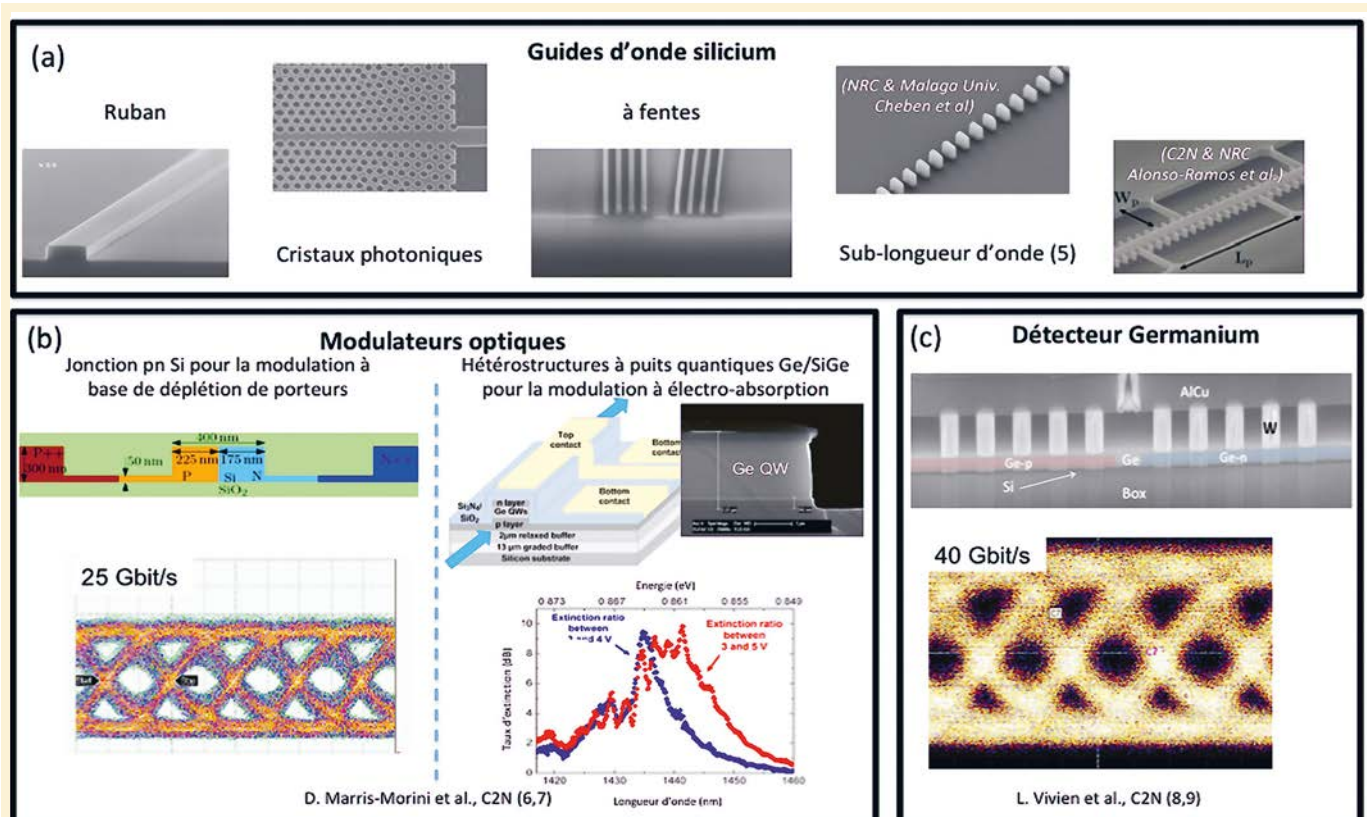
Ge/SiGe exploitant l'effet Stark confiné quantiquement [3], et des détecteurs germanium intégrés [4].

À titre d'exemple, des caractéristiques de modulation OOK (*on-off keying*) remarquables ont déjà été obtenues avec des performances proches des modulateurs niobate de lithium, une référence dans les systèmes télécoms. Des transmissions de données à des débits supérieurs à 40 Gbps ont ainsi été démontrées avec un taux d'extinction supérieur à 8 dB et des pertes d'insertion inférieures à 5 dB. Des efficacités de modulation, caractérisées par le produit de la tension appliquée et de la longueur du modulateur pour atteindre un déphasage de  $\pi$  ( $V\pi L\pi$ ), atteignent 1–2 V cm pour les effets à déplétion de porteurs et sont inférieures à 1 V cm pour des modulateurs à accumulation de porteurs à base de capacités MOS. Le deuxième exemple

porte sur la démonstration de photodétecteurs intégrés en germanium dont les bandes passantes atteignent des fréquences supérieures à 100 GHz, des sensibilités de plus de 1 A/W dans le proche infrarouge et des courants d'obscurité inférieurs au nano-ampère. Ces composants ont démontré d'excellentes caractéristiques permettant aujourd'hui de proposer des circuits plus complexes. De plus, en raison de l'impact considérable de la photonique silicium, la plupart de ces composants ont été transférés dans des fonderies industrielles accessibles via des services de fabrication multi-projets : CEA/Leti, IMEC, AIMPhotonics, IME..., rendant accessible une technologie à l'état de l'art et à fort potentiel applicatif.

Cependant, parmi tous les dispositifs actuellement disponibles, la source optique sur silicium reste un défi majeur. De nombreux travaux ont été

menés pour forcer l'émission de photons et contourner l'inconvénient de la structure de bande indirecte du Si en exploitant l'effet Raman, le dopage avec des ions terres rares comme l'erbium, ou l'exploitation de nano-cristaux de silicium. La plupart de ces approches nécessitent cependant un laser externe de pompe limitant l'intérêt des solutions développées pour des applications sur puce. Une approche originale, introduite par le MIT (USA), a été d'exploiter le germanium dont les énergies des gaps direct et indirect sont très proches [5]. Ainsi, en exerçant une contrainte mécanique en tension suffisamment forte, combinée à un fort dopage du Ge, un effet laser a été obtenu à des longueurs d'onde autour de 1550 nm, d'abord sous pompage optique puis sous pompage électrique. Cette démonstration majeure et très prometteuse reste



**Figure 2.** Composants de la photonique silicium. (a) Une variété de guides d'onde silicium a été développée incluant les guides rubans, à cristaux photoniques, à fentes et sub-longueurs d'onde. Selon les structures envisagées, il est possible de contrôler les propriétés de propagation de la lumière (dispersion, vitesse de phase et de groupe, transparence). (b) De nombreuses structures pour la modulation de phase par déplétion et accumulation de porteurs libres dans le silicium et la modulation de l'absorption dans des structures à base de germanium sur Si ont été développées. Des caractéristiques physiques remarquables en termes de fréquences de modulation, pertes d'insertion, efficacité de modulation ont été démontrées. (c) La détection de la lumière sur puce silicium se fait principalement en utilisant le germanium comme matériau absorbant. Des caractéristiques de détection proches de celles obtenues avec les semiconducteurs III-V considérés comme des références aux longueurs d'onde télécoms sont aujourd'hui atteintes. (5) P.J. Bock et al., *Opt. Express* **18**, 20251 (2010); (6) D. Perez-Galacho et al., *Opt. Express* **25**, 11217 (2017); (7) P. Chaisakul et al., *Opt. Express* **20**, 3219 (2012); (8) L. Virot et al., *Nature Communications* **5**, 4957 (2014) - © SpringerNature, figure protégée par le droit d'auteur et non couverte par la licence Creative Commons; (9) L. Vivien et al., *Opt. Express* **20**, 1096 (2012)

encore une preuve de concept et des efforts sont encore à mener pour réduire les courants de seuil et augmenter l'efficacité d'émission des structures.

Par conséquent, l'intégration d'autres matériaux sur silicium semble être une approche alternative crédible pour la réalisation de sources lasers sur silicium. En l'état actuel des efforts d'intégration hybride de matériaux émergents (nanotubes, boîtes quantiques, etc.), les lasers les plus efficaces sur Si ont été développés à partir de semi-conducteurs III-V. En effet, les matériaux à base d'InP restent aujourd'hui le meilleur choix pour la fabrication de sources laser efficaces dans la gamme de longueurs d'onde de 1,3 à 1,55  $\mu\text{m}$ , voire au-delà. Pour conserver le développement photonique peu coûteux qu'apporte la plateforme silicium, deux approches ont alors été particulièrement étudiées : le collage sur structures Si de couches ou de vignettes en semiconducteurs III-V, ou l'épitaxie directe de semiconducteurs III-V sur Si. Si cette dernière approche est un sujet de recherche passionnant depuis une vingtaine d'années qui permettrait une intégration monolithique de tous les composants photoniques sur une plateforme compatible avec celle du silicium, l'hybridation par collage est cependant considérée aujourd'hui comme une solution pragmatique qui a permis plusieurs démonstrations de dispositifs hybrides III-V / Si efficaces, généralement de sources lumineuses (hauts rendements d'émission, durées de vie étendues). Cette intégration peut se faire via soit une intégration dite *front-side* (figure 3a), la plus courante, ou une intégration dite *back-side* (figure 3b) permettant de préserver les niveaux d'interconnexions métalliques compatibles avec ceux développés pour l'électronique. La plupart de ces démonstrations ont été obtenues en combinant une chaîne de fabrication silicium pour les structures photoniques (guides d'onde, modulateurs, photodétecteurs...) et une fonderie III-V conventionnelle pour la structuration des semiconducteurs III-V et la métallisation spécifique à ces matériaux (principalement de l'or pour

les contacts, contaminant en Si). Un des challenges porte aujourd'hui sur l'intégration de tous les composants sur la même plateforme photonique silicium en utilisant une technologie commune. Des résultats très prometteurs ont été obtenus dans cette direction récemment avec un laser III/V sur Si fabriqué entièrement sur la plateforme Si 200mm en utilisant une métallisation compatible CMOS.

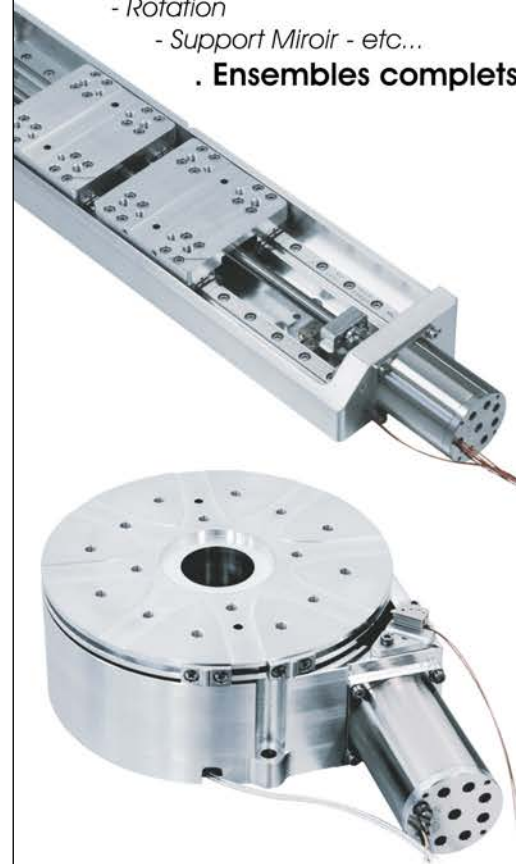
Malgré toutes ces démonstrations remarquables concernant l'ensemble des composants optoélectroniques, les exigences en termes de consommation d'énergie des différentes briques de base développées pour les communications inter et intra-puces ne sont pas atteintes à ce jour. En effet, le développement de circuits complexes incluant plusieurs sources lasers, modulateurs, détecteurs et structures photoniques passives nécessite de mener une réflexion globale sur le budget énergétique des liens optiques. En particulier, il est nécessaire de diminuer les pertes optiques de toutes les structures photoniques, d'augmenter la sensibilité des récepteurs afin de réduire la puissance optique émise par les lasers, de réduire les courants de seuil des lasers, et d'augmenter l'efficacité des modulateurs optiques. Des solutions alternatives aux solutions plus conventionnelles doivent être également considérées pour répondre aux enjeux de la photonique Si et aux défis liés aux domaines applicatifs très vastes de la photonique Si. Sans être exhaustif, on peut citer les développements autour du silicium contraint pour briser la symétrie du cristal et exploiter l'effet Pockels, l'étude et l'exploitation d'hétérostructures à base de puits quantiques Ge/SiGe pour la réalisation de modulateurs optiques compacts, l'utilisation des effets optiques non-linéaires du troisième ordre pour la réalisation de sources multi-spectrales exploitant la génération de peignes de fréquences, et toutes les études autour de l'intégration hybride de matériaux compatibles du point de vue de l'intégration technologique et présentant des propriétés physiques en rupture avec celles du silicium. Des matériaux tels que les polymères dopés, les nanomatériaux

## Du Composant au Système

### . Micro-positionnement

- Translation
- Rotation
- Support Miroir - etc...

### . Ensembles complets



**Solutions  
customisées  
et  
économiques**

### Environnements :

#### Standard / Spécifique

Vide - Ultra-vide - Salle blanche  
Cryo - Hautes températures  
Rayonnements

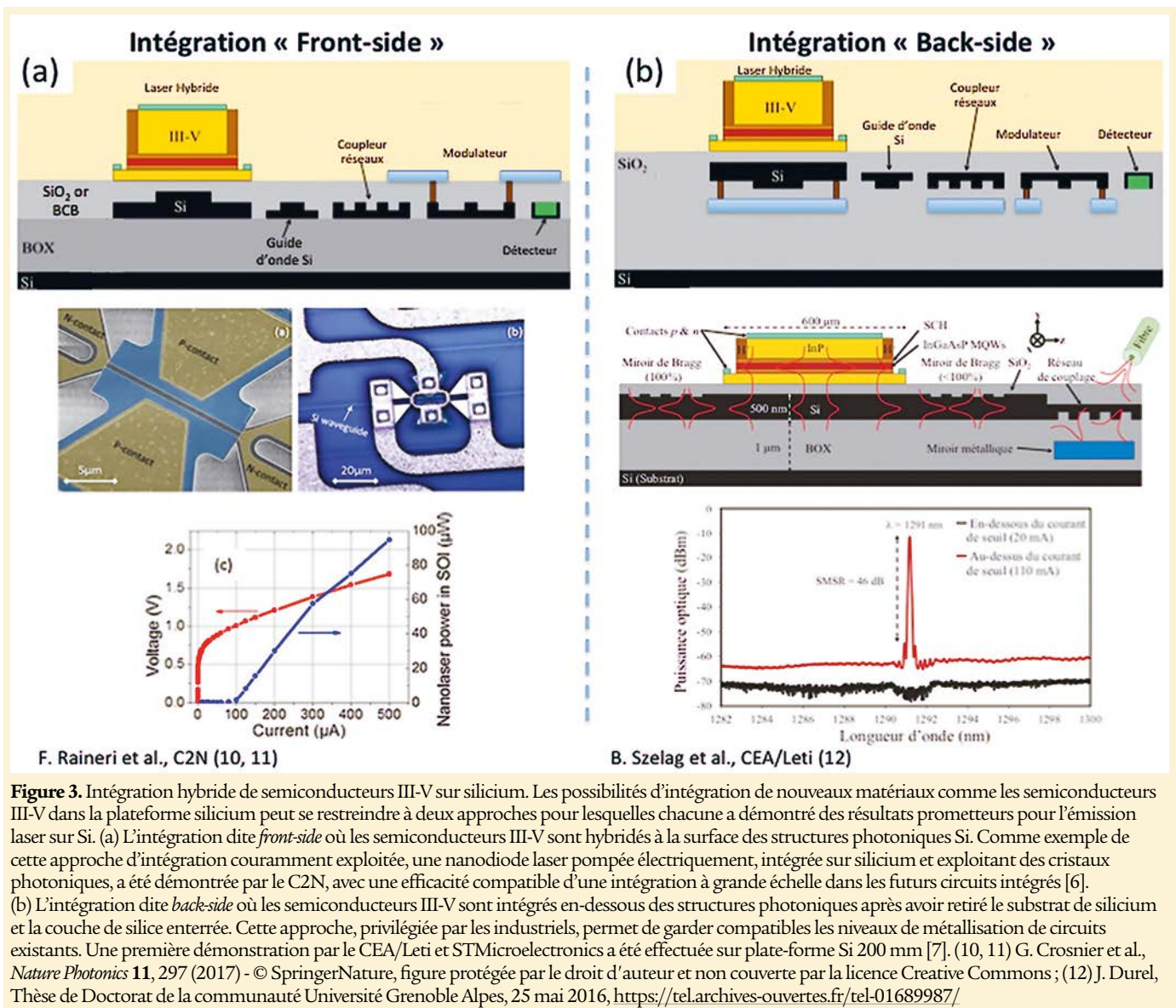


6 rue Condorcet - F-95157 Taverny

Tel: +33 (0)1.30.40.81.30

Mail: [info@tsa.fr](mailto:info@tsa.fr)

Web: [www.tsa.fr](http://www.tsa.fr)



**Figure 3.** Intégration hybride de semiconducteurs III-V sur silicium. Les possibilités d'intégration de nouveaux matériaux comme les semiconducteurs III-V dans la plateforme silicium peut se restreindre à deux approches pour lesquelles chacune a démontré des résultats prometteurs pour l'émission laser sur Si. (a) L'intégration dite *front-side* où les semiconducteurs III-V sont hybridés à la surface des structures photoniciques Si. Comme exemple de cette approche d'intégration couramment exploitée, une nanodiode laser pompée électriquement, intégrée sur silicium et exploitant des cristaux photoniciques, a été démontrée par le C2N, avec une efficacité compatible d'une intégration à grande échelle dans les futurs circuits intégrés [6]. (b) L'intégration dite *back-side* où les semiconducteurs III-V sont intégrés en-dessous des structures photoniciques après avoir retiré le substrat de silicium et la couche de silice enterrée. Cette approche, privilégiée par les industriels, permet de garder compatibles les niveaux de métallisation de circuits existants. Une première démonstration par le CEA/Leti et STMicroelectronics a été effectuée sur plate-forme Si 200 mm [7]. (10, 11) G. Crosnier et al., *Nature Photonics* **11**, 297 (2017) - © SpringerNature, figure protégée par le droit d'auteur et non couverte par la licence Creative Commons ; (12) J. Durel, Thèse de Doctorat de la communauté Université Grenoble Alpes, 25 mai 2016, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01689987/>

1D (nanofils, nanotubes...), les matériaux 2D (graphène, MoS<sub>2</sub>...) ou 0D (boîtes quantiques...), les verres de chalcogénure, les métaux pour exploiter des effets plasmoniques, les oxydes fonctionnels (BTO, BST, YSZ...) et les semiconducteurs III-V sont quelques exemples des nombreuses possibilités offertes par l'intégration hybride sur Si.

Pour conclure, grâce à sa transparence dans une large gamme de longueurs d'onde et à sa compatibilité avec les processus CMOS développés pour la microélectronique, la photonique silicium est apparue comme incontournable pour répondre aux nouveaux défis des circuits intégrés. Les applications visées dépassent aujourd'hui le simple domaine des communications optiques avec notamment la

photonique quantique, les capteurs et la métrologie qui en font de nouveaux

défis à relever pour la photonique silicium dans les prochaines années.

#### POUR EN SAVOIR PLUS

- [1] L. Vivien, L. Pavesi, *Handbook of Silicon photonics*, CRC Press, 2013
- [2] F. Boeuf, S. Cremer, E. Temporiti, M. Fere, M. Shaw, C. Baudot, N. Vulliet, T. Pinguet, A. Mekis, G. Masini, H. Petiton, P. Le Maitre, M. Traldi, L. Maggi, Silicon Photonics R&D and Manufacturing on 300-mm Wafer Platform, *J. Light. Technol.* **34**, 286 (2016)
- [3] P. Chaisakul, D. Marris-Morini, J. Frigerio, D. Chrastina, M.-S. Rouifed, S. Cecchi, P. Crozat, G. Isella, L. Vivien, Integrated germanium optical interconnects on silicon substrates, *Nature Photonics* **8**, 482 (2014)
- [4] L. Virot, P. Crozat, J.-M. Fédéli, J.-M. Hartmann, D. Marris-Morini, E. Cassan, F. Boeuf, L. Vivien, Germanium avalanche receiver for low power interconnects, *Nat. Commun.* **5**, 4957 (2014)
- [5] R.E. Camacho-Aguilera, Y. Cai, N. Patel, J.T. Bessette, M. Romagnoli, L.C. Kimerling, J. Michel, An electrically pumped germanium laser, *Optics Express* **20**, 11316 (2012)
- [6] G. Crosnier, D. Sanchez, S. Bouchoule, P. Monnier, G. Beaudoin, I. Sagnes, R. Raj, F. Raineri, Hybrid indium phosphide-on-silicon nanolaser diode, *Nature Photonics* **11**, 297 (2017)
- [7] J. Durel, B. Ben Bakir, C. Jany, S. Cremer, B. Szlag, T. Bria, V. Larrey, L. Sanchez, P. Brianceau, J.-A. Dallery, R. Guiavarch, T. Card, R. Thibon, J.-E. Broquin, F. Boeuf, First Demonstration of a Back-Side Integrated Heterogeneous Hybrid III-V/Si DBR Lasers for Si- Photonics Applications, 2016 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)



# iXblue

## iXblue Photonics au cœur des avancées récentes sur les fibres optiques résistantes aux radiations nucléaires ou rencontrées dans l'espace

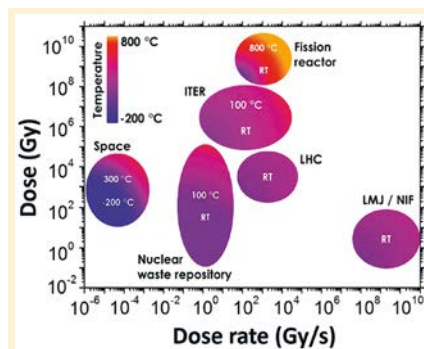
Contrairement aux signaux électriques, les signaux optiques n'interfèrent pas avec les rayonnements ionisants et les dispositifs optiques sont particulièrement intéressants en environnement radiatif. Les fibres optiques à base de silice sont ainsi utilisées dans de nombreux domaines aux environnements sévères pour différentes applications, de l'UV au proche Infrarouge : Telecom, Diagnostique, Amplificateur, Laser à fibre, capteur de température, contrainte, dosimètre, gyroscope...

