

Photoniques

LA REVUE DES SOLUTIONS OPTIQUES

N° 78 • Septembre - Octobre 2015

OPTIQUE SPATIALE

ZOOM SUR LE SPECTROMÈTRE VIRTIS H

LES AVANCÉES
SUR LES CELLULES
PHOTOVOLTAÏQUES



L'OPTIQUE PHOTONIQUE
AU CANADA



■ **COMPRENDRE**
la CRDS pulsée

Lock-in Amplifiers

DC to 500 kHz, 5 MHz, 50 MHz, 600 MHz



All Instruments Include



Spectrum Analyzer



Parametric Sweeper



Oscilloscope with FFT

Upgrade Options



Boxcar Averager



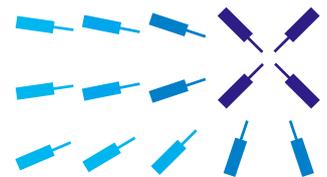
PID Controller



Digitizer

Experience LabOne

Intuitive control by browser based user interface
APIs for C/C++, Python, LabVIEW, MATLAB



Find out more today.
www.zhinst.ch

Zurich
Instruments

Se souvenir de l'avenir

Il faut se souvenir de l'avenir, disait Louis Aragon.

On connaît Aragon le journaliste, le romancier et poète inspiré, et l'intellectuel engagé, résistant et sympathisant communiste. Aragon a également été un conseiller recherché par les responsables politiques pour sa vision projective de notre civilisation, et sa capacité à éclairer un cap. Penseur donc, dans tous les sens du terme, et penseur utile.

Se souvenir de l'avenir. Aujourd'hui plus que jamais, il nous appartient de réapprendre à penser le futur et réintroduire la notion de « temps long » dans nos actions, qu'elles soient collectives ou individuelles. C'est un effort considérable, surtout par temps de crise, puisqu'il faut se projeter au-delà des urgences immédiates et structurer nos forces pour le monde à venir. Et il peut être intéressant de s'inspirer de ce qui se fait ailleurs...



Riad HAIDAR
Rédacteur en chef

Aujourd'hui, nous vous proposons un point sur l'optique photonique au Canada, dont le dynamisme s'exprime par un foisonnement d'innovations, notamment dans les secteurs applicatifs. Les nombreuses structures de transfert technologique jouent efficacement leur rôle, stimulées par les mesures de soutien mises en œuvre par les pouvoirs publics.

Bonne lecture !

SOMMAIRE

N°78 • SEPTEMBRE - OCTOBRE 2015

■ ÉDITORIAL ET ACTUALITÉS DE LA SFO	2
■ ACTUALITÉS DES PÔLES ET ASSOCIATIONS	4
■ ACTUALITÉS DE LA PROFESSION	7
■ FOCUS. L'optique photonique au Canada	13
■ PORTRAIT. Opticien Célèbre. Jacques Babinet	18
■ TÉLÉCOMMUNICATIONS. Fibres optiques et développement durable : le FTTO vert	20
■ PHOTOVOLTAÏQUE. Silicium, couches minces, pérovskites, photonique : de nouvelles avancées de la recherche sur les cellules photovoltaïques. Un bon signe pour la COP 21	23
■ OPTIQUE ET ASTRONOMIE. Rosetta : zoom sur VIRTIS H. Un spectromètre haute résolution pour l'étude de la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko	28
■ MICRO-USINAGE LASER. Développement de sources laser ultra-rapides de forte puissance pour l'usinage	33
■ INSTRUMENTATION. Stratégies frugales pour la fabrication d'instruments scientifiques basés sur la photonique à coût abordable	37
■ DIODES LASER : APPLICATION. Connectivité et lumière bleue. Tendances dans les technologies d'identification des codes à barres	40
■ CAHIER TECHNIQUE	
Comprendre la CRDS pulsée	41
■ PRODUITS	
Nouveautés	47



Photos de couverture : © CNES/Rosetta/MPS for OSIRIS TESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team MPS/UPD/LAM, 2014 / © Exosun / © Fotolia

LE MOT DU PRÉSIDENT

Chères adhérentes et chers adhérents de la Société Française d'Optique

Les membres du Conseil d'Administration de la SFO du 24 septembre 2015 m'ont élu Président. Je les en remercie vivement et suis très heureux de prendre mes fonctions lors de l'Année Internationale de la Lumière. C'est un honneur et un plaisir pour moi de servir notre belle société savante. Je ferai de mon mieux pour perpétuer l'action de tous mes prédécesseurs, que je salue ici avec amitié et respect. Mon rôle sera de représenter et animer notre discipline dans toute sa diversité de thèmes et d'acteurs qui sont dans les universités, les grands organismes et les industries. Ce large spectre est un point fort et une richesse indéniable de la SFO.

Je suis Professeur à l'Université de Grenoble Alpes et chercheur à l'Institut Néel en optique non linéaire, domaine qui me passionne et me permet d'aborder avec mon équipe une recherche fondamentale souvent à la frontière avec les applications.