Cependant, si la fibre optique présente de nombreux avantages, il a été observé que l'exposition de cette dernière à des radiations induit une dégradation des performances optiques, et en particulier une augmentation de l'atténuation linéique de la fibre (dite atténuation induite par irradiation ou encore RIA pour Radiation Induced Attenuation). Sous exposition radiative, des défauts de type centres colorés apparaissent ainsi dans la silice, créant des bandes d'atténuation pouvant altérer la transmission du signal guidé dans la fibre.

Grâce à l'étude de ces bandes d'atténuation suivant la composition de la matrice silice utilisée, iXblue Photonics, leader sur le marché de la photonique, a cependant identifié les matrices optimales en fonction des plages d'utilisation de la fibre optique et a pu développer une expertise reconnue dans la production de fibres optiques particulièrement efficaces et résistantes en milieux extrêmes.

### Fibre pour environnement nucléaire :

iXblue Photonics a ainsi développé des fibres optiques passives pour des applications capteur dans des environnements « agressifs » type environnements nucléaires ou à fort confinement électromagnétique (accélérateurs de particules).



Les techniques de mesures peuvent être différentes :

- Mesure discrète avec un réseau de Bragg
- Mesure distribuée en mesurant les effets Raman, Brillouin ou Rayleigh
- Mesure ponctuelle Online/Offline : dosimètre

En plus de la composition de la fibre, le choix d'un revêtement adapté aux températures d'utilisation est également primordial : acrylate haute température, polyimide, carbone, aluminium... iXblue Photonics possède ainsi un large catalogue de fibre multimode ou mono-mode adaptées aux environnements combinant radiation et haute température.

### Fibre pour environnement spatial :

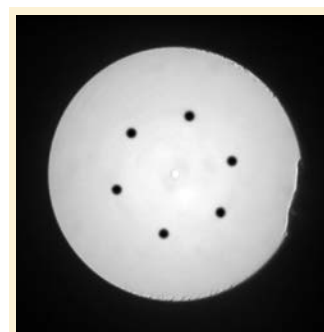
L'enjeu principal au sein de l'environnement spatial, où les doses cumulées et/ou débits sont bien moindres, est principalement le développement de fibres dopées (Erbium, ytterbium, Erbium/ytterbium) dites fibres actives pour applications lasers et amplificateurs optiques fibrés embarqués dans des satellites.

Les fibres développées par iXblue Photonics sont ainsi particulièrement adaptées à des applications telles que les liaisons terre-satellite et inter-satellite, la télémétrie ou

encore les lasers, et offrent une durée d'opération bien plus élevée. En effet, la sensibilité aux radiations des fibres optiques iXblue a été améliorée grâce à divers procédés, tels que l'ajustement de la matrice du cœur dopé (incorporation de Cerium) ou encore le post-traitement de la fibre avec un gaz (Hydrogène, Deutérium).

Pour exemple, la dernière génération de fibre Erbium pour application spatiale est ainsi constituée d'une gaine silice à trous avec revêtement hermétique carbone (Hole Assisted Carbon Coated HACC) permettant l'incorporation de Deutérium avant fermeture des trous par soudure lors de leur incorporation dans un système fibré.

iXblue Photonics est ainsi reconnu pour la fiabilité de ses fibres optiques pour environnements sévères et développe également une gamme complète de modulateurs dédiés à ce type d'environnement, et plus particulièrement aux applications spatiales.



Fibre HACC

### CONTACT

#### IXBLUE

Fibres optiques pour environnements sévères :

[patrice.crochet@ixblue.com](mailto:patrice.crochet@ixblue.com)

Modulateurs pour fonctionnement en environnements sévères :

[herve.gouraud@ixblue.com](mailto:herve.gouraud@ixblue.com)

[www.ixblue.photonics.com](http://www.ixblue.photonics.com)

# L'OPTIQUE HYPERFRÉQUENCE : un défi perpétuel

Mehdi ALOUINI

Institut Foton, Université de  
Rennes1/CNRS, 35042 Rennes  
[mehdi.alouini@univ-rennes1.fr](mailto:mehdi.alouini@univ-rennes1.fr)

D'une science que l'on pouvait qualifier de confidentielle il y a trente ans, car s'adressant principalement aux besoins de la défense comme le radar et la guerre électronique, l'optique hyperfréquence s'est démocratisée ces dernières années. Elle s'invite désormais dans la plupart des nouveaux systèmes électroniques haute fréquence, les télécommunications optiques cohérentes et la métrologie temps-fréquence par exemple.

L'optique hyperfréquence relie le monde des micro-ondes à celui de la photonique. De manière générale, elle s'attache, au travers de fonctions optiques, à lever des verrous technologiques dans le domaine micro-onde et/ou à réaliser des fonctions micro-ondes évoluées inaccessibles directement dans le domaine purement hyperfréquence [1]. Notons que les premiers systèmes SAR (*synthetic aperture radar*) employaient déjà, dès les années 60, l'holographie optique pour reconstruire les images [2].

## Des signaux analogiques à haute fréquence

L'optique hyperfréquence repose sur la manipulation de signaux analogiques à haute fréquence que l'on cherche à générer, à distribuer ou à traiter. Ceci la distingue des télécommunications optiques dans lesquelles les signaux manipulés sont généralement numériques. Les contraintes associées à ce caractère analogique sont dracونيennes. On se retrouve en effet à manipuler des signaux dans le domaine optique avec des exigences qui sont celles de l'électronique en termes de pureté spectrale, de linéarité et de bruit d'amplitude. Malgré cette difficulté, l'optique hyperfréquence a toujours fait l'objet d'une recherche soutenue, car manipuler les signaux hyperfréquences dans le domaine analogique est inévitable.

Pour mieux fixer les idées, prenons l'exemple d'un radar fonctionnant à 10 GHz et présentant un rapport signal-sur-bruit (plus couramment appelé dynamique en optique hyperfréquence pour éviter toute confusion avec le rapport signal-sur-bruit de la porteuse optique) de 160 dB, *i.e.*  $10^{16}$ . Une telle dynamique est essentielle pour détecter le signal rétrodiffusé par une cible distante et en mesurer l'origine et le décalage Doppler. Numériser un signal à cette fréquence avec une dynamique aussi élevée nécessiterait un codage sur 54 bits et donc un débit de 1080 Gbit/s. Sachant que l'antenne d'un radar moderne est constituée d'un millier de dipôles rayonnants, transporter individuellement les signaux détectés dans une liaison télécom optique nécessiterait un débit de 1080 Tbit/s. Cet exemple, parmi d'autres, montre l'importance de manipuler directement les signaux analogiques tels quels.

Dans la pratique, la référence micro-onde du radar, ou oscillateur local (OL), est convoyée vers les dipôles de l'antenne dans une liaison optique hyperfréquence constituée, dans le cas le plus simple, d'un laser, d'une fibre optique et d'une photodiode. Cet OL, qui confère à l'onde émise par le radar sa pureté spectrale, est aussi utilisé à la réception pour démoduler l'onde rétrodiffusée par la cible. Le signal obtenu se trouvant à

basse fréquence (quelques MHz), il peut être numérisé et redescendu de l'antenne via une liaison optique numérique, *i.e.* similaire à celles utilisées en télécommunications optiques. La *figure 1* illustre très schématiquement un exemple d'intégration de liaisons optiques dans un radar sol de nouvelle génération.

## La liaison optique hyperfréquence : une brique élémentaire chargée de challenges scientifiques

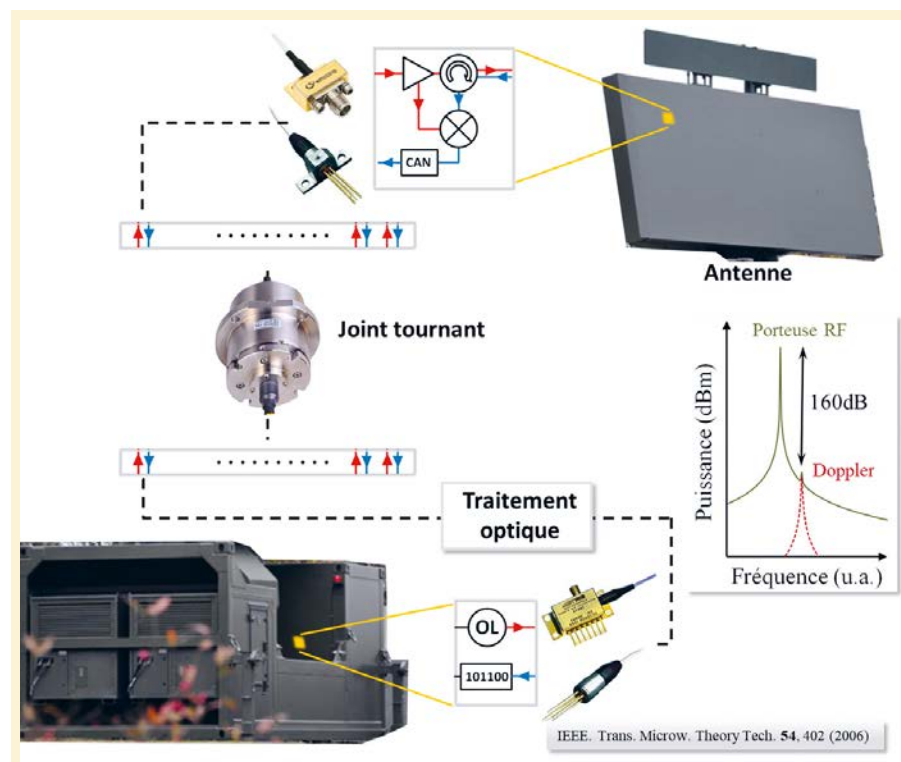
La conversion du signal hyperfréquence dans le domaine optique ouvre des possibilités hors de portée des systèmes entièrement micro-ondes. La mise en réseau de grands radio-télescopes tels que l'ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) est sans doute l'exemple le plus connu. Alors qu'un câble hyperfréquence présente des pertes de quelques dB par mètre, une fibre optique n'en présente que quelques dixièmes par kilomètre. Ainsi les pertes de conversion électriques/optiques au niveau du laser et de la photodiode sont rapidement compensées après quelques dizaines de mètres de propagation [3]. On ne pourrait pas imaginer relier entre elles deux antennes distantes de quelques km sans l'emploi de liaisons optiques hyperfréquences pour transmettre, *a minima*, l'OL permettant de

démoduler le signal reçu par les deux antennes. Cette possibilité a ouvert la voie à la goniométrie ultra-résolue en angle mais aussi à la réalisation de balises hyperfréquences de moins d'un mètre cube simulant la propagation d'ondes radar sur des centaines de kilomètres. Les oscillateurs optoélectroniques sont un autre exemple dans lequel l'utilisation d'une liaison optique de plusieurs kilomètres de long confère au résonateur une pureté spectrale bien meilleure que celle des oscillateurs purement électriques [4].

Le développement des liaisons optiques-hyperfréquences requiert des lasers ou des modulateurs capables de transformer le signal hyperfréquence en modulation optique sans en dégrader les qualités d'amplitude et de phase. Pour cela, on a recours à des lasers dont le bruit d'intensité relatif (RIN) est inférieur à -150 dB/Hz sur des plages spectrales de plusieurs GHz. Ces lasers doivent aussi fournir suffisamment de puissance pour que le rapport signal-sur-bruit

soit compatible avec la dynamique recherchée [5]. Finalement ils doivent idéalement pouvoir être modulés directement à haute fréquence (une vingtaine de GHz) tout en assurant une très bonne linéarité et peu de bruit de phase additif. À plus haute fréquence, lorsque la modulation directe n'est plus envisageable, on a recours à des modulateurs externes qui, de nouveau, doivent assurer une bonne linéarité. Ces contraintes, qui sont draconiennes, ont suscité et suscitent encore des efforts de recherche importants que ce soit en physique des lasers, matériaux, guides d'ondes ou semiconducteurs. Les défis à relever sont tels qu'il est souvent nécessaire de revenir à des considérations scientifiques très amont.

La figure 2 illustre un exemple d'études récentes débouchant sur une nouvelle classe de lasers, dits à *buffer reservoir*, dont le bruit d'intensité relatif est limité au bruit de grenaille sur une large plage spectrale. Cette propriété est obtenue en



**Figure 1.** Exemple d'implantation des liaisons optiques-hyperfréquences dans un radar. L'oscillateur local est distribué optiquement vers le réseau d'émetteurs. Les signaux en réception sont démodulés, numérisés puis descendus vers la station de traitement. L'ensemble des liaisons sont multiplexées en longueur d'onde avant la traversée du joint tournant.

# L'OPTIQUE EST NOTRE AVENIR



**NEW TECHSPEC®**

## Objectif d'Imagerie M12 à Lentille Liquide

**Objectif d'Imagerie M12 à Lentille Liquide TECHSPEC®** – une mise au point rapide à différentes distances de travail. Les nouveaux objectifs M12 sont spécifiquement conçus pour les lentilles liquides Varioptic et sont disponibles avec quatre distances focales de 6 à 16 mm. Les conceptions f/2,4 haute résolution recouvrent les capteurs grand format jusqu'à 1/1,8".

Pour en savoir plus :  
[www.edmundoptics.fr/M12](http://www.edmundoptics.fr/M12)

Venez nous voir à :  
**VISION Stuttgart**  
Stand **1D42**  
du 06 au 08 Nov. 2018



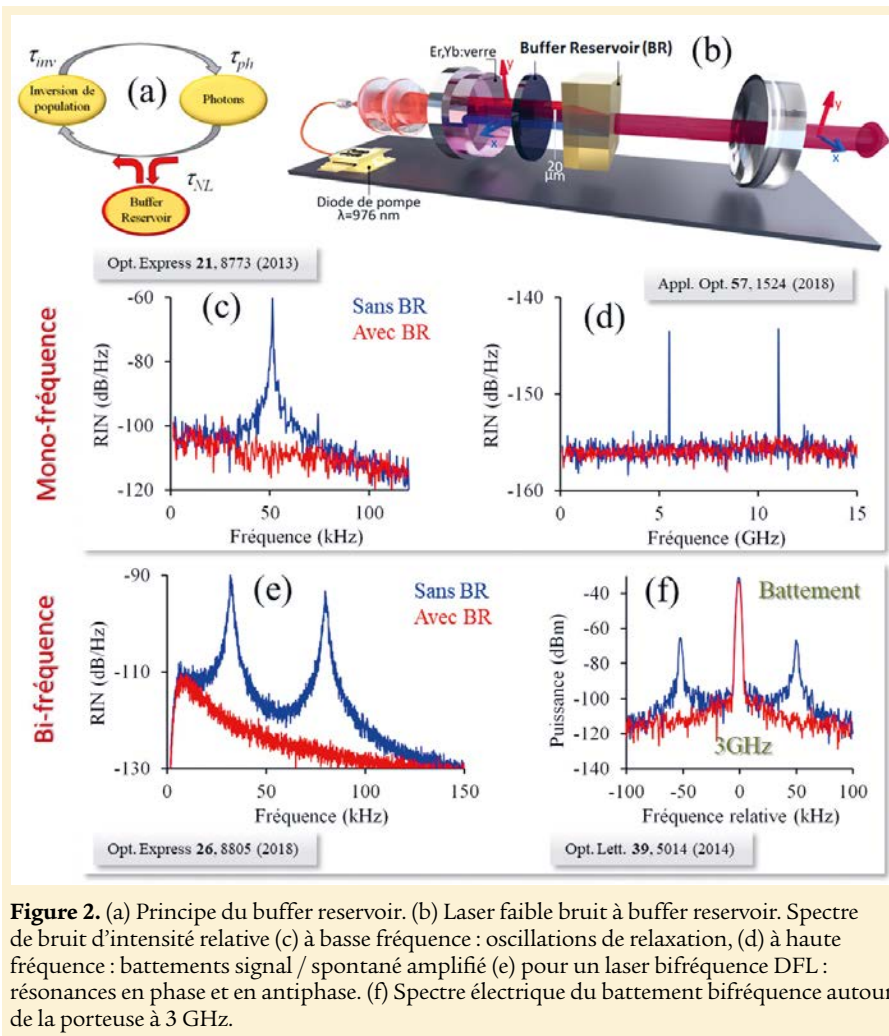
+33 (0) 8 20 20 75 55  
sales@edmundoptics.fr

**EO** Edmund  
optics | worldwide

## Des systèmes sans dispersion

Les très faibles pertes de propagation et les débits élevés sont souvent présentés comme les atouts majeurs de l'optique. La faible dispersion est sans nul doute une caractéristique fondamentale pour le déport de signaux hyperfréquences par voie optique. Cette propriété joue aussi un rôle essentiel dans le traitement du signal hyperfréquence. En effet, les guides hyperfréquences, et les composants hyperfréquences de manière générale, présentent une dispersion dont les effets sont perceptibles sur quelques fractions de GHz, *i.e.* dès lors que l'étendue spectrale du signal atteint quelques pourcents de sa fréquence moyenne. La dispersion implique que la phase d'une composante spectrale après propagation dépend de la fréquence de cette composante spectrale. Transporter ou traiter l'information hyperfréquence par voie optique permet de s'affranchir de ce problème. En effet, la dispersion qui entre en compte devient celle de la fibre et des composants optiques utilisés. Dans le domaine optique cette dispersion est perceptible sur des plages spectrales de plusieurs nanomètres, *i.e.* plusieurs THz dans le domaine fréquentiel. Ainsi un signal hyperfréquence sur porteuse optique subira quasiment le même retard quelle que soit la fréquence de modulation.

Il est à noter que l'optique permet de réaliser des systèmes à dispersion rigoureusement nulle. En effet, pour le déport sur de longues distances, les techniques de compensations de dispersion, bien connues en télécommunications optiques, peuvent être utilisées. À l'inverse, certaines liaisons courtes, ou certains modules de mise en forme ou de traitement du signal hyperfréquence, reposent sur des architectures dans lesquelles la lumière se propage en espace libre : encore un atout de l'optique. La propriété de dispersion, ou plutôt de non-dispersion, qui permet de réaliser des « retards vrais » est



**Figure 2.** (a) Principe du buffer reservoir. (b) Laser faible bruit à buffer reservoir. Spectre de bruit d'intensité relative (c) à basse fréquence : oscillations de relaxation, (d) à haute fréquence : battements signal / spontané amplifié (e) pour un laser bifréquence DFL : résonances en phase et en antiphase. (f) Spectre électrique du battement bifréquence autour de la porteuse à 3 GHz.

brisant l'interaction résonante entre l'inversion de population et la durée de vie des photons dans le laser, interaction à l'origine de l'excès de bruit [6]. L'effet *buffer reservoir* est dans la pratique réalisé en insérant un mécanisme de pertes non linéaires de très faible section efficace et de courte durée de vie, de telle sorte que les caractéristiques statiques du laser (puissance et seuil) restent inchangées tandis que ses caractéristiques dynamiques sont profondément bouleversées. Le *buffer reservoir* agit à l'image d'un vase d'expansion qui viendrait autoréguler les fluctuations d'intensité sur une bande passante de plusieurs dizaines de GHz, ce qui est inimaginable avec des asservissements électroniques. Cette technique a aussi été étendue aux lasers bifréquences dont nous verrons l'utilité un peu plus loin.

Dans une liaison optique hyperfréquence, les mêmes contraintes de bruit et de linéarité existent au niveau de la réception. Les photodiodes doivent présenter de larges bandes passantes, une excellente linéarité, peu de conversion du bruit d'amplitude en bruit de phase, et cela pour des puissances incidentes de plusieurs dizaines de mW. La fibre qui peut paraître comme un composant passif est aussi à manier avec précaution. Effet Rayleigh, effet Brillouin, dispersion, mélange à quatre ondes sont autant d'effets à considérer de près car ils impliquent une dégradation du bruit de phase du signal hyperfréquence transporté. *A contrario*, la plupart des effets cités sont exploités avantageusement pour le traitement du signal hyperfréquence sur porteuse optique.

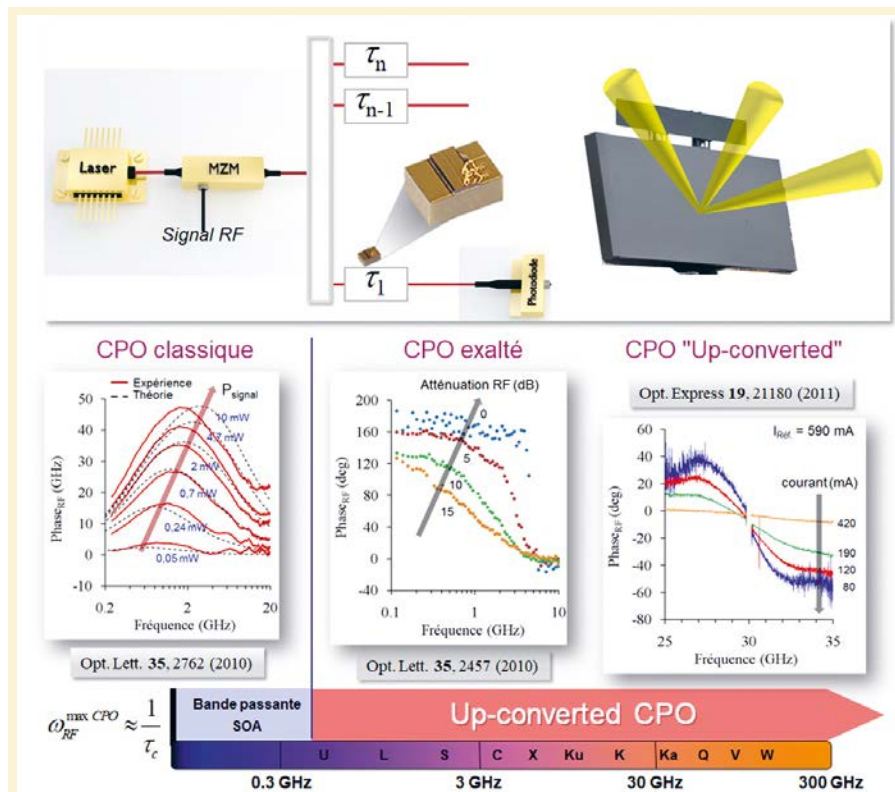
exploitée dans la plupart des fonctions optiques-hyperfréquences. Elle permet, par exemple, de réaliser des fonctions de filtrage programmables [7] ou encore des fonctions de pointé achromatique de faisceaux radars (figure 3).