Je succède à Jean-Jacques Aubert qui a été notre Président durant ces deux dernières années. Je mesure la lourdeur de la tâche à accomplir lorsque je regarde son impressionnant bilan. Des actions de fond ont été menées sur de très nombreux fronts, en particulier ceux concernant nos partenaires : la réactivation de notre participation à l'ICO (International Commission for Optics) qui regroupe les sociétés internationales et nationales d'optique ; le rapprochement avec la SFP (Société Française de Physique) afin de coordonner les actions d'animation et d'harmoniser la tenue de nos congrès biennaux ; la relance de notre action au sein du CNOF (Comité National d'Optique et Photonique) ; l'intensification de notre implication dans l'EOS (European Optical Society) et des propositions fortes d'amélioration de sa gouvernance. Je remercie vivement Jean-Jacques au nom de toute la SFO pour son travail remarquable, et je compte sur lui pour continuer à nous accompagner au sein du CA comme Président sortant.

Durant les deux années de mon mandat, je m'appliquerai à renforcer les actions engagées, développer notre assise d'adhérents et de sponsors, valoriser notre revue Photoniques, nos quinze clubs thématiques (sans forcément en accroître le nombre) et la commission d'enseignement, développer le nombre et les moyens des EOS/SFO Student Clubs qui ne sont aujourd'hui présents que dans quatre régions, réactiver les écoles thématiques dans une formule renouvelée, améliorer encore les liens entre le milieu académique et l'industrie. Je m'impliquerai également dans l'organisation de notre prochain congrès Optique Bordeaux 2016 du 20 au 23 juin 2016 et la mise sur les rails du congrès de 2018. Je sais que je ne serai pas seul et que je pourrai compter sur le dynamisme et le volontarisme des membres du CA fraîchement renouvelé ainsi que sur Catherine Hercé, Mariam Mellot et Rania Haidar qui constituent l'équipe administrative et de gestion, autant dire le pilier opérationnel de la SFO.



Benoît BOULANGER
Président de la SFO

Je compte aussi sur vous toutes et vous tous pour porter haut les couleurs de l'optique.

Bien amicalement.

AGENDA

Conférences des clubs SFO

CMOI FLUVISU 2015

16-20 novembre 2015 •
Pleumeur-Bodou

<http://www.club-cmoi.com/#!2015/c1kqz>

Conférences parrainées par la SFO

Séminaire VeCSEL 2015

17-19 novembre 2015 •
Montpellier

<http://stern.ies.univ-montp2.fr/vecsel/?-VeCSEL-Workshop-2015>

Journées Attolab 2015

1^{re} rencontre des utilisateurs Attolab

19-20 novembre 2015 • site de l'Orme des Merisiers au CEA Saclay.

<http://iramis.cea.fr/meetings/Attolab-users-meeting-2015/>

Séminaire Dautreppe 2015

En 2015, dans le cadre de l'Année Internationale de la Lumière et organisé en partenariat avec la Société de Physique Suisse, le séminaire Dautreppe traitera de la photonique.

7-10 décembre 2015 • Grenoble

<http://dautreppe.photonique.grenoble.cnrs.fr/>

Devenez
membre
de la



- revue Photoniques
- tarifs préférentiels pour certaines conférences
- site internet et bourse de l'emploi
- aide pour l'organisation de conférence
- adhésion à la European Optical Society
- annuaire
- réseau de professionnels et clubs
- informations actualisées

CONTACTEZ-NOUS Mariam MELLOTTél. : 33 (0)1 64 53 31 82 – mariam.mellot@institutoptique.fr

■ Congrès OPTIQUE Bordeaux 2016

20 au 23 juin 2016

La Société Française d'Optique et les acteurs de la photonique bordelaise sont heureux d'annoncer le prochain congrès national OPTIQUE Bordeaux 2016, qui se tiendra du 20 au 23 juin 2016 à Bordeaux.

Pendant quatre jours, toutes les communautés de l'optique et de la photonique en France auront l'occasion de se rencontrer. Vous y trouverez le Colloque sur les Lasers et l'Optique Quantique (COLOQ'15), la conférence Horizons de l'Optique, les Journées Nationales de l'Optique Guidée (JNOG), les Journées Recherche Industrie de l'Optique Adaptative (JRIOA),

la session PAMO-JSM de la SFP ainsi que plusieurs clubs tels que photonique organique et nanophotonique.

Que ce soit en plénière pour une exploration plus globale de l'optique, en sessions spécialisées et pédagogiques, ou même en session industrielle pour avoir une idée plus précise du monde de l'entreprise, il y aura une opportunité d'échanges toutes thématiques confondues.

Comme à chaque édition, notamment à Paris-Villetaneuse en 2013 et à Rennes en 2015, chacun aura la possibilité de partager un ou plusieurs projets en soumettant un poster.