Afin d'illustrer cette dernière application, rappelons que les antennes modernes sont constituées d'un réseau de dipôles rayonnants émettant à la même fréquence. Le rayonnement émis est la superposition cohérente d'ondelettes donnant lieu, en champ lointain, à un lobe d'émission plus ou moins pincé selon le nombre de dipôles rayonnants. Quand ces dipôles sont en phase, le lobe principal est normal au plan de l'antenne. Il est cependant possible d'appliquer une loi de phase pour changer le pointé de l'antenne sans avoir à l'orienter mécaniquement. Cette loi de phase n'est valable que pour une fréquence bien déterminée, tout changement de fréquence se traduisant par un

dépointé. Réaliser des retards vrais plutôt que des déphasages permet de résoudre cette difficulté. Il serait illusoire de vouloir ici présenter l'ensemble des techniques pour y parvenir. Néanmoins, il est de nouveau important de souligner que ces développements ont suscité des travaux de recherche très amont touchant à différents pans de la physique, allant de l'optique guidée aux membranes à cristaux photoniques actifs en passant par la physique des semiconducteurs.

La figure 3 illustre un exemple d'étude visant à induire les retards avec de la lumière lente et rapide. Afin de répondre aux contraintes de bande passante, de compacité et de parallélisme, le mécanisme mis en jeu ici repose sur les oscillations cohérentes de population (CPO) dans des amplificateurs optiques à semiconducteurs (SOA). L'amplificateur est utilisé en régime de saturation de telle sorte que le signal optique modulé imprime une modulation du gain. Cette modulation de

small components  
MASSIVE IMPACT



**Figure 3.** En haut : génération de retards par lumière lente pour la commande de pointé d'une antenne réseau. Le retard est obtenu par oscillations cohérentes de population (CPO) dans un amplificateur optique à semiconducteur SOA. En bas : spectres du déphasage hyperfréquence pour trois modalités de CPO.

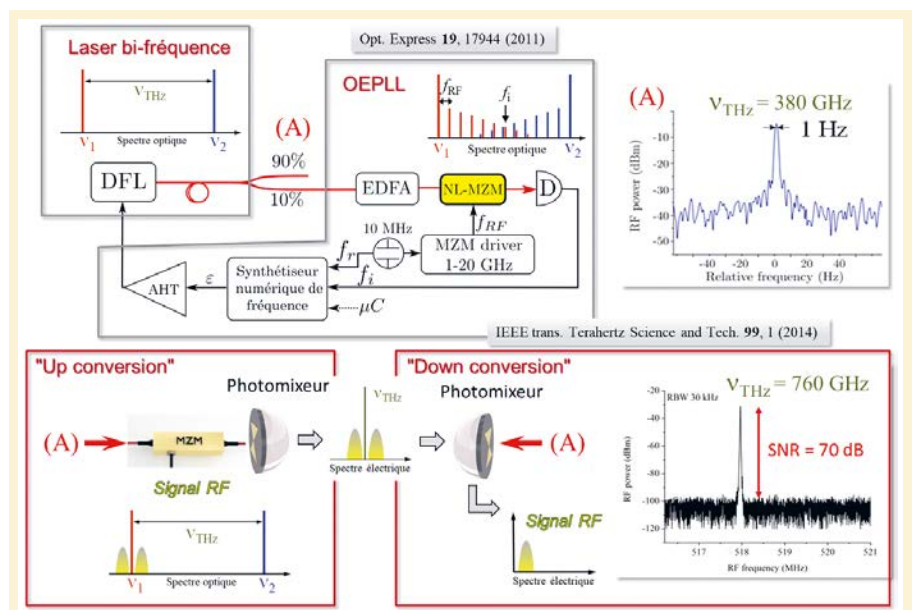
FLEXPOINT® Laser Modules

- Dot, Line & Cross Hair Lasers
- Machine Vision Lasers
- Laser Modules for Industrial Applications

gain induit sur le signal amplifié un retard de groupe qui se manifeste par un déphasage hyperfréquence dont l'amplitude est ajustable en agissant sur le courant d'injection du SOA ou sur la puissance d'entrée moyenne de l'onde optique. Ces travaux ont permis d'obtenir de la lumière lente et rapide à des fréquences GHz, *i.e.* bien au-delà des fréquences de quelques kHz obtenues dans les premières démonstrations de principe [8]. De plus les limitations intrinsèques de l'effet CPO en termes d'excursion du déphasage et de fréquence de fonctionnement ont été franchies en démontrant deux nouveaux principes physiques : (i) le CPO exalté où l'on vient accompagner le CPO classique par un CPO induit au travers du courant d'injection du semiconducteur, et (ii) le CPO *up-converted* où l'on réalise dans le même SOA la fonction de CPO et la conversion de fréquence par modulation croisée de gain [9]. Cette dernière technique permet désormais d'envisager des systèmes basés sur la lumière lente et rapide opérant à n'importe quelle fréquence de modulation.

### Extension à l'optique millimétrique et THz

Par essence, l'optique-hyperfréquence crée un pont entre le spectre optique et le spectre micro-ondes. Les ondes millimétriques (mm) et THz (quelques dizaines de  $\mu\text{m}$ ) étant situées entre ces deux régions spectrales, elles bénéficient naturellement des développements menés en optique hyperfréquence [10]. En effet, pour réaliser une modulation hyperfréquence sur porteuse optique, deux alternatives sont possibles : moduler rapidement une seule fréquence optique, ou bien faire battre deux fréquences optiques. La deuxième alternative est plus délicate à mettre en œuvre. Cependant, elle reste de loin la plus performante. En effet, dans ce cas, le signal de battement généré est parfaitement sinusoïdal avec un taux de modulation de 100 %. De plus, il n'a pas de limite en termes de bande passante. Les lasers bifréquences (DFL) sont à cet égard très intéressants car ils offrent



**Figure 4.** En haut : oscillateur local (OL) THz sur porteuse optique réalisé à partir d'un laser bifréquence DFL verrouillé en phase à l'aide d'une OEPLL. En bas à gauche : émission. L'OL THz sur porteuse optique sert à générer la porteuse THz et éventuellement y imprimer un signal d'intérêt avant photo-mélange. En bas à droite : réception. L'OL THz sur porteuse optique est utilisé pour démoduler directement le signal THz dans le photo-mélangeur.

intrinsèquement un battement de bonne pureté spectrale, les deux oscillateurs optiques se partageant la même cavité laser. Il devient alors aisé de les verrouiller en phase de manière à conférer au battement la pureté spectrale d'un OL hyperfréquence [11].

Bien que cette technique ait fait ses preuves dans le domaine hyperfréquence, calquer la pureté spectrale d'un OL hyperfréquence dans les domaines mm et THz est resté jusqu'à récemment une gageure. La *figure 4* illustre la façon dont on y parvient aujourd'hui à l'aide d'une OEPLL (*optoelectronic phase locked loop*). Le laser bifréquence mis en œuvre est un laser dont le battement est accordable continûment du GHz au THz. Le battement, qui a une largeur à mi-hauteur de 30 kHz, est affiné spectralement à moins du Hz. Pour cela, une partie du faisceau laser est prélevée puis modulée à l'aide d'un modulateur dont la fonction de transfert est très non-linéaire. On crée ainsi de part et d'autre des deux longueurs d'onde un peigne de fréquence dont l'entrelacement fournit un battement dans le domaine hyperfréquence. Ce battement, qui porte le bruit de phase du battement THz, est ensuite comparé à un OL hyperfréquence, puis

le signal d'erreur est réinjecté dans le laser bifréquence pour en contrôler une des deux fréquences. Ainsi, il est possible de stabiliser le battement THz sans avoir eu recours à la moindre électronique THz [12]. Une fois asservi, le laser constitue un OL THz sur porteuse optique, et utilisé à la fois à l'émission et à la réception THz (voir *figure 4*).

Outre la génération d'un battement THz spectralement pur et accordable, l'optique offre de nouveau un formidable levier puisqu'il devient possible d'imprimer n'importe quel signal sur une des deux longueurs d'onde du DFL avant de convertir l'ensemble dans un photomélangeur rayonnant dans le THz. Le photomélangeur est aussi utilisé à la réception. L'OL THz sur porteuse optique joue là encore un rôle essentiel puisqu'il permet de démoduler directement le signal THz incident (voir *figure 4*). Cette technique a été une véritable percée scientifique en optique-hyperfréquence. Elle est désormais exploitée en métrologie temps-fréquence [13]. Elle ouvre en outre la voie à la détection hétérodyne à température ambiante et à la spectroscopie haute résolution dans les domaines millimétrique et THz.

## Conclusion

Loin de fournir au lecteur une vision exhaustive des développements touchant à l'optique hyperfréquence, cet article tente au travers de quelques exemples de donner un aperçu des enjeux et contraintes liés à l'introduction de l'optique dans les systèmes hyperfréquences. L'optique hyperfréquence s'alimente continuellement des progrès réalisés dans divers domaines de la physique avec des retombées indirectes en communications cohérentes, en manipulation d'atomes, en métrologie temps-fréquence, en analyse spectrale hyperfréquence et optique, en spectroscopie à double peigne (dual comb spectroscopy) et en lidar/radar. L'optique hyperfréquence, qui cherche perpétuellement à repousser les limites des composants, des fonctions et des sous-systèmes hyperfréquences, est ainsi devenue un formidable terrain de jeu scientifique et technologique pour des générations de chercheurs et d'ingénieurs de développement.

## POUR EN SAVOIR PLUS

- [1] *Microwave Photonics: Devices and Applications*, edited by S. Iezekiel, John Wiley & Sons, 2009
- [2] Optical data processing, *Topics in Applied Physics* vol. **23**, edited by D. Casasent, Springer-Verlag, 1978
- [3] *RF Photonic Technology in Optical Fiber Links*, edited by W.S.C. Chang, Cambridge University Press, 2007
- [4] L. Maleki, The optoelectronic oscillator, *Nature Photonics* **5**, 728 (2011)
- [5] G. Baili et al., Ultra-low noise and high power VECSEL for high dynamic range and broadband RF/optical links, *J. Lightwave Technol.* **32**, 3489 (2014)
- [6] A. El Amili, G. Loas, L. Pouget, M. Alouini, Buffer reservoir approach for cancellation of laser resonant noises, *Opt. Lett.* **39**, 5014 (2014)
- [7] J. Capmany, D. Novak, Microwave photonics combines two worlds, *Nature Photonics* **1**, 319 (2007)
- [8] M.S. Bigelow, N.N. Lepeshkin, R.W. Boyd, Observation of ultraslow light propagation in a ruby crystal at room temperature, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 113903 (2003)
- [9] P. Berger, J. Bourderionnet, D. Dolfi, F. Bretenaker, M. Alouini, Slow and Fast Light in Semiconductor Optical Amplifiers for Microwave Photonics Applications, in *Advances in optical amplifiers*, Chap. 9, Intech, 2011
- [10] M. Alouini et al., Bridging the gap between THz and microwave photonics through optoelectronic generation of interleaved combs, *Microwave Photonics*, 350 (2014)
- [11] M. Alouini, B. Benazet, M. Vallet, M. Brunel, P. Di Bin, F. Bretenaker, A. Le Floch, P. Thony, Offset phase locking of Er:Yb:Glass laser eigenstates for radio-frequency photonics applications, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **13**, 367 (2001)
- [12] A. Rolland, G. Loas, M. Brunel, L. Frein, M. Vallet, M. Alouini, Non-linear optoelectronic phase-locked loop for stabilization of opto-millimeter waves: towards a narrow linewidth tunable THz source, *Opt. Express* **19**, 17944 (2011)
- [13] J. Li, X. Yi, H. Lee, S.A. Diddams, K.J. Vahala, Electro-optical frequency division and stable microwave synthesis, *Science* **345**, 309 (2014)

## Amélioration de la vision 3D IDS simplifie le traitement des données de caméra 3D

# IDS

PUBLI-RÉDACTIONNEL

La perception de l'environnement avec des données de caméra 3D permet aujourd'hui la mise en œuvre de nombreuses applications innovantes qui, jusqu'à ce jour, ne pouvaient être réalisées que par des personnes. La robotique permet une détection des objets digne de l'homme et une réponse automatique à différentes situations. Outre les dimensions spatiales et la position dans l'atelier, il est également possible de tirer des conclusions précises sur les divergences ou les imperfections en comparant les données avec des objets de référence.

Le traitement des caméras 3D et de leurs données est très complexe. Il exige beaucoup de travail en amont et une période d'installation lors de la création d'une application. Dans le cadre d'applications multicaméras simples ou en association avec la robotique,

des calibrages sophistiqués de plusieurs systèmes de coordonnées sont nécessaires avant de pouvoir réellement utiliser les données. En raison de la forte dépendance au système, l'application véritable doit souvent être développée directement sur le système pour générer des données exploitables. Ces exigences sont prises en compte dans le développement du nouveau kit de développement logiciel Ensensio SDK 2.2 et des nouvelles variantes 5 MP des caméras 3D Ensensio X.

### Pour en savoir plus :

[www.ids-imaging.fr/3d-vision](http://www.ids-imaging.fr/3d-vision)

IDS sera présent sur le salon international VISION qui se déroulera du 6 au 8 novembre 2018 à Stuttgart, pavillon 1F72.

### CONTACT

**IDS IMAGING DEVELOPMENT SYSTEMS GMBH**

Dimbacher Str. 6-8, 74182 Obersulm, Allemagne

Tél.: +49 7134 96196-0 - [info@ids-imaging.fr](mailto:info@ids-imaging.fr) - [www.ids-imaging.fr](http://www.ids-imaging.fr)



# DES MEMS à l'optomécanique en cavité

L. DURAFFOURG  
B. TAUREL  
J.M. FEDELI  
P. LABEYE

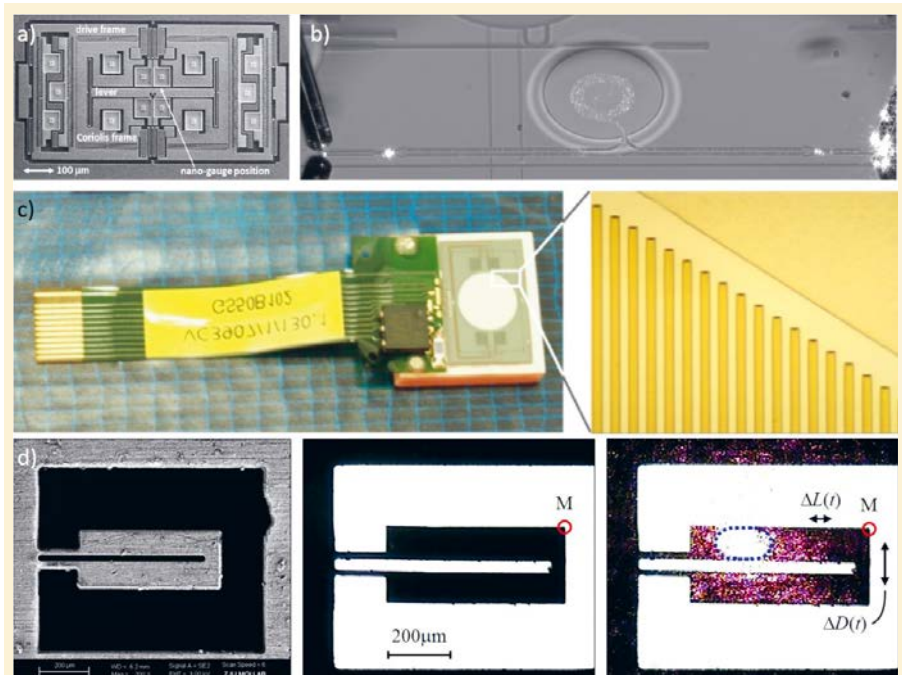
Univ. Grenoble Alpes, CEA,  
LETI, DOPT, SNAP/LCO, 38054  
Grenoble Cedex 9, France  
[laurent.duraffourg@cea.fr](mailto:laurent.duraffourg@cea.fr)

Les travaux sur les microsystèmes mécaniques ont abouti à de nombreux succès techniques. Les technologies relatives aux capteurs inertiels sont désormais transférées à l'industrie, démontrant leur maturité. Ce domaine se renouvelle en intégrant la photonique et en exploitant les interactions de modes optiques résonants avec des modes de résonances mécaniques. Cette nouvelle approche aboutit à des preuves de concept de capteurs optomécaniques ultra sensibles ou de fonctions optiques nouvelles.

## Des MEMS aux NEMS en passant par les MOEMS

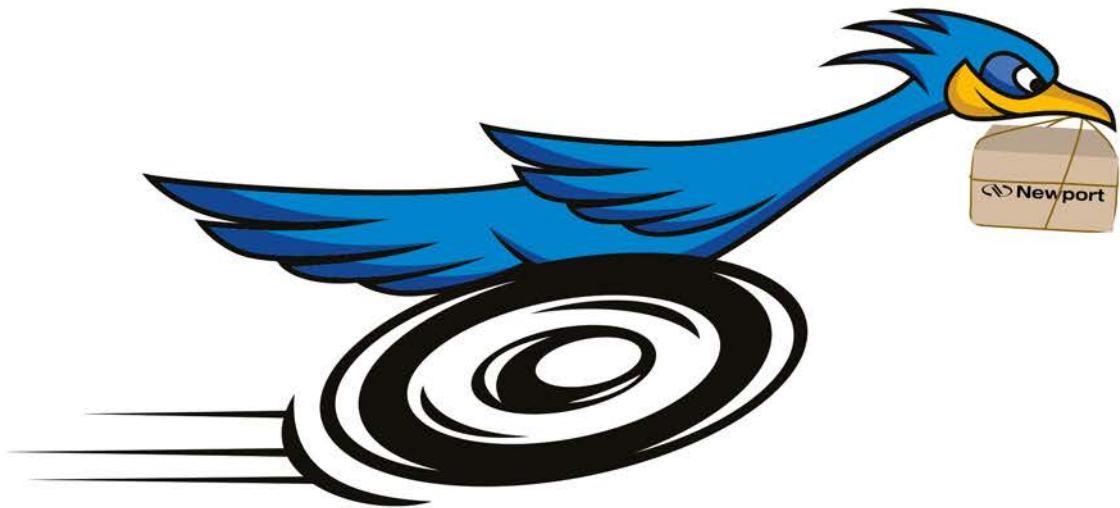
### MEMS

Développés depuis les années 1970, les microsystèmes électromécaniques (MEMS pour *micro electromechanical systems*) sont des éléments transducteurs dont la particularité est de transformer une énergie mécanique (mouvement, contrainte) en énergie électrique. Leurs dimensions latérales sont comprises entre quelques microns et quelques centaines de microns et leur épaisseur est en général de quelques dizaines de microns. La transduction peut se faire dans les deux sens : le système mécanique peut être mis en mouvement par une force d'origine électrostatique, piézoélectrique, magnétique ou encore électro/opto/thermique et inversement le déplacement mécanique peut être mesuré via une détection capacitive, piézoélectrique, magnétique ou encore piézorésistive pour ne citer que les principes les plus communs. Les MEMS les plus emblématiques sont les micro capteurs tels que les accéléromètres, gyromètres (*figure 1a*) et les capteurs de pression systématiquement présents dans les applications grand public (téléphones portables, jeux), et les transports (routier et aéronautique). Les micro actionneurs sont, quant à eux, exploités dans les



**Figure 1.** Quelques exemples de MEMS & MOEMS de la littérature. (a) Micro-gyromètre mesurant la force de Coriolis appliquée sur une masse mobile (cette force étant induite par une vitesse de rotation autour d'un axe perpendiculaire au plan du capteur). Source : CEA-LETI. (b) Capteur de pression optique intégré sur silicium : un guide en spirale est fabriqué sur une membrane suspendue se déformant sous l'effet d'une dépression entre le volume de référence sous la membrane et le volume de mesure au-dessus de la membrane, la modulation d'indice liée à la contrainte est mesurée par interférence à deux ondes via un Mach-Zehnder sur silicium. (c) Micro réseau de Bragg mobile permettant de sélectionner les modes de cavité d'un laser à cascade quantique à cavité étendue externe (EC-QCL). (d) Micro levier en forme de fer à cheval actionné par effet opto-thermique en focalisant un faisceau optique sur une partie du levier ; la différence de dilatation entre la partie recevant le flux optique et la partie laissée dans l'obscurité induit un déplacement perpendiculaire à l'axe de dilatation. Crédits : (a) S. Dellea et al., Ultra-low-voltage gyroscopes based on piezoresistive NEMS for drive-motion and coriolis-motion sensing, 2017 IEEE 30th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), pp. 21-24 (2017) ; (b) V. Rochus et al., Fast analytical model of MZI micro-optomechanical pressure sensor, *J. Micromech. Microeng.* **28**, 064003 (2018) ; (c) L. Butschek et al., Microoptoelectromechanical systemsbased external cavity quantum cascade lasers for real-time spectroscopy, *Optical Engineering* **57**, 011010 (2018) ; (d) Q.Y. You et al., Dynamic properties of symmetric optothermal microactuator, *J. Micromech. Microeng.* **27**, 105011 (2017). (a), (b), (d) Figures protégées par le droit d'auteur et non couvertes par la licence Creative Commons : (a) © IEEE ; (b), (d) © IOP Publishing.





## La recherche prend du temps. *Pas les commandes de matériel.*

Des milliers de produits en stock et  
**une livraison en 2 jours GRATUITE\***

Equiper votre labo ou vos installations de recherche doit être rapide et efficace. Chez MKS, nous avons compris cela. C'est pourquoi nous augmentons considérablement nos stocks, nous vous proposons une nouvelle expérience d'achat en ligne simplifiée et la livraison en **2 jours GRATUITE\***. L'achat de produits Newport pour votre labo vient de gagner beaucoup en facilité et en rapidité.

- Un CHOIX plus rapide** – Trouvez plus vite avec la recherche améliorée et des filtres
- Une LIVRAISON plus rapide** – Livraison en 2 jours GRATUITE\* sur tous vos produits Newport préférés
- Des RÉSULTATS plus rapide** – L'excellente qualité des produits et de notre support technique vous ouvre la voie du succès

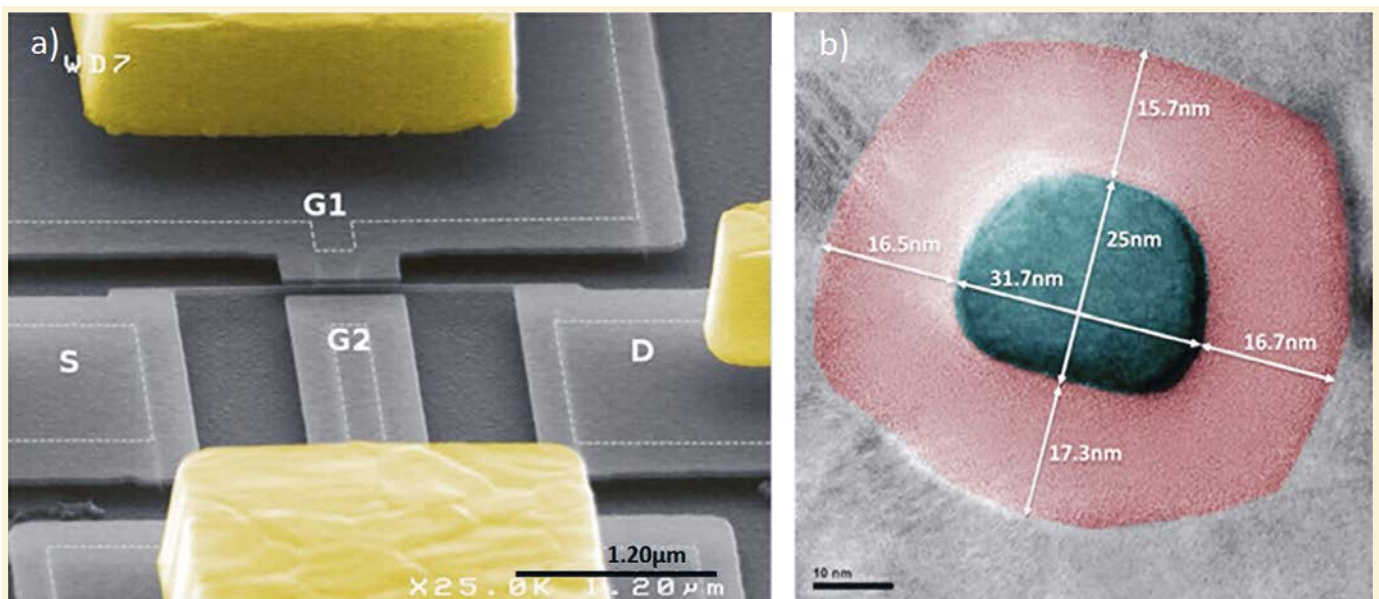
Soyez réactifs avec Newport. Il n'y a pas de temps à perdre.  
Visitez [www.newport.com](http://www.newport.com) dès aujourd'hui

\* Pour plus de détails et les conditions, consultez [www.newport.com/free2day](http://www.newport.com/free2day)  
S'applique uniquement aux commandes passées et livrées en Amérique du Nord et en Europe



Pour plus d'informations sur notre marque Newport, visitez  
[www.newport.com](http://www.newport.com).

**Un choix, une livraison et des résultats plus rapides.**

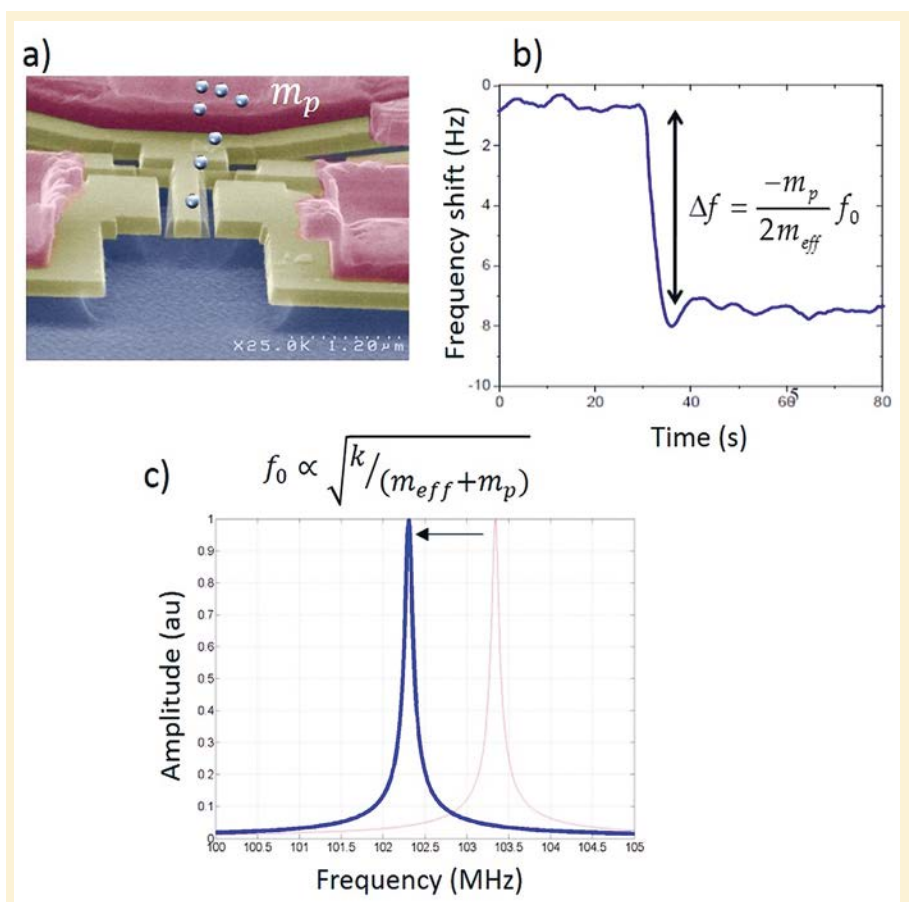


**Figure 2.** Exemple d'une nanostructure vibrante (source : CEA-LETI). (a) Nanofil suspendu utilisé en transistor sans jonction dont la déplétion est modulée par sa vibration induite par les deux grilles G1 et G2 placées de part et d'autre du fil. (b) Section du nanofil (la partie colorée correspond à l'enrobage pour réaliser la microscopie par transmission électronique). Crédit : A. Koumela et al., High frequency top-down junction-less silicon nanowire resonators, *Nanotechnology* **24**, 435203 (2013). Figure protégée par le droit d'auteur et non couverte par la licence Creative Commons : © IOP Publishing.

microphones ou pour constituer des micro pompes pour des applications fluidiques médicales. À l'heure actuelle, la détection capacitive est la plus largement répandue car elle consomme peu d'énergie et bénéficie d'une compatibilité naturelle avec les technologies CMOS des circuits de contrôle [1]. C'est un point qui a fortement handicapé l'utilisation de l'optique pour réaliser la lecture des mouvements mécaniques malgré la grande précision de mesure inhérente à la lumière (en mesure interférentielle notamment). Cette limitation est désormais moins évidente avec l'émergence de la photonique sur silicium qui est pensée et calquée sur l'approche CMOS (mêmes matériaux, mêmes outils de fabrication, puissances électriques consommées et tension de commande compatibles avec les circuits CMOS) (figure 1b). Ceci étant, la gestion de fonctions optiques par des MEMS est un domaine connexe actif.

## MOEMS

En effet, les microsystèmes optiques (appelés MOEMS pour *micro optomechanical systems*) se résument à des MEMS gérant une ou plusieurs fonctions optiques. Ils servent en



**Figure 3.** Principe de mesure de masse (source : CEA-LETI). (a) Exemple de nano-résonateur utilisé pour réaliser la mesure de masse et sur lequel des particules sont envoyées (adapté de [1]). (b) Mesure en temps réel de la fréquence de résonance du levier vibrant via une PLL : le saut de fréquence est provoqué par l'arrivée d'une masse. (c) Vue spectrale : décalage de la fréquence de résonance propre du nano-levier induit par l'arrivée d'une particule (passage du spectre rouge au spectre bleu).

particulier à modifier la propagation de la lumière en milieu libre ou guidé [2]. Les micro-miroirs actionnés selon un ou deux angles de rotation (DMD pour *digital micro-mirror* devices par exemple) utilisés dans les vidéoprojecteurs, des guides optiques suspendus reconfigurables ou bien encore des systèmes optiques reconfigurables pour l'optique adaptative en sont quelques exemples typiques. Plus récemment, des réseaux de Bragg MEMS ont été intégrés à des sources laser à cascade quantique à cavité étendue afin d'accorder la longueur d'onde d'émission sur une large plage de longueurs d'onde pouvant atteindre  $1,5 \mu\text{m}$  (figure 1c). L'application visée est la spectroscopie infrarouge de gaz en temps réel. Ces exemples trouvent des applications concrètes dans des produits commerciaux.

Des micro-accéléromètres ou des capteurs de pression optiques (figure 1b) ont aussi été mis en œuvre. Différentes architectures ont été proposées : (i) mesure de la variation de l'intensité transmise induite par le mouvement d'une masse d'épreuve, par exemple, en venant contraindre un guide d'onde provoquant ainsi une variation de l'indice effectif, (ii) mesure interférentielle à deux ondes ou en cavité menant à des résolutions extrêmement fines du déplacement. Plus récemment encore, des tentatives d'actionnement par effet opto-thermique de MEMS ont été réalisées (figure 1d).

## NEMS

Depuis le début de ce siècle les micro systèmes ont basculé dans le domaine de la nano-mécanique et sont devenus des nanosystèmes (*nano electromechanical systems*, NEMS). Ainsi, des éléments mécaniques suspendus 2D (nano-membrane), 1D (nanofil présenté en figure 2a et 2b) voire 0D (boîte quantique) ont rapidement vu le jour [3]. Leurs dimensions extrêmement faibles sont à l'origine de propriétés physiques intrinsèques particulières : conduction thermique ou électrique balistique, piézorésistivité géante sont parmi les plus connues. Des phénomènes extrinsèques tels que la raréfaction de l'air dans les faibles volumes, les forces de proximité purement quantiques (force de Casimir, ou de Van der Waals) ont aussi un impact fort sur leurs mouvements. Les NEMS, d'abord mis en œuvre dans des expériences fondamentales pour sonder des mécanismes de physique mésoscopique, ont démontré des capacités hors normes pour des applications non conventionnelles pour des MEMS. On peut citer par exemple les capteurs de forces moléculaires, les capteurs biochimiques, des capteurs de masse ultra-sensibles pour la mesure de gaz ou la spectrométrie [3].

Avant de conclure cette vision forcément parcellaire des micro ou nanosystèmes, il est très instructif de s'intéresser au principe de mesure utilisé dans ces « nano-balances ». Celui-ci consiste à suivre le décalage en fréquence d'un nano-résonateur maintenu en vibration (à amplitude fixe contrôlée) à l'aide d'un circuit à boucle fermée telle qu'une *phase locked loop* (PLL) ou un circuit d'auto-oscillation.

# 150 références de fibres en stock !

Livrables sous 3 jours  
Commandes en ligne possible



## Fibres actives simple et double clad

- Er, Er/Yb, Yb, Ho, Tm, Tm/Ho et Nd
- PM, LMA jusqu'à  $30 \mu\text{m}$

## Fibres PM, Polarisantes et Spun

## Fibres durcies

- Revêtement Polyimide HT
- Résistantes aux radiations
- Spatiales

**CODE PROMO REVUE PHOTONIQUES : P0918**

Frais de bobinage et d'expédition offerts\*

\* Offre valable jusqu'au 31/10/2018

IXblue Photonics  
Division Fibres  
rue Paul Sabatier  
22300 Lannion

02 96 04 10 50  
contact.photonics@ixblue.com  
www.photonics.ixblue.com

**IXblue**  
PHOTONICS

Tout élément venant se déposer à sa surface induit un changement de fréquence qu'on mesure en continu (la masse et/ou les contraintes de surface changent) (cf. *figure 3*). Le principe est donc d'utiliser une nano-horloge dont la période des battements est modifiée par l'ajout de masse – le but du jeu étant de compter le nombre de périodes sur une certaine durée de mesure avant et après dépôt. À la résonance, son amplitude de vibration  $x(\omega_0) \propto Q/m_{\text{eff}}\omega_0^2$  est inversement proportionnelle à la raideur mécanique équivalente  $k_{\text{eff}} = m_{\text{eff}}\omega_0^2$ . On retrouve ainsi la loi de Hook multipliée par le facteur de qualité  $Q$ . On peut aussi montrer que la plus faible masse mesurable  $\delta m$  par ce nano-oscillateur dépend de sa masse effective  $m_{\text{eff}}$  (masse effectivement en mouvement selon le mode de résonance choisi) et de sa stabilité fréquentielle ce qui paraît tout à fait naturel  $\delta m = 2m_{\text{eff}}\delta\omega/\omega_0$ .

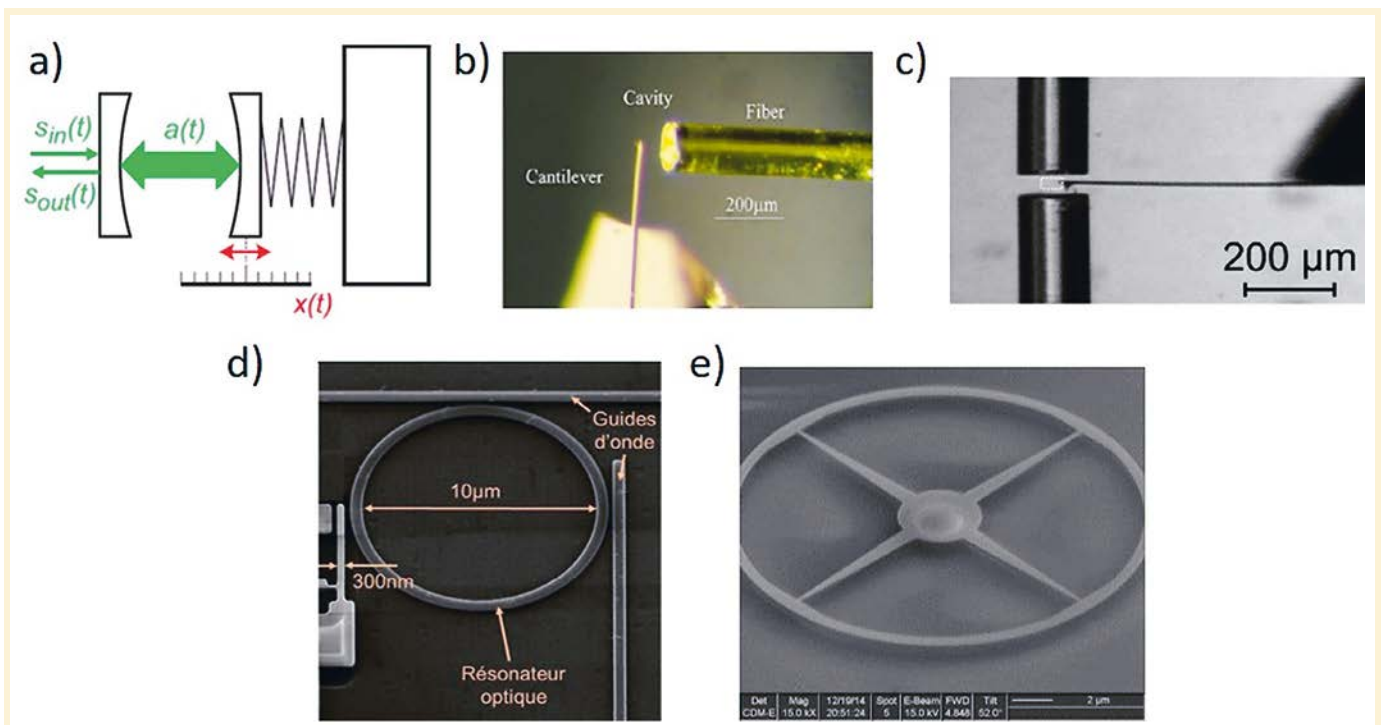
Les masses effectives utilisées varient entre 1 pg et 10 fg. Les fréquences de résonance mécaniques  $\omega_0/2\pi$  varient entre 10 MHz et 1 GHz ce qui peut paraître extrêmement élevé par rapport à notre sens commun de la mécanique. La stabilité fréquentielle relative  $\delta\omega/\omega_0$  est classiquement estimée par la variance d'Allan  $\sigma_A(\tau)$  sur la gigue en fréquence en fonction du temps d'intégration  $\tau$ . Ce type de composant a démontré des stabilités de l'ordre de  $10^{-7}$  sous vide ce qui a permis d'atteindre des limites de détection massiques de l'ordre de l'atogramme ( $10^{-18}$  g) à la dizaine de daltons ( $10^{-20}$  g) soit une dizaine d'atomes d'hydrogène ! Ceci offre des opportunités uniques de mesurer des atomes, des molécules chimiques, ou des biomolécules telles que des protéines ou des virus sans dénaturer le composé original [3]. Il est aussi tout à fait possible de mesurer le mouvement Brownien

du nanosystème lui-même dû à son couplage avec le bain thermique environnant. Les mesures électriques capacitives ou piézorésistives ont démontré des résolutions en déplacement de l'ordre du fm/ $\sqrt{\text{Hz}}$  et en force d'environ 10 fN/ $\sqrt{\text{Hz}}$ . Ces valeurs sont meilleures que les résolutions obtenues par mesure interférentielle classique.

**L'optomécanique** vient finalement compléter ce cycle de recherche en couplant un résonateur mécanique tel que décrit ci-dessus et un résonateur optique.

### Cavité optomécanique

Formellement un système optomécanique exploite l'interaction réciproque entre un résonateur mécanique et un résonateur optique qui est une cavité optique [4] : les forces optiques contrebalancent les forces de réactions mécaniques menant à des systèmes bouclés



**Figure 4.** Exemple de cavités optomécaniques. (a) Schéma de principe d'une cavité optomécanique. (b) Cavité Fabry-Pérot matérialisée par un cantilever et une fibre optique, le cantilever faisant office de miroir mobile. (c) Nanostructure suspendue placée dans une cavité Fabry-Pérot, la condition d'accord de phase des ondes stationnaires présentes dans la cavité étant modulée par la vibration du nano-élément (nano-poutre, nanotube, nano-membrane par exemple). (d) Cavité optomécanique constituée d'un élément vibrant dans le champ proche d'un anneau résonant, l'indice effectif de ce dernier étant modifié avec le mouvement de la poutre ; en retour la cavité optique actionne le cantilever par effet du gradient de champ. (e) Micro-cavité optique suspendue en anneau dont la longueur effective varie avec son propre mouvement de respiration mécanique, ce dernier étant mis en vibration par la pression des photons intracavité. Crédits : (b) C. Metzger et al., Optical self-cooling of a deformable Fabry-Perot cavity in the classical limit, *Physical Review B* **78**, 035309 (2008) ; (c) I. Favero et al., Fluctuating nanomechanical system in a high finesse optical microcavity, *Optics Express* **17**, 12813 (2009) ; (d),(e) : CEA-LETI. (b) Figure protégée par le droit d'auteur et non couverte par la licence Creative Commons : © American Physics Society.

en interaction permanente. Ces systèmes diffèrent donc drastiquement des MOEMS, les forces optiques (de gradient de champ ou de pression radiative) étant explicitement utilisées pour générer des oscillations mécaniques, qui en retour modulent la puissance optique intra cavité. Dans la plupart des réalisations, la fréquence de résonance optique de la cavité  $\omega_c/2\pi$  varie avec le mouvement de l'oscillateur mécanique. Ce couplage a été initialement étudié dans les expériences de mesure du déplacement quantique ultime des miroirs utilisés dans les interféromètres géants LIGO ou VIRGO afin d'optimiser le schéma de mesure des ondes gravitationnelles. Ce type de cavités couplées a démontré des résolutions en déplacement proche de  $10^{-21}$  m/ $\sqrt{\text{Hz}}$ , soit une fraction infinitésimale du diamètre d'un noyau atomique... Cette valeur étant une conséquence du principe d'incertitude d'Heisenberg fixant les fluctuations quantiques de point zéro du système mécanique  $x_{zpf} = \sqrt{\hbar/2m_{\text{eff}}\omega_0}$  ( $\hbar$  est la constante de Planck réduite) lorsque le mode mécanique est d'amplitude moyenne nulle. Notons tout de même que ce régime quantique n'est atteignable que pour des ultra-basses températures telles que  $\hbar\omega_0 > k_B T$  soit pour un résonateur de 1 GHz une température de 50 mK.

Le système optomécanique le plus intuitif correspond à une cavité Fabry-Pérot dont l'un des miroirs est libre de se mouvoir sous la pression optique intra-cavité. La force du couplage optomécanique est usuellement exprimée par le coefficient  $g_\omega = (\partial\omega_c/\partial x) \sim 1/d$  (en nm/Hz) qui mesure le décalage de la fréquence de résonance optique induit par le mouvement  $x(\omega_0)$  du résonateur mécanique (voir *figure 4a*). On constate que ce couplage est inversement proportionnel à la longueur effective  $d$  de la cavité optique. Le décalage fréquentiel optique sera aussi d'autant plus fort que l'amplitude mécanique sera grande. En retour la puissance optique intra-cavité appliquée sur le résonateur mécanique sera modulée proportionnellement au nombre de

photons intracavité  $\overline{n_{\text{cav}}} : F_{\text{rad}} = -\overline{n_{\text{cav}}}\hbar g_\omega$ . À partir de ces deux constatations, nous sommes tentés de réaliser des systèmes de petites tailles capables d'accumuler une énergie intra-cavité la plus grande possible. On pense évidemment à une mini cavité Fabry-Pérot (*figure 4b*) qui est le système le plus simple. Pour aller plus loin dans l'analyse il est souvent utile d'extraire le taux de couplage mécanique/optique réduit :  $g_0 = g_\omega x_{zpf}$  (en Hz) qui mesure le décalage de la fréquence de résonance induit par les fluctuations de point zéro du système mécanique,  $x_{zpf}$ .  $g_0$  constitue un paramètre caractéristique permettant de comparer les différentes architectures proposées. Ces expressions montrent finalement que le système doit avoir une fréquence de résonance mécanique élevée, un couplage photon/phonon  $g_0$  fort et une interaction ultra-faible avec l'environnement (faible taux de dissipation). Tout ceci incite les chercheurs à exploiter des micro-résonateurs tels qu'illustrés en *figure 4* avec des facteurs de qualité mécanique et optique les plus forts possibles [4]. La *figure 4b* montre la reproduction miniaturisée d'une cavité Fabry-Pérot de la *figure 4a*. L'approche la plus commune consiste à réaliser une micro-cavité optique (anneau, disque, tore, cristal photonique) dont la longueur de cavité effective est modulée avec ses vibrations mécaniques (*figure 4e*). Une seconde approche consiste à exploiter un effet de modulation de l'indice effective via le mouvement d'un résonateur mécanique placé en champ proche de la cavité optique (*figure 4d*). On peut constater que ces composants sont issus des développements technologiques de la photonique sur silicium ou sur matériaux 3/5 notamment. Ces systèmes permettent de réduire drastiquement la complexité de mise en oeuvre relative aux systèmes macroscopiques. De nombreux autres modes de réalisation exploitant une micro cavité photonique sont présentés dans la référence [4]. Selon les modes de réalisation la valeur de  $g_0$  varie entre 1 kHz et 1 MHz.

## Laser Accordable à Haute Performance



L'innovation depuis 1979

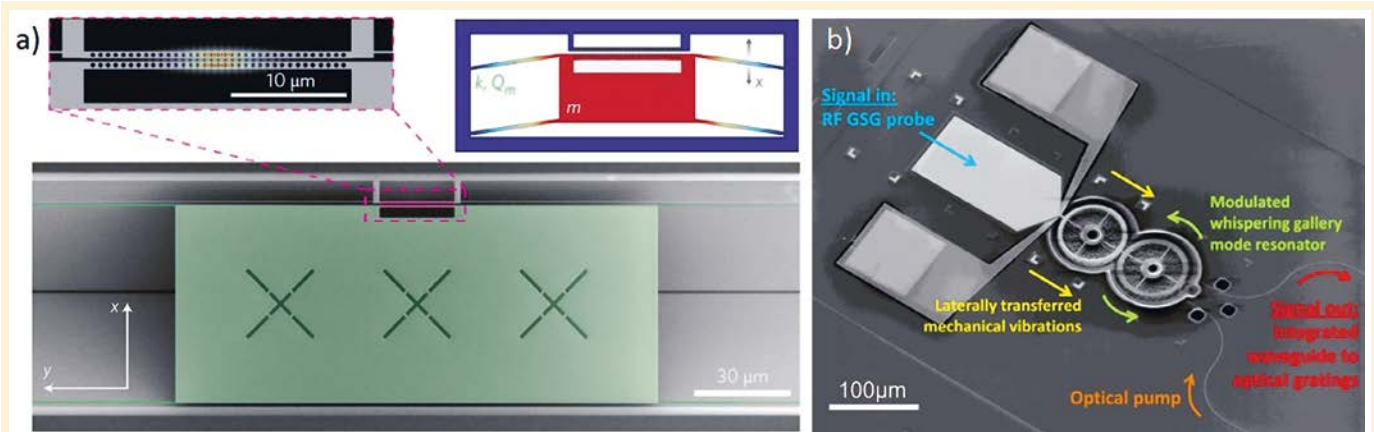
Lasers accordables disponibles de 1260 à 1680nm, pour vos applications de guides d'ondes et de caractérisation de composants optiques.

**SANTEC EUROPE LIMITED**

Tel: +44-20-3176-1550

Grand Union Studios,  
332 Ladbroke Grove,  
London, W10 5AD, UK





**Figure 5.** Exploitation pratique des systèmes optomécaniques [5]. (a) Résonateur piézoélectrique en anneau en AlN actionnant un second résonateur optique en anneau ; ce système permet de transformer un signal RF en un signal optique modulé à la même fréquence. (b) Microaccéléromètre dont le déplacement change le couplage optomécanique entre deux cavités optiques formées par des cristaux photoniques. Crédits : (a): S. Ghosh et al., *IEEE Transactions on electron devices* **65**, 1391 (2018) ; (b) A.G. Krause et al., A high resolution microchip optomechanical accelerometer, *Nature Photonics* **6**, 768 (2012). (b) Figure protégée par le droit d'auteur et non couverte par la licence Creative Commons : © SpringerNature.

Une approche alternative au Fabry-Pérot de la *figure 4b* consiste à placer une nanostructure entre deux miroirs dont les dimensions sont sous la longueur d'onde de résonance de la cavité optique (*figure 4c*) – structure sublambda. Les conditions de résonance sont alors modifiées par la position de cette nanostructure.

L'optomécanique commence à investir des domaines applicatifs tels que les capteurs inertiels ultra-sensibles ayant des bandes passantes de mesure élevées (*figure 5a*), les capteurs de force, les oscillateurs hyperfréquences à faible bruit de phase (*figure 5b*) et le traitement du signal optique [5]. Des résolutions en déplacement de quelques  $10^{-17}$  m/ $\sqrt{\text{Hz}}$  ont été annoncées laissant imaginer que ce principe de mesure est particulièrement intéressant pour réaliser des accéléromètres, gyromètres ou magnétomètres de petites dimensions, rapides et d'une extrême sensibilité [5]. Imaginons un accéléromètre optomécanique ayant une partie mécanique massique de  $10^{-10}$  kg et une fréquence de résonance de 10 kHz pour un facteur de qualité de 100. Cet élément peut être couplé à une micro cavité optique haute finesse ( $Q \sim 10^5$ ) dont le coefficient de couplage  $g_0$  est de l'ordre de 100 kHz. Ce type de système a une sensibilité théorique de 25  $\mu\text{m}/g$  ( $g = 9,81$  m/s $^{-1}$ ) et une limite de détection de  $10^{-9}$  g sur une durée de mesure de 250 ms, soit 0,25 ng/ $\sqrt{\text{Hz}}$ . À titre de comparaison, un accéléromètre

de très haute performance possède typiquement des résolutions de l'ordre 100 ng/ $\sqrt{\text{Hz}}$  avec une boucle d'asservissement numérique. Des gyromètres optomécaniques formés par exemple d'une micro cavité en anneau sont aussi des composants en cours d'évaluation et sont pressentis pour concurrencer les gyro-lasers massifs actuels.

## Conclusion et perspectives

L'optomécanique revisite le couplage de deux systèmes résonants formés par un micro ou nano-résonateur mécanique et une cavité optique. Ce domaine est tout à fait connexe de l'électrodynamique en cavité couplant un système à deux états à une cavité optique. Des phénomènes similaires ont effectivement été démontrés. L'efficacité de couplage de type Stokes ou anti-Stokes n'a néanmoins rien d'évident au regard des valeurs des énergies optiques et élastiques mises

en jeu. Les cavités optomécaniques ont démontré leur capacité à observer des propriétés quantiques sur des macro (VIGO, Fabry-Pérot), micro (anneau, tore) voire nanosystèmes mécaniques (nano-membrane, nano-cantilever ou nanotube de carbone). Plus encore, on ne peut pas conclure cet article sans évoquer les systèmes hybrides qui couplent des nano-résonateurs mécaniques à des systèmes à deux niveaux de type centre NV ou boîte quantique en matériau 3/5 où l'émetteur interagit à la fois avec l'oscillateur mécanique et avec les photons piégés dans la cavité optique. À basse température, les développements théoriques et des premières observations expérimentales démontrent qu'il est possible de manipuler les états quantiques de la lumière (en comprimant par exemple un état cohérent par l'interaction mécanique) ou inversement d'exploiter des états non classiques de la lumière pour améliorer le rapport signal à bruit en déplacement des capteurs.

### POUR EN SAVOIR PLUS

- [1] A.C. Fischer, Integrating MEMS and ICs, *Microsystems & Nanoengineering* (2015) **1**, 15005 (2015)
- [2] M.C. Wu, Optical MEMS for lightwave communication, *Journal of Lightwave Technology* **24**, 4433 (2006)
- [3] L. Duraffourg, J. Arcamone, *Nanoelectromechanical Systems*, 1<sup>st</sup> edn., R Baptist, L Duraffourg, John Wiley & Sons, Inc (2015)
- [4] M. Aspelmeyer et al., Cavity optomechanics, *Reviews of Modern Physics* **86**, 1391 (2014)
- [5] M. Metcalfe, Applications of cavity optomechanics, *Applied Physics Reviews* **1**, 031105 (2014)

# OÙ EN EST LA CONVERSION photovoltaïque de l'énergie solaire ?

Daniel LINCOT

CNRS, Institut Photovoltaïque d'Ile-de-France,  
30 route départementale 128, 91120 Palaiseau  
[daniel.lincot@ipvf.fr](mailto:daniel.lincot@ipvf.fr) - [www.ipvf.fr](http://www.ipvf.fr)

Le photovoltaïque poursuit sa progression dans le secteur de l'énergie avec une capacité installée au niveau mondial qui a pratiquement doublé entre 2015 et 2017 (415 GW fin 2017 contre 235 GW fin 2015 [1,2]) et devrait atteindre près de 500 GW fin 2018. En 2017, les nouvelles installations ont atteint près de 100 GW, dont 53 en Chine, et concernent de plus en plus de pays et de régions du monde, en particulier l'Inde, l'Amérique latine, l'Australie, au-delà de ses bases traditionnelles en Europe, au Japon et aux États-Unis. La barre symbolique du terawatt devrait être atteinte au début de la prochaine décennie, avec des volumes d'installations annuels qui pourraient atteindre plusieurs centaines de GW.

La figure 1 présente une photo d'une ferme photovoltaïque, construite en plein désert d'Atacama, où le photovoltaïque se développe de façon accélérée et très bien planifiée. En France, la puissance installée est maintenant de 8 GW, avec 875 MW installés en 2017, notons que les Pays-Bas ou le Chili font presque aussi bien (853 MW et 668 MW respectivement) [2]. La tendance générale est à l'augmentation des prévisions au niveau mondial et à la mise en place de plans volontaristes. Notons par exemple en France le plan solaire du gouvernement visant à atteindre 32 % d'énergies renouvelables en 2030 (contre 22 % aujourd'hui), ou l'annonce d'EDF prévoyant d'installer 30 GW de photovoltaïque en 2035 ; et au niveau international, l'Alliance Solaire Internationale, lancée lors de la COP21 par l'Inde et la France,

et qui regroupe aujourd'hui près de 121 pays, avec l'objectif de mobiliser 1000 milliards de dollars d'ici 2030. Dans le cadre de ce plan, l'Inde vise par exemple l'installation de 100 GW de photovoltaïque d'ici 2022, avec déjà 18,3 GW fin 2017.

Ces éléments peuvent être ramenés de façon plus parlante à l'énergie électrique produite. Pour cela on introduit le facteur de capacité qui est la production ramenée à son équivalent en heures pleine puissance par rapport à la puissance théorique à 100 % (8760 h). On passe ainsi de 10 % dans le nord de l'Europe où 1 GW produira 876 MWh, à 30 % dans le désert d'Atacama où 1 GW produira 2,6 TWh. Avec une valeur moyenne de 12 %, ce sont 435 TWh/an, soit près de la consommation électrique française totale, qui proviennent de la capacité mondiale installée fin 2017. Cela correspondrait



**SCIENTEC**  
La Solution à vos mesures

**PHOTOMÉTRIE**  
Colorimétrie - Radiométrie  
GAMME COMPLÈTE  
D'APPAREILS PORTABLES



**Luxmètre IRC CL-70F**  
Efficace & performant  
Sources lumineuses et LED, Nombreux types de mesures...



**Photomètre Chromamètre Luminancemètre CS-150 ou LS-150**  
Précis & rapide  
Large plage de luminance...



**Spectroradiomètre CL-500A**  
Précis & performant  
Source LED/EL, Température de couleur, IRC...



**KONICA MINOLTA**



**Photomètre Chromamètre CL-200A**  
Polyvalent / léger  
Eclairage, R&D, Production...



**ScienTec c'est aussi, la distribution de :**  
Luxmètres  
Photomètres  
Chromamètres  
Luminancemètres  
Vidéocolorimètres  
Photogoniomètres  
Spectroradiomètres  
Sources de référence...





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



**Figure 1.** Ferme solaire Luz del Norte située dans le désert d'Atacama près de Copiapo. La région possède une des ressources solaires parmi les plus élevées au monde, avec près de 4 MWh de rayonnement direct reçu par an sur une surface normale au rayonnement. Celui-ci est pratiquement complètement direct (97 %). Cette ferme solaire de 141 MW est basée sur la technologie CdTe avec suivi selon un axe. Son facteur de capacité est de 30 %. L'électricité produite est acheminée par un réseau haute tension directement vers la zone centrale de Santiago, très peuplée. (Crédit photo : Daniel Lincot)

à 2,14 % de la consommation mondiale d'électricité selon l'AIE (contre 1,8 % fin 2016 avec près de 7,5 % en Allemagne, Grèce, Italie, 6 % au Japon, 2 % en France tandis que le Honduras bondit à la première place avec 12,5 % – exemple d'un pays présentant des capacités électriques préexistantes limitées) [2]. Cela donne une bonne indication du poids qu'a pris en quelques années le photovoltaïque.

Le moteur de ce développement accéléré est en fait passé de la conséquence de politiques de soutien (par les tarifs d'achat préférentiels par exemple) à une compétitivité sur le marché sans subvention. Depuis 2015, la baisse des coûts des matériels et des installations, ainsi que l'amélioration des performances de conversion se sont poursuivies, permettant d'atteindre des coûts de production de l'électricité compétitifs avec les moyens de production traditionnels. En 2016 par exemple en France, elle était descendue en moyenne à 62 €/MWh et dans d'autres pays du monde à 20 \$/MWh. Les prévisions aux États-Unis descendent même jusqu'à 11 \$/MWh en 2022. Le photovoltaïque est donc amené à prendre une part croissante dans la transition énergétique au niveau mondial [3].

## L'évolution des filières photovoltaïques dominantes sur le marché

Les filières photovoltaïques qui constituent le marché en 2017 restent inchangées depuis 2015 : il s'agit de la filière silicium en plaquettes (*wafers*), qui représente 95 % des capacités installées et des filières en couches

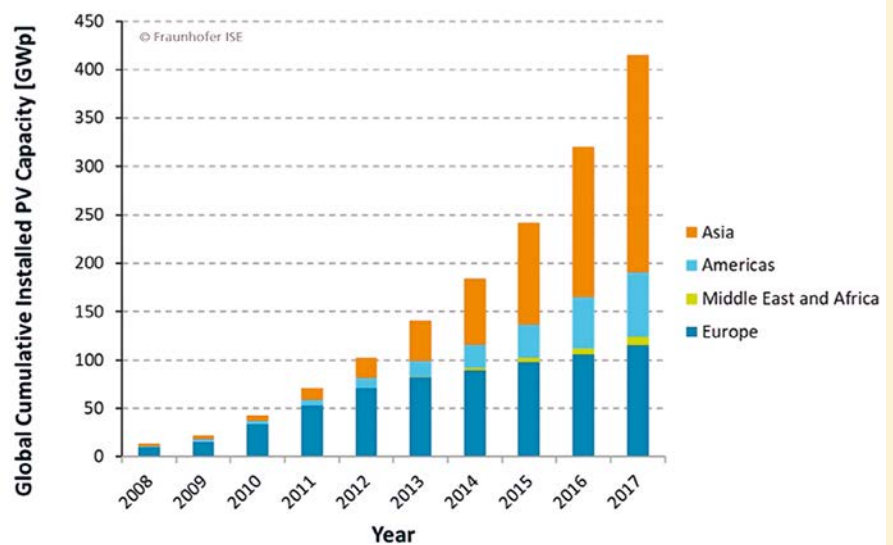
minces avec le trio CdTe, CIGS et silicium amorphe, représentant les 5 % restants [1].

## Le silicium

Au sein de la filière silicium on distingue les filières polycristallines et monocristallines. La première reste dominante avec 62 % des parts de marché, mais la tendance est cependant à l'augmentation de part de la filière monocristalline. On peut noter l'émergence d'une filière quasi-monocristalline dite « monolike » en particulier chez Photowatt en France. Sur le plan des performances moyennes l'amélioration est aussi frappante, avec en 10 ans un passage de 12 à 17 % de rendement module. Le haut de gamme monocristallin est maintenant à 21 % avec un record à 24,4 %.

## Les couches minces

Du côté des couches minces, elles maintiennent leur part de marché globalement (4,5 GW) mais avec une évolution marquée par la progression de la filière CIGS qui s'approche de la filière CdTe qui reste dominante, et surtout par la décroissance continue de la filière silicium amorphe. Tandis que pour la filière CIGS plusieurs nouveaux producteurs (en particulier



**Figure 2.** Évolution de la puissance photovoltaïque installée au niveau mondial suivant les différentes zones géographiques. (Source : ISE Fraunhofer PV report 2018 [1]), figure protégée par le droit d'auteur et non couverte par la licence Creative Commons.





Vous aider à construire  
 Votre futur

**INDUSTRIE**


Solutions  
 standards

**ENGINEERING**


Projets  
 customs



Spectromètres  
 Compacts



Spectromètres  
 FTIR



Caméra  
 multispectrale



Caméra  
 «Pushbroom»  
 spectrale



Caméra Snapshot  
 spectrale



Caméra Qalif  
 spectro



+ 33 6 49 54 52 94

 www.ardop.com  
 sales@ardop.com

TYPE DE CELLULE	RENDEMENT (%) AOÛT 2015	RENDEMENT (%) JUILLET 2018
Multijonctions sous concentration (4 jonctions)	46	46
Tandem sous éclairage standard	31,1	32,8
GaAs monocristallin	28,8	28,9
Silicium monocristallin	25,6	26,6
CIGS	21,7	22,9
CdTe	21,5	22,1
Silicium polycristallin	20,8	22,3
Perovskite hybride (non stabilisée)	20,1	23,3
Couches minces Si	13,6	14
Cellules organiques	11,5	12,6
Cellules à particules quantiques	9,9	13,4

**Tableau 1.** Évolution des rendements record des cellules photovoltaïques sur 3 ans, entre août 2015 et juillet 2018 d'après les données du NREL [4].

chinois) font leur entrée aux côtés du japonais Solar Frontier, la filière CdTe reste dominée par First Solar (USA). Cette dernière devrait rebondir dans les années à venir avec l'annonce de l'augmentation à 6 GW des capacités de production de First Solar. Notons que les performances moyennes des modules CdTe sont passées de 9 à 16 % en 10 ans (annoncées à 17 % pour 2018). Un module record CIGS est à 18,7 % (Solibro).

L'amélioration des performances des modules est souvent sous-estimée au profit de la réduction des coûts, et il est important de montrer que toutes ces filières, à l'exception de la filière silicium amorphe pour l'instant, ont le potentiel d'atteindre les 20 % de rendement moyen au cours des prochaines années.

## La recherche

Sur le front de la recherche, la compétition continue et s'amplifie. Nous avons déjà évoqué dans l'article de 2015 (voir *Photoniques* n° 78) le développement foisonnant des recherches de rupture visant à augmenter les rendements record des différentes filières existantes, et à en faire émerger de nouvelles – un développement remarquablement illustré par la fresque éditée par le Laboratoire National sur les Énergies Renouvelables des États-Unis (NREL) [4]. La *figure 5* reprend

l'état actuel de la fresque en mettant l'accent sur les évolutions depuis 2015. Celle-ci compte pas moins de 24 filières différentes.

Le *tableau 1* extrait les évolutions des rendements record pour les filières les plus représentatives.

## Les cellules silicium

Concernant les cellules au silicium, leur rendement record atteint maintenant les 26,6 % [5], soit une progression de 1 % par rapport au record de 2015. C'est tout à fait remarquable lorsque l'on considère que le rendement théorique, dit de Shockley-Queisser (SQ), est de 29,1 %, soit une valeur à 8 % du record. Pour cela les deux meilleures technologies, à contact arrière et à hétérojonction, ont été combinées par une équipe de Kaneka, qui a également optimisé la passivation électronique des interfaces. Des progrès importants ont été réalisés dans ce domaine avec l'introduction de nouvelles couches de passivation, à base de nitrure ou d'oxydes, plus efficaces et mettant en œuvre également des couches à effet tunnel et des contacts sélectifs (*figure 6*). L'équipe prévoit de porter ce rendement à 27,1 % en corrigeant des pertes identifiées.

Les progrès se sont également portés sur les cellules polycristallines avec une réduction des pertes aux joints de grains, portant le rendement à 22,3 % (ISE Fraunhofer [1]).

TOP 10 COUNTRIES IN 2017				TOP 10 COUNTRIES IN 2017			
1		China	53 GW	1		China	131 GW
2		USA	10,6 GW	2		USA	51 GW
3		India	9,1 GW	3		Japan	49 GW
4		Japan	7 GW	4		Germany	42 GW
5		Turkey	2,6 GW	5		Italy	19,7 GW
6		Germany	1,8 GW	6		India	18,3 GW
7		Australia	1,25 GW	7		UK	12,7 GW
8		Korea	1,2 GW	8		France	8 GW
9		UK	0,9 GW	9		Australia	7,2 GW
10		Brazil	0,9 GW	10		Spain	5,6 GW

**Figure 3.** Classement par pays en 2017 de la puissance PV cumulée et installée en 2017. (Source : AIE-PVPS 2017 [2], figure protégée par le droit d'auteur et non couverte par la licence Creative Commons)

### Les cellules couches minces

Avec un rendement récemment porté à 22,9 % (Solar Frontier) les cellules en couches minces CIGS continuent de progresser et d'engranger les bénéfices introduits par l'introduction de nouveaux éléments alcalins (K, Rb, Cs) à la surface du CIGS durant l'élaboration, qui réduit également les recombinaisons de porteurs. La compréhension des phénomènes mis en œuvre est au cœur des efforts de recherche au niveau international. Cette maîtrise de plus en plus importante de l'élaboration du CIGS débouche également sur un intérêt renouvelé des dépôts à basse température compatibles avec des supports polymères. C'est ainsi qu'en deux ans les équipes de l'IPVF ont pu atteindre 18 % de rendement pour des cellules sur polyimide élaborées à 450 °C (M. Balestrieri et al., *Journal of Photovoltaics* **8**, 1343 (2018)). Ces travaux s'intègrent dans une nouvelle direction pour le photovoltaïque, sur support légers, voire ultralégers et flexibles, pour des applications spécifiques dans l'habitat ou la mobilité par exemple.

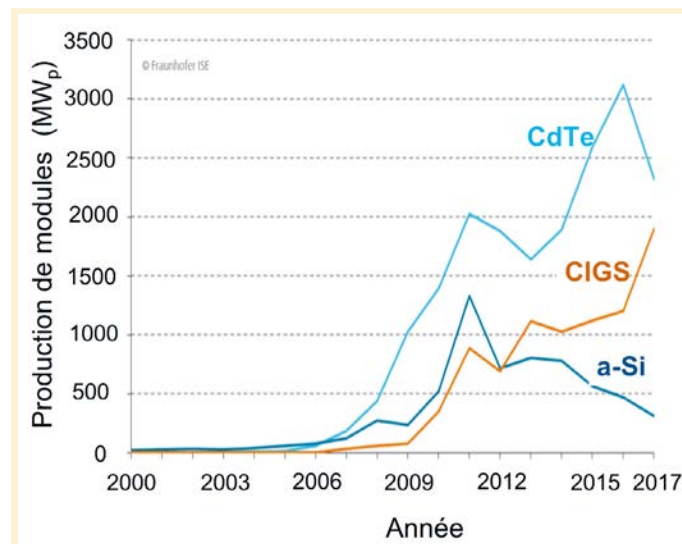
Les cellules CdTe ne sont pas en reste avec une progression à 22,1 %. Là aussi de nouveaux progrès ont été faits sur le plan de la physico-chimie du matériau et des interfaces, que nous avons déjà illustrés en 2015. La nouvelle rupture intervenue depuis est celle de l'ajout de sélénium au sein du CdTe qui permet la réalisation de gradient de composition favorisant la

collecte du photocourant. On peut noter la similitude de plus en plus grande avec les approches CIGS.

### Les cellules perovskites hybrides

La filière perovskite hybride, basée sur l'iodure de méthylammonium (MA) et de plomb (PbMAI<sub>3</sub>) poursuit sa progression spectaculaire. Déjà associée en 2015 à des performances remarquables pour une filière émergente née en 2012, avec le franchissement de la barre symbolique des 20 %, c'est maintenant la barre des 23 % qui vient d'être franchie ! Avec 23,3 % de rendement, les cellules perovskites dépassent même les autres filières couches minces, y compris le silicium polycristallin. Il faut cependant nuancer ce classement car ces résultats

restent encore associés à des dispositifs de petite dimension (quelques mm<sup>2</sup>) et ne présentent pas la stabilité et la fiabilité dans le temps démontrées par les autres technologies. Cependant des progrès continus en matière de stabilité sont publiés, égalant ou dépassant désormais les 1000 heures de fonctionnement sous éclairage solaire standard notamment grâce à l'utilisation d'alliages de plus en plus complexes dits à cations et anions multiples. Pour continuer d'améliorer à la fois la fiabilité et les performances, les chercheurs portent également leurs efforts sur la structure des cellules pérovskites dans leur globalité car les interfaces pérovskites/matériaux transporteurs de charges sont identifiées comme la source de bon nombre de problèmes. Un axe de recherche très important consiste par ailleurs à transposer tous ces nouveaux résultats vers de grandes surfaces plus compatibles avec les standards industriels, avec de premiers résultats probants, comme par exemple une valeur de 13,8 % stabilisée obtenue sur 144 cm<sup>2</sup> (aire d'un wafer de silicium) par le consortium Solliance aux Pays-Bas en avril 2018. Cette filière impose une nouvelle classe de matériaux semi-conducteurs à propriétés modulables comme le sont les matériaux à base de GaAs, de CIGS, de CdTe et même de silicium. Ce qui pourrait faire la différence dans quelques années, si les critères de stabilité et de fiabilité sont levés, c'est l'irruption d'une nouvelle



**Figure 4.** Évolutions comparées des filières couches minces CdTe, CIGS et Si amorphe sur le marché. (Source : PV Report 2018, ISE-Fraunhofer [1], figure protégée par le droit d'auteur et non couverte par la licence Creative Commons)

filrière sur le marché potentiellement à très bas coût et à haut rendement, basse température et donc compatible avec des supports plastiques.

### La course au rendement : les multijonctions en première ligne

Alors que l'ensemble des cellules à simple jonction s'achemine peu à peu vers la limite de Shockley-Queisser, plafonnant à 33,7 % pour un gap autour de 1,3-1,5 eV, ce qui nécessitera de plus en plus d'efforts<sup>1</sup>, il existe une marge de progression considérable (jusqu'à 65 % sous éclairage standard) avec l'utilisation de multijonctions. Il passe à 46 % avec deux jonctions, 52 % avec trois, 56 % avec quatre, 58,4 pour cinq et 60 % avec six. D'ores et déjà la fresque du NREL atteste de cette potentialité en affichant 32,8% pour les doubles jonctions (tandem) en progression de 1,7 % par rapport à 2015, 37,9 % pour les triples jonctions et même 38,8% pour les quintuples jonctions. Récemment, à la dernière conférence mondiale sur l'énergie solaire photovoltaïque en juin 2018, la communication *outstanding* retenue par les experts confirmait l'attractivité de cette approche en primant les travaux du NREL sur l'élaboration d'une cellule

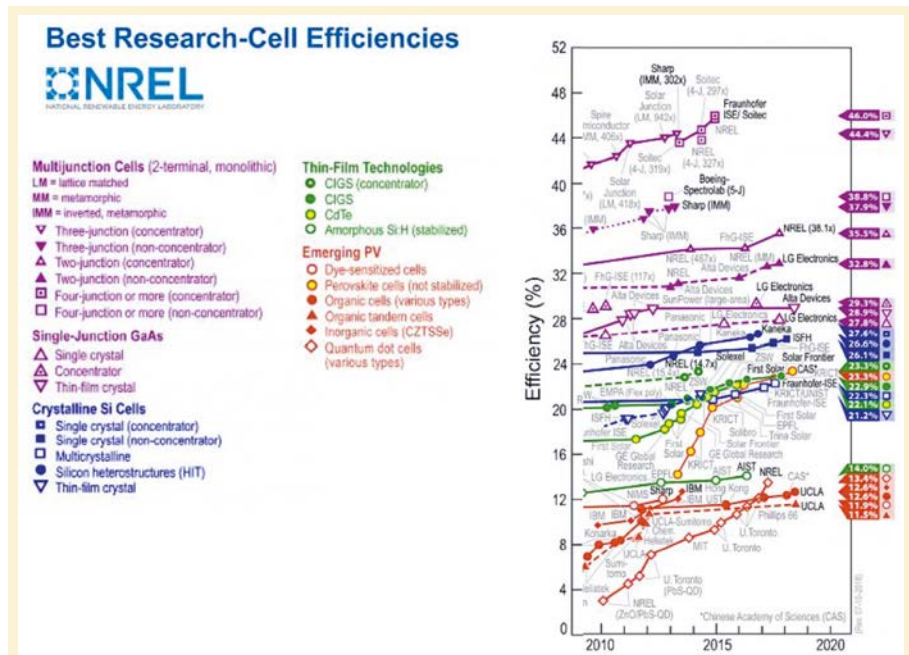


Figure 5. Fresque des rendements record en laboratoire des différents types de cellules photovoltaïques. (Source : NREL [4], figure protégée par le droit d'auteur et non couverte par la licence Creative Commons)


à six jonctions superposées allant de l'UV à l'infrarouge [6]. Même si le rendement obtenu reste modeste à 35,8%, la réalisation d'une telle jonction est une véritable prouesse scientifique et technologique, mettant en œuvre une maîtrise exceptionnelle des matériaux, de leurs interfaces, ainsi que des propriétés électriques et optiques imbriquées complexes. Les

autres paramètres de la cellule sont une tension de circuit ouvert de 5,3 V, un photocourant de 8,05 mA/cm<sup>2</sup> et un facteur de forme de 83,9 %. D'après les chercheurs, cette structure a le potentiel pour franchir la barre des 50 %.

Pendant au-delà de ces records qui ouvrent la voie mais restent encore inaccessibles en termes de coûts pour le photovoltaïque sur le marché, la vraie tendance qui se dégage de plus en plus est la mise en œuvre

<sup>1</sup> Le record toutes catégories des jonctions simples est détenu par les cellules au GaAs avec une valeur de 28,8 % qui est passée à 28,9 % en 5 ans (Alta Devices).

## Unmatched Positioning Performance




Three-dimensional vector accuracy error measured in the Z=0 mm XY plane

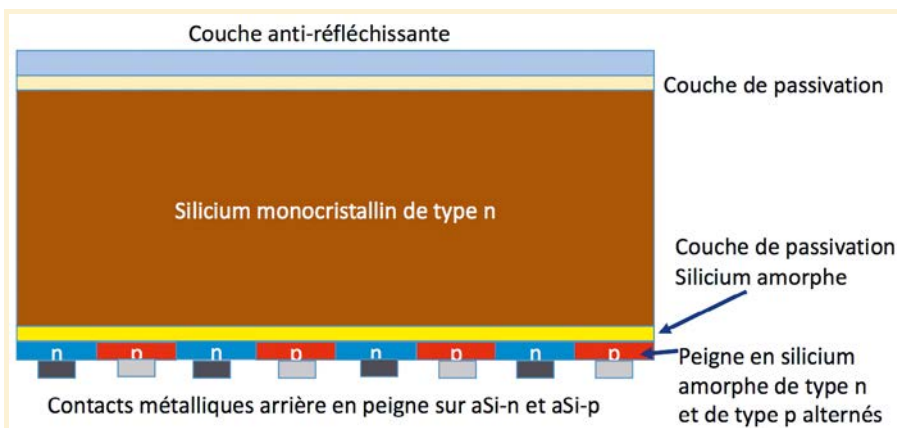
### HexGen® Hexapods by Aerotech... The next-generation in 6 degree-of-freedom positioning

HexGen® hexapods are ideal for large payload, high-speed, ultra-precise positioning. The HEX500-350HL provides unmatched positioning accuracy (±0.5 µm linear, ±2.5 µrad angular) and positioning resolution (20 nm linear, 0.2 µrad angular). Simply stated, HexGen hexapods are the highest performance hexapods on the market.

Contact an Aerotech application engineer or visit our website for more information on how Aerotech hexapods can improve your positioning application.

**AEROTECH** [www.aerotech.com](http://www.aerotech.com)  
+33 2 37 21 87 65

AT0118A-RAD-FR



**Figure 6.** Structure de la cellule solaire record silicium à 26,6 % [5]. Figure protégée par le droit d'auteur et non couverte par la licence Creative Commons.

de cellules tandem afin de porter le rendement des modules à plus de 30 % à un coût compétitif. Cet objectif a été popularisé en 2015 par la feuille de route 30×30×30 de l'IPVF, visant à 30 % de rendement module à 30 centimes par watt à l'horizon 2030. Pour cela la configuration-reine serait d'associer deux filières existantes « monojonctions » de façon à bénéficier de synergies en termes de procédés et de coût. Or les cellules silicium offrent justement d'emblée la possibilité de jouer le rôle de la cellule arrière, tandis que les cellules perovskites, qui ont naturellement un grand gap, pourraient jouer le rôle de cellule avant. Alors que les cellules perovskites ont encore des problèmes à régler, une course effrénée s'est engagée sur cette voie au niveau mondial, et les records tombent les uns après les autres. Le dernier en date concerne l'obtention d'un rendement de 27,3 % pour un tandem Si/perovskite par la startup Oxford PV (juin 2018), tandis que le consortium Solliance indique une valeur de 27,1 % (juillet 2018). Ces résultats ont une réelle valeur symbolique et marquent un cap car ils dépassent le rendement record d'une cellule au silicium simple. D'autres combinaisons sont en compétition, en particulier utilisant des cellules avant de type III-V (GaAs, GaInP) qui atteignent déjà 32,8 % [7]. On considère également des combinaisons CIGS/perovskite, silicium/CIGS grand gap, CIGS/CdTe, Si/CdTe et même perovskite/perovskite. Il s'agit vraiment d'une compétition mondiale nouvelle dont la fresque du NREL ne rend pas vraiment compte.

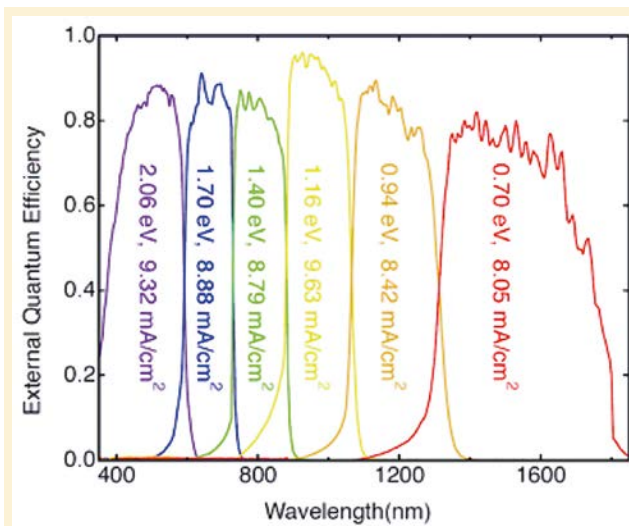
### Les nouveaux concepts

Quid des nouveaux concepts : plasmonique, photonique, particules quantiques, ultrahaute concentration... ? Ce domaine de recherche, beaucoup plus amont, n'est pas en reste comme le montre la progression des cellules solaires émergentes à particules quantiques dans la fresque du NREL qui affichent une progression soutenue allant jusqu'à 14 % maintenant. La plasmonique photonique progresse également en particulier dans le domaine des cellules à basse dimensionnalité, 1 D (nanofils), 2D (couches ultrafines) et 3 D (particules quantiques). Un résultat remarquable a été obtenu par l'équipe de Stéphane Collin (CNRS/C2N) en collaboration avec celle de Frank Dimroth à l'ISE Fraunhofer, avec les cellules ultrafines de GaAs (205 nm) présentant un rendement de 19,9 % grâce aux effets

photoniques des miroirs de Bragg en face arrière. Sa présentation par Hung Ling Cheng, doctorant, à la conférence mondiale a été primée par le prix de la meilleure présentation étudiante du thème Nouveaux Concepts (voir *figure 8*). De récentes avancées ont également eu lieu dans le domaine de la conversion par porteurs chauds assistée par piégeage optique avancé, avec l'obtention d'un prix de meilleur poster à la conférence mondiale PV par M. Giteau avec l'équipe de Jean-François Guillemoles (CNRS/IPVF/Next PV) en collaboration avec l'université de Tokyo (Prof. Okada, Next PV et RCAST) et l'équipe de Stéphane Collin (CNRS/C2N). Enfin, la très haute concentration, qui permet d'augmenter le rendement des cellules, bénéficie du développement du concept de microcellules. On peut aisément imaginer développer ce type de systèmes dans les régions à fort ensoleillement direct comme par exemple dans le désert d'Atacama (*figure 1*) où il atteint 97 % toute l'année !

### En conclusion

On pourrait penser qu'avec le niveau de compétitivité déjà atteint par la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire, le secteur photovoltaïque se contente d'améliorer les technologies existantes à base de silicium cristallin ou polycristallin et fasse passer au second plan les recherches sur d'autres filières ou d'autres concepts. Force est de constater que, non seulement ce



**Figure 7.** Réponse spectrale d'une cellule à 6 jonctions, lauréate du prix de la meilleure communication à la conférence mondiale photovoltaïque (Hawaii, juin 2018) [6]. (Crédit : Miles Steiner et al., NREL, figure protégée par le droit d'auteur et non couverte par la licence Creative Commons)



**Figure 8.** Remise des prix des meilleures présentations étudiantes à la 7<sup>e</sup> Conférence Photovoltaïque Mondiale (Hawaï, USA, juin 2018) pour chacune des thématiques du domaine. Le prix de la thématique « nouveaux concepts » (area 1 en haut de la liste) a été décerné à Hung Ling Cheng du CNRS - C2N (2<sup>e</sup> à partir de la gauche) pour ses travaux sur les cellules solaires ultrafines de GaAs. (Crédit photo : Daniel Lincot).

n'est pas le cas, mais qu'au contraire la montée en puissance de l'énergie solaire dans le secteur énergétique s'accompagne d'efforts accrus pour créer de nouvelles ruptures en matière de performances, d'applications et de coût. Et que cela produit déjà des effets, avec la montée en puissance des multijonctions, des couches minces et demain des nouveaux concepts autour de la photonique. Le prochain rendez-vous de la recherche PV en France

se tiendra lors des Journées Nationales du Photovoltaïque organisées par la Fédération de recherche en photovoltaïque du CNRS du 4 au 7 décembre 2018 à Dourdan [8].

### Remerciements

L'auteur remercie le Professeur Jacky Even du Laboratoire FOTON à Rennes pour sa contribution à la section sur les perovskites.

#### POUR EN SAVOIR PLUS

- [1] Photovoltaic Report 2018, ISE Fraunhofer : [www.ise.fraunhofer.de](http://www.ise.fraunhofer.de)
- [2] Snapshot 2018 of Global Photovoltaic Market, International Energy Agency, Photovoltaic Power Systems (PVPS) : [www.iea-pvps.org](http://www.iea-pvps.org)
- [3] D. Lincot, Le nouveau paradigme de l'énergie photovoltaïque : de l'alimentation des satellites à celle de l'humanité, *Comptes Rendus Physique* **18** (2017) : 381. En open access. [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631070517300555](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631070517300555)
- [4] [www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart-20180716.jpg](http://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart-20180716.jpg)
- [5] K. Yoshikawa et al., Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%, *Nature Energy* **2** (2017) : 17032
- [6] M. Steiner et al., "Six Junction IMM Solar cell for high concentration", communication à la Conférence PV Mondiale 2018
- [7] E. Essig et al., Raising the one sun conversion efficiency of III-V/Si solar cells to 32,8% for two junctions and 35.9% for three junctions, *Nature Energy* **2** (2017) : 17144
- [8] Site des JNPV 2018 : <http://jnpv.geeps.centralesupelec.fr/index.php/les-jnpv-2018>

## FORMATION CONTINUE

Une nécessité  
pour les entreprises

Une mission majeure  
de l'Institut d'Optique



- Au catalogue ou sur-mesure
- Plus de 150 montages pédagogiques
- De l'initiation à la spécialisation
- Formateurs experts
- En anglais ou en français
- En France ou à l'étranger
- Liens forts avec l'industrie

- Infrarouge, optronique
- Instrumentation, composants, fabrication
- Conception optique
- Imagerie, mesure, communication
- Sources, éclairage, lasers, sécurité
- Mastère Spécialisé® ELS  
*Systèmes d'Éclairage Embarqué*

#### Nous contacter

Emilie Ericher

+33 1 64 53 32 36

[fc@institutoptique.fr](mailto:fc@institutoptique.fr)

CATALOGUE EN LIGNE  
[fc.institutoptique.fr](http://fc.institutoptique.fr)



## COMPRENDRE

# Les lasers à cascade quantique : vers la démocratisation !<sup>1</sup>

Mathieu CARRAS

mirSense, 8 avenue de la Vauve,  
centre d'intégration NanoInnov,  
91120 Palaiseau  
[mathieu.carras@mirsense.com](mailto:mathieu.carras@mirsense.com)

Les lasers à cascade quantique ont fait, depuis leur première démonstration en 1994, des progrès considérables, notamment dans le moyen infrarouge (bande spectrale allant de 3 à 12  $\mu\text{m}$ ). Ils peuvent maintenant être considérés comme des composants matures pour les applications en défense, sécurité et métrologie industrielle et environnementale. Ainsi, ces lasers sont utilisés dans de nombreux systèmes commerciaux. Nous parcourons dans cet article les progrès récents des lasers à cascade quantique, et discutons des nouvelles perspectives.

## Contexte et défis

### Une solution de choix parmi les sources infrarouges

Les lasers à cascade quantique se sont imposés comme la solution de choix pour le moyen infrarouge (MIR – 3 à 12  $\mu\text{m}$ ) depuis quelques années, en particulier pour les applications de contre-mesure optique sur des appareils ne pouvant pas accueillir de solutions lourdes et volumineuses, ou dans des systèmes de métrologie ultra fine [1]. Plusieurs technologies sont actuellement disponibles ou en développement (figure 1). Ces sources sont les diodes laser aux sels de plomb, les sources cohérentes basées sur la génération de différence de fréquence (DFG, pour *difference frequency generation*), les oscillateurs paramétriques optiques (OPO, pour *optical parametric oscillator*), les lasers solides ( $\text{Cr}^{2+}$  : II-VI) et les lasers à cascade quantique. Les lasers aux sels de plomb sont généralement volumineux et nécessitent un refroidissement inférieur à 90 K. Les sources DFG, spécialement celles basées sur les cristaux de PPLN

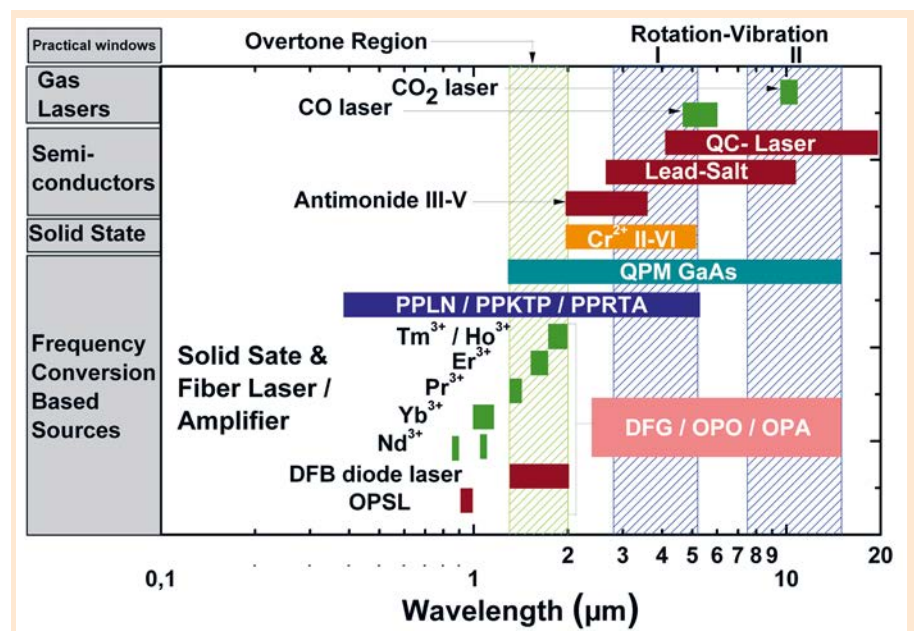


Figure 1. Différentes sources lasers dans le moyen infrarouge utilisées en spectroscopie et leurs plages en longueur d'onde (figure tirée de F. Tittel et al., *Topics Applied Physics*, **89**, 445 (2003), © SpringerNature).

(*periodically poled lithium niobate*), sont matures, robustes et relativement compactes mais sont limitées à des longueurs d'onde inférieures à 5  $\mu\text{m}$  et à de faibles puissances optiques. Les OPOs présentent de fortes puissances crêtes mais sont cependant encore trop volumineux et coûteux pour un

déploiement à grande échelle. Parmi les technologies disponibles, les sources semiconductrices apparaissent comme étant la solution à moyen terme car elles sont basées sur une seule conversion électro-optique à haut rendement. Les lasers semi-conducteurs sont de plus extrêmement compacts, fiables et peu onéreux. Les lasers à cascade quantique (QCL, pour *quantum cascade laser*) sont aujourd'hui les seuls lasers

<sup>1</sup> Une partie générique du texte est reprise de l'article publié en 2011 dans la revue Photoniques, « Les lasers à cascade quantique : l'accès au moyen infrarouge ».

semi-conducteurs fonctionnant à température ambiante en mode pulsé ou continu dans le moyen infrarouge.

### Principe du laser à cascade quantique

Le QCL est basé sur une transition optique d'un électron entre des niveaux quantifiés de la bande de conduction [2]. Contrairement aux diodes lasers classiques, la longueur d'onde d'émission ne dépend pas directement de la bande interdite des matériaux semi-conducteurs utilisés mais principalement de l'empilement des couches formant la zone active. L'ingénierie quantique et le contrôle de l'épaisseur des couches à la couche atomique près, accessibles par les techniques d'épitaxie de production (figure 2), permettent d'obtenir les niveaux d'énergie et les fonctions d'onde désirés (figure 3). Pour maximiser l'amplification optique, on juxtapose un grand nombre de zones actives, créant ainsi une structure périodique. Sous l'effet d'un champ électrique, les électrons traversent cette structure par effet tunnel puis émettent un photon et sont recyclés d'une période à l'autre. Les électrons décrivent ainsi une cascade d'énergie potentielle en émettant chacun idéalement autant de photons qu'il y a de périodes. La flexibilité unique du dessin des lasers à cascade quantique rend cette technologie à semi-conducteurs très attractive pour la fabrication de lasers sur une large plage spectrale s'étendant jusqu'au térahertz (THz), soit de 2,5 à 160  $\mu\text{m}$  [3]. Les meilleures performances sont cependant obtenues dans la bande située entre 4 et 10  $\mu\text{m}$ . Le système de matériaux utilisés est dans ce cas le même que celui utilisé pour les diodes laser télécom (GaInAs/ AlInAs sur substrat InP).

### Applications et performances

Deux familles de composants QCL peuvent être définies en fonction des applications : les sources de forte puissance, utilisées dans les systèmes

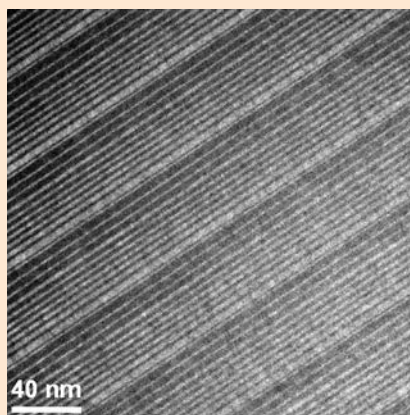


Figure 2. Photographie en microscopie électronique à transmission d'une structure périodique d'un laser à cascade quantique. Les puits quantiques sont en noir et les barrières en blanc.

de contre-mesures optiques pour le brouillage ou l'aveuglement des détecteurs moyen infrarouge ; les sources pour la détection des explosifs, des drogues, des agents chimiques de guerre, des toxiques industriels, des agents polluants et le contrôle des procédés industriels. Ces sources pour la spectroscopie peuvent se séparer en deux catégories, les sources mon-fréquences, plus ou moins accordables dans les temps, et les peignes de fréquence, récemment démontrés en utilisant la technologie QCL [4]

Pour ces deux types d'applications, une équipe de l'université de Northwestern a démontré des performances remarquables : une puissance optique de 5 watts est obtenue pour une émission à 4,9  $\mu\text{m}$  avec une source multi-mode constituée d'une cavité laser de 5 mm de long et de 8  $\mu\text{m}$  de large. Le laser fonctionne en continu à température ambiante avec un rendement de conversion de 21 %, proche de la limite théorique de 30 % [5]. Une source mono-fréquence à 4,8  $\mu\text{m}$  avec une puissance optique de 2,4 watts a aussi été démontrée [6]. Ces résultats confirment le fort potentiel des lasers à cascade quantique. Pour les contre-mesures optiques et pour la détection de gaz par spectroscopie, le défi est toujours d'accroître le rendement de conversion électro-optique pour augmenter la puissance optique et/ou réduire la puissance électrique nécessaire au fonctionnement du laser. Au regard

Wavefront sensors and adaptive optics for optical metrology, lasers and microscopy



Optical metrology applications



Adaptive optics for laser beam control



Solutions for X/EUV applications

Contact us for more details: [contact@imagine-optic.com](mailto:contact@imagine-optic.com) or +33 1 64 86 15 60

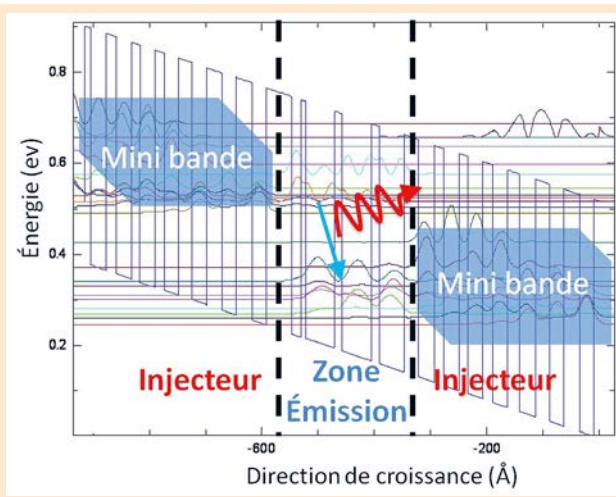


Figure 3. Diagramme typique de la bande de conduction d'un QCL montrant les niveaux d'énergie et les fonctions d'onde sur une période et demie.

des performances actuelles, plusieurs équipes imaginent aussi la réalisation de circuits photoniques MIR intégrés pour ajouter de nouvelles fonctionnalités sur la puce semiconductrice tout en restant compacts.

### Le très fort enjeu des marchés de masse

Le besoin de métrologie est omniprésent dans nos vies, avec la concomitance de la dégradation de la qualité de l'air depuis l'ère industrielle et de la prise de conscience de son impact sur la santé des personnes et sur l'environnement. Si les QCLs peuvent remplir ce besoin, il existe aujourd'hui des freins économiques à leur utilisation massive.

Le défi actuel est de faire passer cette technologie de marchés de niche à des applications de volume, et de démocratiser son usage. Les deux verrous actuels sont le coût des lasers et le coût de l'architecture système à mettre en œuvre pour les utiliser. Les performances atteintes permettent d'envisager l'intégration d'architectures photoniques plus complexes pour obtenir de nouvelles fonctionnalités en tirant profit du potentiel considérable des technologies développées autour des semi-conducteurs et de leur maturité et donc de simplifier les architectures système et réduire les coûts. En pratique, cela peut se faire en intégrant ces sources sur des plateformes silicium. C'est aujourd'hui un des axes de développement majeurs de la communauté QCL.

### Des sources matures pour la spectroscopie

La plage spectrale du moyen infrarouge est particulièrement intéressante pour la spectroscopie de gaz car elle présente plusieurs fenêtres de transmission atmosphérique (avec des lignes d'absorption de H<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub> faibles et peu nombreuses) où nous trouvons les raies d'absorption ro-vibrationnelles fondamentales de plusieurs polluants atmosphériques (NO, N<sub>2</sub>O, CO, H<sub>2</sub>CO (formaldéhyde), NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, etc.). Ces raies fondamentales sont deux à trois ordres de grandeur plus intenses que leurs harmoniques dans le proche infrarouge (1 à 2,5 μm). De plus, la plupart des molécules organiques complexes (plus de 5 atomes) qui ont un intérêt pour la défense et la sécurité ont aussi leurs signatures entre 7 et 12 μm.

### Fonctionnement mono-fréquence

Un fonctionnement mono-fréquence du laser est nécessaire pour les applications en spectroscopie. Il est généralement obtenu en introduisant un réseau dans la cavité laser qui induit une contre-réaction répartie (ou DFB, pour *distributed feed-back*). Ce réseau, qui agit comme un filtre fréquentiel, entraîne ainsi un fonctionnement mono-fréquence. Les difficultés pour dessiner et réaliser un QCL DFB ont été partiellement surmontées en utilisant des réseaux enterrés. Cependant, cette technique nécessite une étape de reprise de croissance onéreuse et critique. Une nouvelle approche basée sur l'utilisation de réseaux métalliques de surface a été développée. Cette nouvelle approche repose sur une modulation de l'indice générée par le couplage entre les modes guidés dans la zone active et un mode confiné à l'interface, entre le métal et le guide supérieur (figure 4) [7]. Précisons que ce couplage est possible car les modes contra-propagatifs d'une part, et le mode de surface d'autre part, ont la même polarisation TM. Ces réseaux métalliques de surface peuvent être utilisés dans le moyen infrarouge car les pertes sont moins élevées que dans le proche infrarouge. Un avantage supplémentaire de cette approche est sa robustesse vis-à-vis des variations technologiques, ce qui permet de contrôler la longueur d'onde d'émission à plus ou moins 1 cm<sup>-1</sup>. Des QCL DFB fonctionnant en mode pulsé ou continu

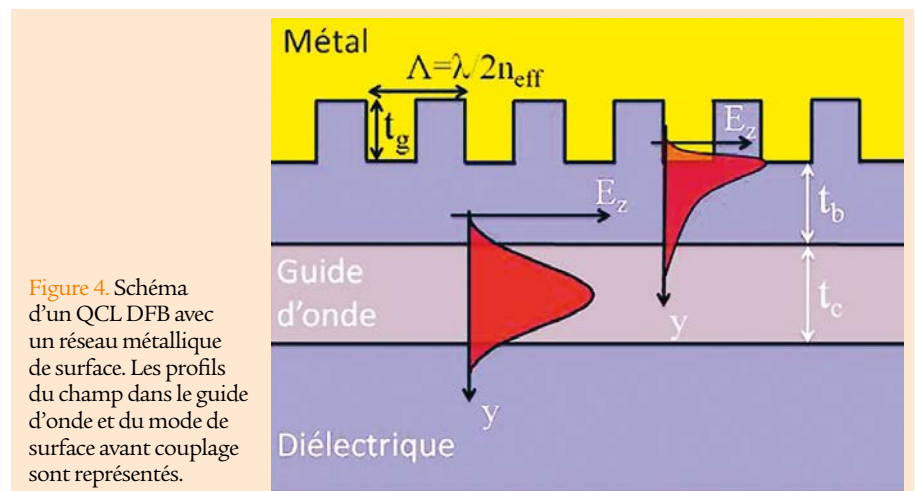


Figure 4. Schéma d'un QCL DFB avec un réseau métallique de surface. Les profils du champ dans le guide d'onde et du mode de surface avant couplage sont représentés.



sont disponibles commercialement (voir [www.mirsense.com](http://www.mirsense.com) par exemple) sur la totalité de la plage allant de 4 à 10  $\mu\text{m}$  [7]. Les lasers fonctionnent à température ambiante sur un module thermoélectrique à effet Peltier. Les puissances émises sont de quelques dizaines de milliwatts et le taux de réjection des modes latéraux (ou SMSR, pour *side mode suppression ratio*) est supérieur à 30 dB. La longueur d'onde d'émission peut être accordée sur une plage de 3 à 4  $\text{cm}^{-1}$  par échauffement de la structure laser en modulant le courant injecté dans le QCL DFB. Un des avantages cruciaux de cette approche est d'être associable à la fabrication des QCLs sur des chaînes silicium.

### La voie vers la démocratisation : co-intégration QCL/silicium

La grande tendance actuelle est l'intégration des matériaux III-V sur silicium, en particulier pour les applications télécoms. Les QCL ne font pas exception et mirSense, en collaboration avec le CEA-LETI, est pionnier dans ce domaine. L'avantage de cette approche est de pouvoir intégrer des fonctions réalisées sur silicium de manière monolithique, engendrant des gains en robustesse, compacité, mais surtout coût et capacité de production avec le volume. Pour cela, il est nécessaire de faire deux choses : ramener les QCL sur le silicium et savoir traiter la lumière émise par les QCLs sur le silicium [8].

### QCL sur silicium

Il existe plusieurs solutions pour amener les QCLs sur silicium. La première solution s'appelle l'intégration hétérogène, qui consiste à fabriquer le QCL de manière classique, puis à le reporter sur un substrat de silicium, ou en face d'une puce en silicium. C'est la plus simple, mirSense et le CEA-LETI ont démontré la pertinence de cette approche pour réaliser des sources accordables. L'autre solution consiste à n'avoir que la couche d'épitaxie QCL sur le silicium et à procéder à la fabrication du laser sur le substrat silicium. Là aussi, le CEA-LETI et mirSense ont démontré pour la première fois ce procédé de fabrication sur substrat 200 mm, c'est-à-dire un standard de l'industrie du silicium (travaux à paraître).

### Nouveaux matériaux pour guider la lumière sur silicium

Afin de réaliser des fonctions sur silicium, il a été nécessaire de développer de nouvelles filières de matériau permettant de guider la lumière moyen-infrarouge. En effet, l'approche classique de guidage de la lumière sur silicium, utilisant des guides avec un corps en silicium et des couches guidantes en silice ne fonctionne plus au-delà de 4  $\mu\text{m}$  de longueur d'onde. Différentes propositions ont été faites, principalement en introduisant du germanium. La première filière couvrant la bande 3–8  $\mu\text{m}$  a été démontrée

Obtenir le meilleur de l'innovation, c'est notre métier.

Sensibilité élevée, temps de réponse court et courant d'obscurité très faible – nos photodiodes à avalanche sont les détecteurs optimaux pour des applications LIDAR.



[www.first-sensor.com](http://www.first-sensor.com)

APDs pour LIDAR

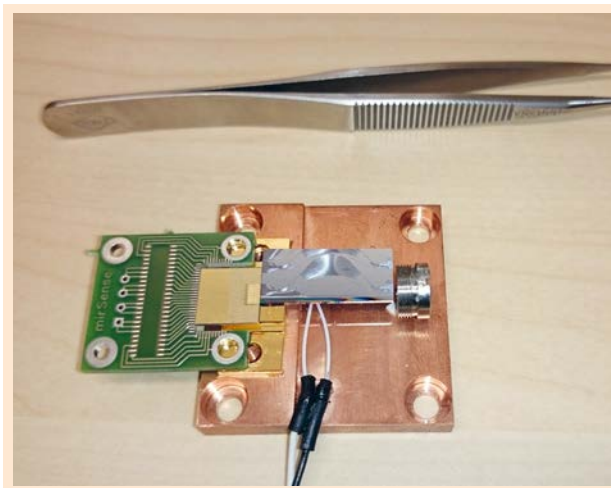


Figure 5. Une barrette de QCL avec un AWG (*arrayed waveguide grating*).

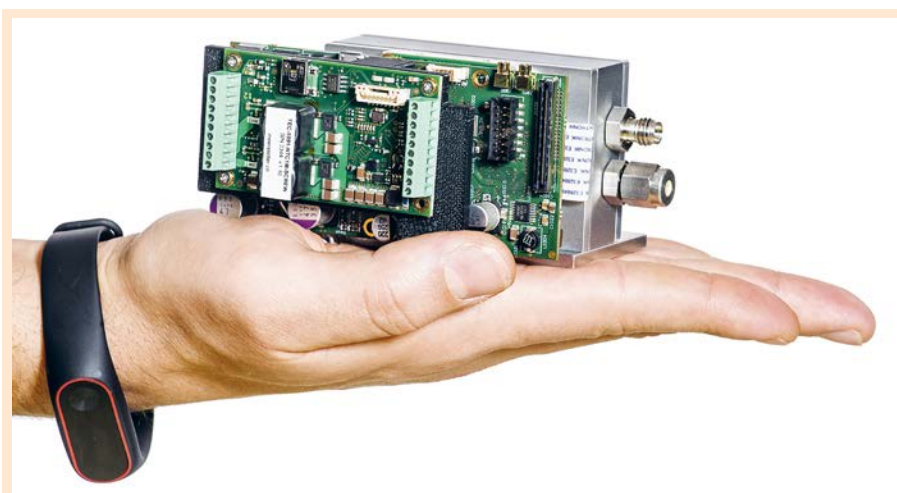


Figure 6. Système multiSense.

au CEA-LETI en utilisant un corps en SiGe et des couches guidantes en silicium. Des niveaux de pertes aussi bas que quelques dB/cm ont été obtenus sur toute la plage 4–8  $\mu\text{m}$  [9]. Cela a ouvert la voie à la réalisation de fonctions d'une taille de l'ordre du centimètre sans introduire de pertes prohibitives.

### Barrettes de QCL multiplexées

C'est un exemple parfait du mariage des technologies QCL et silicium. La versatilité des réseaux métalliques de surface rend aussi possible la réalisation de barrettes de QCLs émettant chacun à une longueur d'onde différente, créant ainsi un peigne de longueurs d'onde. Il suffit alors d'allumer successivement chacun des lasers pour obtenir une source accordable. Les avantages de cette configuration par rapport à un système de cavité externe sont nombreux. D'une part, pour chaque longueur d'onde émise on trouve les caractéristiques d'un laser mono-fréquence, c'est-à-dire une très faible largeur de raie, une grande stabilité temporelle et une connaissance absolue de la longueur d'onde. D'autre part, on trouve une accordabilité en longueur d'onde qui peut atteindre 100  $\text{cm}^{-1}$ , suffisante pour de nombreuses applications de détection de molécules complexes. Le problème, si l'on s'en tient aux barrettes, est que chaque laser émet par sa facette, et donc on a des points d'émission différents pour chaque longueur d'onde. L'utilisation

d'un multiplexeur en silicium couplé à la barrette est donc un excellent moyen de résoudre ce problème [10]. La figure 5 montre le résultat obtenu, développé au CEA-LETI et entrant dans les produits de mirSense. De la même manière, de nombreuses autres fonctions peuvent maintenant être intégrées sur silicium, telles que des filtres optiques, des modulateurs, mais aussi des détecteurs.

### Vers le lab-on-chip

Tous ces développements démontrent le degré de maturité des lasers à cascade quantique QCL pour leur utilisation dans des systèmes de spectroscopie.

Plusieurs PME européennes développent depuis quelques années ces systèmes. Les systèmes de spectroscopie optique actuels sont volumineux (~ 20 litres, 20 kilogrammes) ce qui limite la généralisation de leur utilisation dans certains domaines d'application (portabilité, applications grand public...). Dans une démarche de miniaturisation, des équipes proposent déjà l'intégration de toutes les fonctionnalités d'un système de spectroscopie optique sur une seule puce (*lab-on-chip*) par intégration hétérogène de QCL avec des circuits photoniques silicium [10]. La dernière fonction qu'il est nécessaire d'intégrer est le détecteur. Il semble pour l'instant compliqué d'avoir un détecteur optique moyen infrarouge de qualité sur le silicium même si certaines équipes travaillent dessus. Une alternative intéressante est l'utilisation d'un effet photo-acoustique [11] permettant d'utiliser des microphones à la place des détecteurs optiques. Cela ouvre la voie à l'intégration de microphones MEMS, c'est-à-dire réalisés sur la filière silicium également. Les premiers produits issus de cette approche sont commercialement disponibles (figure 6 ; produit multiSense de mirSense).

Il n'est pas loin le temps où nous aurons tous un QCL à la maison !

#### POUR EN SAVOIR PLUS

- [1] <https://www.picarro.com/>; <https://www.northropgrumman.com/Capabilities/CIRCM>
- [2] J. Faist, F. Capasso, D.L. Sivco, C. Sirtori, A.L. Hutchinson, A.Y. Cho, *Science*, 1994, 264 : 553
- [3] S. Barbieri, M. Ravano, P. Gellie, G. Santarelli, C. Manquest, C. Sirtori, S.P. Khanna, E.H. Linfield, A. Giles Davies, *Nature Photonics*, 2011, 5 : 306
- [4] A. Hugi, G. Villares, S. Blaser, H.C. Liu, J. Faist, *Nature*, 2012, 492 : 229
- [5] Y. Bai, N. Bandyopadhyay, S. Tsao, S. Slivken, M. Razeghi, *Applied Physics Letters*, 2011, 98 : 181102
- [6] Q.Y. Lu, Y. Bai, N. Bandyopadhyay, S. Slivken, M. Razeghi, *Applied Physics Letters*, 2011, 98 : 181106
- [7] M. Carras, G. Maisons, B. Simozrag, M. Garcia, O. Parillaud, J. Massies, X. Marcadet, *Applied Physics Letters*, 2010, 96 : 161105
- [8] R. Soref. SPIE Photonics West, *paper 6898-5, Silicon Photonics III*, 2008
- [9] M. Brun, P. Labeye, G. Grand, J.-M. Hartmann, F. Boulila, M. Carras, Sergio Nicoletti, *Optics Express* 2014, 22 : 508
- [10] P. Barriault, M. Brun, P. Labeye, J.-M. Hartmann, F. Boulila, M. Carras, S. Nicoletti, *Optics Express*, 2015, 23 : 26168
- [11] Miklós, András, Peter Hess, Zoltán Bozóki. *Review of Scientific Instruments* 72(4) : 1937 (2012)

# ACHETER

## Un mini-spectromètre à réseau

Alexis FEUGIER, Ocean Optics Inc. - [alexis.feugier@oceanoptics.com](mailto:alexis.feugier@oceanoptics.com)

L'apparition des mini-spectromètres à réseau remonte au début des années 90, et ils ont pris, au fur et à mesure des progrès technologiques, une place importante dans les laboratoires de recherche industriels ou scientifiques, tout comme dans l'industrie. Ils sont soit utilisés dans leur forme standard, soit intégrés dans des équipements sur les marchés liés à l'environnement, au contrôle des procédés ou de la qualité ; à l'agriculture de précision<sup>1</sup>, à l'alimentaire, à l'éclairage, aux sciences du vivant, au biomédical, à la chimie et à la pharmacie, aux semi-conducteurs, à la sécurité et à la lutte anti-contrefaçon, *etc.* Aujourd'hui, la diversité de l'offre nécessite une analyse précise de ses besoins actuels et futurs afin d'effectuer le meilleur choix possible lors d'un investissement.

Les mini-spectromètres à réseau ont assis leur place au cours des 20 à 30 dernières années dans un marché de la spectroscopie jusqu'alors dominé par les spectromètres de paille. Aujourd'hui, ils sont considérés comme une technologie complémentaire à cette instrumentation scientifique aux côtés des micro-spectromètres qui commencent pour leur part à être testés et validés sur des marchés porteurs comme celui de l'automobile.

Le déploiement de cette technologie a profité de la baisse des coûts des détecteurs (fabriqués pour des marchés de masse), des technologies de miniaturisation (qu'elles soient optiques ou électroniques), et des évolutions des micro-processeurs permettant un traitement des données spectrales toujours plus rapide, sur des interfaces portables. Cette technologie de rupture, compacte, portable et à bas coût a révolutionné le

monde de la spectroscopie, et permis de développer de nouveaux marchés jusqu'ici hors d'atteinte. En effet, de nouvelles méthodes de mesure ont pu voir le jour par la possibilité d'enfin apporter l'équipement d'analyse vers l'échantillon. Cela a permis notamment de mettre en place des mini-spectromètres pour la mesure en ligne et le contrôle de procédés, et de développer des analyseurs pour le terrain pour des applications environnementales ou pour l'agriculture. On les retrouve aussi intégrés dans des équipements au plus près des besoins comme pour les systèmes de détection d'explosifs lors des contrôles de sécurité dans les aéroports.

### Conception

Un mini-spectromètre à réseau peut être développé suivant différents designs optiques, notamment le



www.oceanoptics.com



**ANALYSES  
RAPIDES  
ET PRÉCISES  
EN INFRAROUGE  
MOYEN**

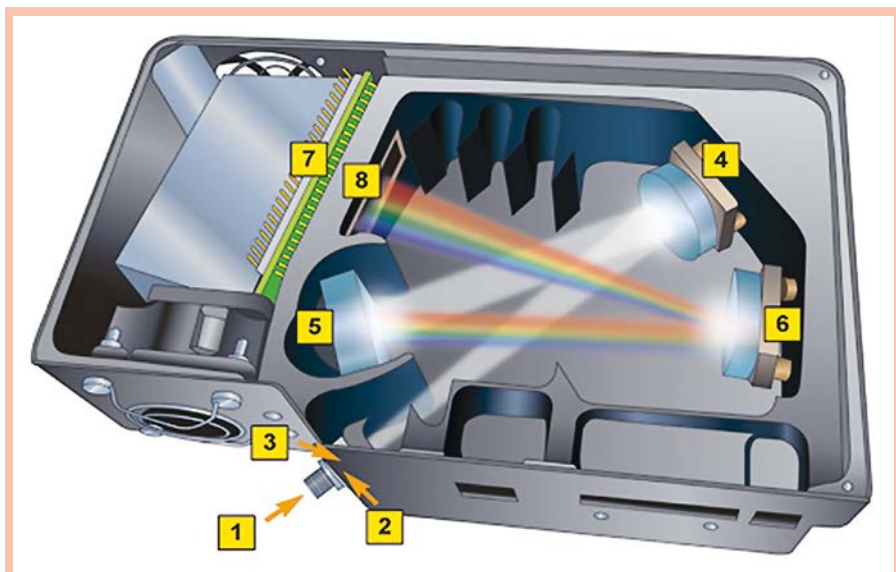
L'Ocean MZ5 est une solution alternative rapide et efficace par rapport à la spectroscopie FT-IR conventionnelle pour l'identification chimique, l'authentification des aliments et les tests environnementaux

Ce système autonome nécessite aucun accessoire et mesure l'absorbance et la transmittance d'échantillons liquides sur la gamme 1818 – 909 cm<sup>-1</sup> (5.5 – 11 μm)



www.idil.fr  
info@idil.fr  
T: 02 96 05 40 20

<sup>1</sup> Il s'agit de technologies actuelles qui permettent par exemple d'embarquer sur un tracteur un détecteur de concentration d'azote basé sur un spectromètre pour mieux contrôler l'épandage (voir [www.inra.fr/Grand-public/Dossiers/Les-agricultures-du-futur/L-agriculture-de-precision-sur-le-terrain/](http://www.inra.fr/Grand-public/Dossiers/Les-agricultures-du-futur/L-agriculture-de-precision-sur-le-terrain/))



**Figure 1.** Configuration optique d'un mini-spectromètre avec une configuration Czerny-Turner symétrique croisée utilisant un réseau en réflexion. Celui-ci est composé d'un connecteur pour fibre optique (1), d'une fente d'entrée d'une largeur variable (2), d'un filtre passe-haut optionnel (3), d'un miroir de collimation (4), d'un réseau en réflexion (5), d'un miroir de focalisation (6), d'une lentille cylindrique de collection optionnelle, d'un détecteur (7), d'un filtre trieur d'ordre optionnel (8), ou d'une fenêtre améliorant la transmission dans l'ultraviolet.

Czerny-Turner, qui peut lui-même être décliné dans une configuration symétrique ou asymétrique, croisée ou non. Nous traitons dans cet article uniquement les spectromètres miniatures intégrant comme élément dispersif un réseau, que ce soit en réflexion ou en transmission. D'autres spectromètres miniatures dont le design est basé sur d'autres technologies que le réseau sont également disponibles sur le marché, comme les spectromètres à transformée de Fourier, ou Fabry-Pérot notamment à base de composants MEMS.

La *figure 1* présente la configuration optique d'un mini-spectromètre avec une configuration Czerny-Turner symétrique croisée utilisant un réseau en réflexion. La possibilité de modifier certains composants par l'utilisateur ou en usine sur une même base de banc optique, permet de configurer un spectromètre à façon. Cet aspect modulaire a été essentiel dans l'adoption de cette technologie par les utilisateurs, leur permettant ainsi par le simple changement de la fente d'entrée d'utiliser le même spectromètre pour effectuer successivement des mesures d'absorbance et de fluorescence.

### Critères de choix

En tant qu'utilisateur, il est essentiel d'analyser son besoin actuel et futur, sachant que l'équipement est évolutif, et cela passe par le questionnement suivant : qu'est-ce que je veux mesurer et pourquoi ? Ai-je besoin de traiter mes données en temps réel et, si oui, quel doit être le temps de réaction entre la fin de l'acquisition spectrale et la prise de décision ? Quelles sont mes contraintes d'encombrement ? Quelles seront les conditions environnementales d'utilisation ? Quel type de communication

dois-je privilégier pour interfacer le spectromètre ? Et enfin, quel est mon budget ?

D'autres critères pourront bien sûr entrer en jeu s'il s'agit d'un projet pour un intégrateur ou un industriel qui voudra s'assurer, par exemple, de la reproductibilité des performances d'une unité à une autre afin de garantir l'utilisation de modèles chimiométriques. Le choix du mini-spectromètre et celui de sa configuration doivent être définis en accord avec la réponse aux questions soulevées ci-dessus.

Le banc optique et sa distance focale, la largeur de fente d'entrée, la densité de traits du réseau et le nombre de pixels sur le détecteur sont les composants principaux à étudier pour jouer sur la résolution optique du spectromètre. Ainsi, pour des applications liées à la caractérisation des lasers, ou pour la spectroscopie LIBS (*laser induced breakdown spectroscopy*) nécessitant les meilleures résolutions possibles pour une gamme de longueurs d'ondes donnée, il faudra privilégier le montage d'une fente d'entrée la plus étroite, associée à un réseau présentant une densité de traits élevée, dans un banc optique ayant une focale la plus grande possible. Cela ne veut pas dire pour autant que ce choix doit être appliqué à toutes les applications liées à la spectroscopie LIBS ou à la caractérisation laser. En effet, si le critère de choix concernant la solution finale se porte sur le développement d'une solution portable pour le terrain, alors l'utilisateur cherchera surtout à minimiser le poids et l'encombrement de l'analyseur.



**Figure 2.** Parmi les applications, les mini-spectromètres à réseaux permettent la mesure et le contrôle des LED.



Figure 3.  
Spectromètre  
OCEAN-HDX  
pour le tri  
des fruits.

Il s'orientera vers un spectromètre un peu moins résolutif sur une gamme spectrale étendue, au lieu de couvrir la même gamme spectrale avec plusieurs spectromètres dédiés chacun à une gamme spectrale différente associée à une très bonne résolution.

À titre d'exemple, un spectromètre avec une fente de 5 microns de large, couplée à un réseau de 2400 traits par millimètre dans un banc optique de focale 101,6 millimètres, permettra d'obtenir une résolution à mi-hauteur de 0,1 nanomètre sur une plage de 200 à 300 nm, alors qu'un autre spectromètre plus compact avec une fente de 5 microns, couplée à un réseau de 1200 traits par millimètre et une focale de 68 mm donnera une résolution de 0,5 nm à mi-hauteur sur une gamme de 200 à 500 nm. Dans ce dernier cas, le spectromètre plus compact avec une focale plus courte et le réseau de densité de traits moins élevée sera peut-être, pour ce projet spécifique, suffisant pour distinguer des raies d'émission d'espèces différentes.

## Des solutions pour chaque besoin

Nous avons donc vu que le choix de la densité de traits du réseau permet de travailler sur une gamme spectrale plus ou moins étendue avec un impact sur la résolution. Lorsque la gamme spectrale minimum d'intérêt peut être définie par l'utilisateur, cela permet de choisir un type de détecteur, un réseau et un certain nombre d'options associées comme un filtre trieur d'ordres. Les fabricants de mini-spectromètres

utilisent des détecteurs à bas coût pour leurs produits d'entrée de gamme couvrant le spectre UV et visible (200 à 1100 nm), principalement des capteurs en silicium linéaires, de type CCD. Ils sont néanmoins remplacés progressivement ces dernières années par des capteurs CMOS permettant d'atteindre des cadences de mesure nettement supérieures, associées à des temps d'intégration minimum très courts (de l'ordre de quelques microsecondes). Les capteurs CCD à couches de silicium amincies éclairés par l'arrière (*back thinned CCD*) sont quant à eux utilisés pour la décomposition de signaux sur la gamme 165 à 1180 nm principalement pour la détection de signaux peu intenses comme pour le suivi de plasmas ou la détection de fluorescence. Ces détecteurs peuvent bénéficier de l'intégration d'un élément à effet Peltier qui permettra de refroidir le composant et ainsi de réduire considérablement le bruit sur des temps d'intégration longs ; ils sont notamment destinés aux applications liées à la spectroscopie Raman.

Les mini-spectromètres à réseau peuvent également être configurés pour une utilisation dans le domaine du proche infrarouge et dans ce cas il faut les équiper d'un détecteur InGaAs pour obtenir une sensibilité suffisante dans une gamme pouvant aller de 900 à 2500 nm. Ces détecteurs InGaAs sont refroidis pour la majorité d'entre eux par effet Peltier pour garantir un niveau de performance acceptable en termes de rapport signal sur bruit. Pour ce qui est de la rapidité de mesure, il faut considérer le système

**TRIOPTICS**  
FRANCE

UN UNIVERS DE PRÉCISION

- Solutions multi-axes pour applications exigeantes
- Utilisation en Micro et Nano-usinage laser, MEMS, semi-conducteurs, optique-photonique, Synchrotrons, métrologie, biosciences...
- Moteurs linéaires, servomoteurs, paliers à air. Contrôle et asservissements avancés
- Large gamme d'hexapodes et de tripodes haute précision

Micro et nano-usinage laser XYRx

Platine standard XY - Répét. ±30 nm

Tripodes et Hexapodes hybrides\* à moteurs linéaires

Montage de métrologie - Platines LM-XYZ

Hexapode sous vide et ultra-vide

Portique à moteurs linéaires

\* Hybrid Hexapod® est un dispositif breveté et une marque déposée.

**Trioptics France**

76 rue d'Alsace  
69100 Villeurbanne  
Téll. 07 72 44 02 03  
Fax : 04 72 44 05 06  
www.trioptics.fr

Distributeur Officiel  
**ALIO**

**LES DOMAINES APPLICATIFS DES MINI-SPECTROMÈTRES, ET LES TECHNOLOGIES ASSOCIÉES.**

APPLICATION	TECHNIQUE DE MESURE	MARCHÉ
Caractérisation de LEDs	Éclairage	Éclairage
Analyse de céréales	Réflexion NIR	Agriculture
Contrôle procédés en ligne	Raman	Chimie
Cartographie de tissus biologiques	LIBS	Biomédical
Suivi de la végétation	Réflectance	Environnement
Traçabilité	Réflectance	Alimentaire
Détection d'explosifs	SERS Raman	Défense & Sécurité
Détection de contrefaçon de spiritueux	Absorbance UV	Lutte contre la contrefaçon
Contrôle qualité d'optiques	Transmittance	Industrie

dans sa globalité afin de choisir le type de communication du spectromètre. Des standards USB 3.0 et ethernet sont apparus depuis quelques années et remplacent, pour quelques applications spécifiques, le standard USB 2.0. Ceux qui privilégient la portabilité opteront pour une communication Wi-Fi lorsque celle-ci est disponible.

Enfin, la question relative aux conditions environnementales mérite d'être posée. En effet, bien que de gros progrès aient été effectués ces dernières années par les fabricants pour diminuer la dépendance des mini-spectromètres aux variations lentes ou rapides de température, cette sensibilité peut être pénalisante pour certains projets, notamment ceux exploitant les données spectrales

par chimométrie. Dans ce cas, le conseil est de consulter votre interlocuteur qui pourra vous orienter au mieux vers une solution adaptée.

### Conclusion : un indispensable !

Que vous soyez utilisateur en spectroscopie d'absorbance, de transmittance, de réflectance, de luminance, de fluorescence, de plasma..., en spectroscopie Raman ou LIBS, et que ce soit pour des analyses colorimétriques, moléculaires, atomiques ou toute autre analyse résultant de l'interaction lumière-matière, un mini-spectromètre est fait pour vous.

À l'image de la photonique, identifiée comme l'une des technologies clés du 21<sup>e</sup> siècle par l'Union Européenne, les mini-spectromètres apparaissent comme une technologie diffusante que vous pouvez retrouver à tout niveau de la chaîne de valeur, et dans des domaines applicatifs très nombreux (voir tableau).

FOURNISSEUR	MARQUE(S) DISTRIBUÉE(S)	CONTACT COMMERCIAL
ARDOP Industrie	RGB Photonics	<b>Stéphane Duval</b> - tél. + 33 (0)6 49 54 52 94 Email : <a href="mailto:stephane.duval@ardop.com">stephane.duval@ardop.com</a>
Hamamatsu Photonics France		<b>Laurent Demezset</b> - tél. + 33 (0)1 69 53 71 00 Email : <a href="mailto:fdemezset@hamamatsu.fr">fdemezset@hamamatsu.fr</a>
Horiba		<b>Arnaud Cotel</b> Email : <a href="mailto:arnaud.cotel@horiba.com">arnaud.cotel@horiba.com</a>
IDIL Fibres Optiques	Ocean Optics	<b>Yi Mei Liu</b> - tél. + 33 (0)1 69 31 39 52 - Email : <a href="mailto:Yimei.liu@idil.fr">Yimei.liu@idil.fr</a> (agence Orsay) ; <b>Bruno Volpe</b> - tél. + 33 (0)4 50 28 34 81 - Email : <a href="mailto:bruno.volpe@idil.fr">bruno.volpe@idil.fr</a> (agence Est et Sud) ; <b>Patrick Cardoas</b> - tél. + 33 (0)6 79 23 55 48 (agence Sud-Ouest)
Just Normlicht France	GL Optics	Tél. + 33 (0)3 88 06 28 22 Email : <a href="mailto:info@just-normlicht.fr">info@just-normlicht.fr</a>
Laser2000	StellarNet	<b>Fabien Poujol</b> - tél. + 33 (0)5 57 10 92 87 Email : <a href="mailto:poujol@laser2000.fr">poujol@laser2000.fr</a>
Ocean Optics Inc.		<b>Alexis Feugier</b> (Responsable clientèle Intégrateurs) tél. + 33 (0)4 42 38 65 88 - Email : <a href="mailto:alexis.feugier@oceanoptics.com">alexis.feugier@oceanoptics.com</a>
Opton Laser International	BW Tek	<b>Jean-Claude Sanudo</b> - tél. + 33 (0)1 69 41 04 05 Email : <a href="mailto:jean-claude.sanudo@optonlaser.com">jean-claude.sanudo@optonlaser.com</a>
Optoprim	Avantes	<b>Arnaud Langlois</b> - tél. + 33 (0)6 14 01 01 12 - Email : <a href="mailto:alanglois@optoprim.com">alanglois@optoprim.com</a>
Photonlines	Zeiss, Radiantis	<b>Laurent Colomer</b> - tél. + 33 (0)1 30 08 99 00 Email : <a href="mailto:la-colomer@photonlines.com">la-colomer@photonlines.com</a>
Pro-Lite Technology France	Admesy BV, Wasatch Photonics Inc.	<b>Jérôme Castay</b> - tél. + 33 (0)5 47 48 90 70 Email : <a href="mailto:jerome.castay@pro-lite.fr">jerome.castay@pro-lite.fr</a>
Wavetel	ISTEQ, SolarLaser	<b>Arnaud Bout</b> - tél. + 33 (0)6 83 55 19 47 / + 33 (0)2 99 14 69 65 Email : <a href="mailto:about@wavetel.fr">about@wavetel.fr</a>

## I Spectromètre



Proposé en édition « spécial anniversaire », le spectromètre de microscopie Raman LabRAM Odyssey est destiné aux mesures micro et macro, et offre la possibilité de faire de l'imagerie confocale avancée en 2D et en 3D : analyse Raman standard, photoluminescence (PL), diffusion Raman améliorée par pointe (TERS), et autres méthodes hybrides. L'instrument revêt une apparence inédite avec un capot aux reflets platine, contrastant avec le marquage noir et bleu LabRAM Odyssey.

[www.horiba.com](http://www.horiba.com)

## I Boîtier HHL



Alpes Lasers, fabricant de lasers QCL de 4  $\mu\text{m}$  à 12  $\mu\text{m}$  DFB ou FP, propose maintenant un boîtier HHL (*high heat load*) avec couplage fibre pour ses lasers CW ou pulsés. Le couplage avec connecteur FC/PC est ajouté au boîtier HHL, une fibre monomode à 5  $\mu\text{m}$  d'ouverture numérique 0,3, de longueur 1 m (en standard) est fournie (efficacité de couplage jusqu'à 50 %, optimisé à la température de fonctionnement).

[www.optonlaser.com](http://www.optonlaser.com)

## I Modules haute-tension

Acal BFi, avec l'appui de son partenaire Advanced Energy, inclut des solutions haute-tension à ses gammes d'alimentations AC-DC et de convertisseurs DC-DC. Les gammes de produits UltraVolt et HiTek Power offrent des solutions flexibles, avec des milliers de possibilités couvrant une gamme d'entrée/sortie de 0-100 Vdc à 0-500 kVdc avec des puissances allant d'1 W à 100 kW et pilotage via une tension de consigne en 0-5 ou 0-10 Vdc. Les solutions peuvent être adaptées aux exigences précises des applications.

[www.acalbfi.com](http://www.acalbfi.com)

## I Alignement 3 axes

La configuration XYZ de ce nouveau système comprend trois étages linéaires motorisés de la série M-111 et une platine piézo 3 axes



fonctionnant en boucle fermée. Tous les axes sont équipés de capteurs de position, évitant les collisions avec les composants en cours de test. En combinaison avec les contrôleurs C-884.4DC et E-727.AS associés au logiciel optionnel C-990.FA1, le système permet l'alignement entièrement automatique des composants optiques, le signal d'intensité optique étant directement injecté sur le contrôleur via une entrée analogique dédiée.

[www.physikinstrumente.com](http://www.physikinstrumente.com)

## I Métrologie d'axes linéaires



L'interféromètre laser 3 faisceaux SP-15000-C de SIOS est destiné à la métrologie d'axes motorisés de précision – calibration d'axes

de machines-outils, de machines spéciales ou de machines de mesure 3D. Capable de travailler jusqu'à une distance de 15 mètres, il mesure simultanément 5 valeurs : la distance, les angles de lacet et de tangage et les déviations verticales et latérales. L'écart entre chaque faisceau est calibré en usine afin d'obtenir des mesures d'angles de très haute précision. La résolution sur la mesure de distance est de 0,1 nm, et la résolution angulaire < 0.01 seconde d'arc sur une amplitude de  $\pm 5^\circ$ .

[www.trioptics.fr](http://www.trioptics.fr)

## I Laser jaune



La source laser jaune de Necsel génère un faisceau à une longueur d'onde de 577 nm, avec une puissance de sortie de 1 W. Le laser jaune est principalement utilisé en médecine et en sciences du vivant : traitement de la maladie de Lyme, de la sclérose en plaques et de la dépression via un traitement intraveineux à l'aide de la lumière jaune du laser.

[www.lasercomponents.com](http://www.lasercomponents.com)

## I Prismes cales



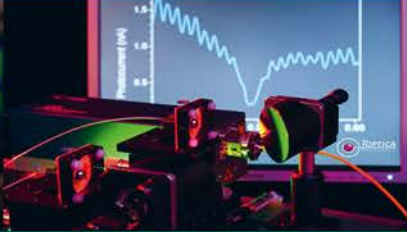
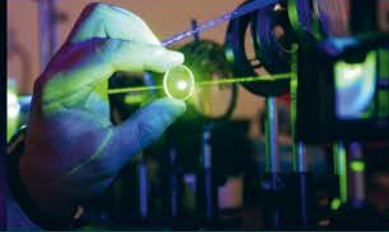
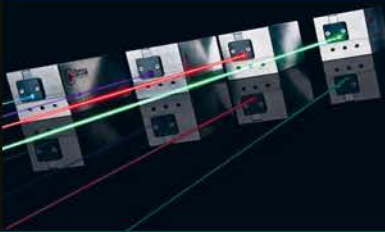
Les prismes cales TECHSPEC en silice fondue adressent une grande variété d'applications de déviation de faisceau laser Nd:YAG. Les nouveaux traitements raie laser offrent une réflexion inférieure à 0,25 % à la longueur d'onde de conception et présentent des seuils de dommage laser garantis de 3 J/cm<sup>2</sup> à 266 nm, 7,5 J/cm<sup>2</sup> à 355 nm, 10 J/cm<sup>2</sup> à 532 nm et 15 J/cm<sup>2</sup> à 1064 nm avec une durée d'impulsion de 20 ns et une fréquence de 20 Hz. Utilisés par paire comme prismes de Risley, ils permettent de personnaliser la redirection du faisceau pour atteindre jusqu'à deux fois la déviation de cale.

[www.edmundoptics.fr](http://www.edmundoptics.fr)

# OPTON LASER INTERNATIONAL



EXPERT EN PHOTONIQUE DEPUIS 1990



## LASERS ET SOURCES

- Lasers CW UV-IR
- Lasers pulsés (ns, ps, fs)
- Sources accordables
- Sources IR (DFB, ICL, QCL)
- THz, SLEDs

## SPECTROSCOPIE & IMAGERIE

- Spectromètres modulaires
- Spectromètres Raman
- Hyperspectral
- Microscopie de fluorescence
- IR, THz, XRF

## OPTOMÉCANIQUES

- Micropositionnement
- Supports optomécaniques
- Composants optiques
- Cristaux non-linéaires
- Isolateurs

## TEST LASERS & COMPOSANTS

- Mesureurs de puissance
- Mesureurs d'énergie
- Lambdamètres
- Détecteurs et caméras IR et THz
- Spectrophotomètres pour optiques

**Princeton  
Instruments**

**FERGIE™**

- 1<sup>er</sup> Spectromètre imageur sans aucune aberration
- Performances ultimes (QE % et SNR)
- Simplicité d'utilisation et coût très attractif

**CONTACTEZ-NOUS  
POUR UNE DÉMONSTRATION**

**NOUVEAU PARTENAIRE**