L'Institut d'Optique d'Aquitaine, le Laboratoire Ondes et Matière d'Aquitaine, le Centre Lasers Intenses et Applications, ainsi que de nombreux autres acteurs académiques et industriels de la région Aquitaine, seront heureux de vous accueillir à l'occasion du Congrès OPTIQUE Bordeaux 2016.

Contacts

Rania Haidar (SFO)
rania.hajjar@institutoptique.fr
 ou **Philippe Lalanne (IOA)**
philippe.lalanne@institutoptique.fr

■ 14^e colloque international francophone CMOI

Méthodes et Techniques Optiques pour l'Industrie

16^e congrès français FLUVISU

Visualisation et Traitement d'Images en Mécanique des Fluides

Ces deux colloques seront organisés au Pôle Phoenix à Pleumeur-Bodou (Lannion) du 16 au 20 novembre 2015 par les laboratoires Foton (<http://foton.cnrs.fr>), LBMS (www.lbms.fr) et le cluster Photonics Bretagne (<http://photonics-bretagne.com>).

Une formation introductive sera proposée le 16 novembre à l'ENSSAT (Lannion). Du 17 au 19 novembre, les conférences CMOI correspondront à 9 sessions (structuration de la photonique : des origines à nos jours ; capteurs et réseaux de capteurs à fibres optiques ; laser et

fonctions optiques ; techniques d'analyse photonique ; holographie ; green & biophotonique ; micro-nano photonique ; contrôle et mesure pour l'industrie ; mesures optiques pour le transport et les infrastructures) et celles de FLUVISU à 5 sessions (PIV et LDV ; méthodes de spectroscopie ; techniques avancées (1 et 2) ; flow diagnostics).

Une exposition de matériels opérationnels pour l'industrie avec des démonstrations pédagogiques illustrant les thèmes du colloque sera organisée les 18 et 19 novembre 2015.

La manifestation s'achèvera par des visites techniques entreprises/laboratoires le 20 novembre.

Voir détails sur : <http://www.club-cmoi.com/#!2015/c1kqz> et <http://fluvisu.org/colloques/>

Contacts

Christiane Carré
christiane.carre@univ-ubs.fr
Blaise Nsom
blaise.nsom@univ-brest.fr
 et **Paul Smigielski**
club-cmoi@wanadoo.fr

■ Journée 2015 du Club Optique Micro-ondes de la SFO

La journée du Club Optique-Microondes s'est déroulée le 12 juin à la cité des congrès de Nantes dans le cadre des journées scientifiques de l'université de Nantes, et fut organisée par le laboratoire IETR. Les 65 personnes présentes ont pu assister à des présentations orales et posters de grande qualité. Les présentations scientifiques ont débuté avec un exposé d' Afshin S. Daryoush,

Prof. Of ECE, Drexel University, sur un système de mesures en proche infrarouge large-bande pour la détection de traumatismes cérébraux (programme disponible en ligne : http://www.js.univ-nantes.fr/1422366701602/0/fiche__page-libre/&RH=1422276814321).

Pour les adhérents à la SFO, les présentations de la journée sont mises en ligne sur

le site du club OMW/SFO : <http://www.sfoptique.org/SFO/club-omw/>.

La prochaine édition sera organisée à Nice par l'Observatoire de la côte d'Azur, probablement en juin 2016.

Contacts

anne-laure.billabert@cnam.fr
pascal.nouchi@thalesgroup.com

FINANCEMENT DE PROJETS R&D De jolis scores pour la Route des Lasers !

Au cours de l'été sont arrivés les noms des projets retenus pour un financement via le FUI (Fonds unique interministériel) et via l'ANR (Agence nationale de la recherche) : avec un carton plein au FUI et un score presque deux fois plus élevé que la moyenne nationale à l'ANR, le pôle Route des Lasers démontre la qualité de son accompagnement pour la détection et la labellisation des projets de recherche et développement.

FUI : les 4 projets labellisés par le pôle sont financés

Carton plein au FUI ! Les quatre projets labellisés ou co-labellisés par le pôle Route des Lasers et présentés lors du 20^e appel à projets du FUI ont reçu un avis favorable pour leur financement.

- Le projet PharmaSense traite du développement de nouveaux systèmes d'inspection de médicaments basés sur des capteurs photoniques innovants.
- Le projet I AM SURE traite des contrôles géométrique, dimensionnel et santé matière des pièces fabriquées par les procédés de fabrication additive métallique.
- Le projet papEOS vise à améliorer

l'efficacité des parcours de soins des pathologies ostéo-articulaires aux étapes pré-, per- et post-opératoires.

- L'objectif du projet SAXSize est le développement d'un équipement innovant de caractérisation de taille de nanoparticules.

Appel générique de l'ANR : 18 % des projets seront financés

L'appel à projets générique de l'ANR est, avec un taux de sélection de 10 % au niveau national, un appel très sélectif. Le pôle Route des Lasers est donc particulièrement fier de ses 4 projets financés, qui représentent un taux de succès de 18 %.

- CortMem étudie les mécanismes d'attribution neuronale de la mémoire récente et ancienne dans le cerveau sain et pathologique.
- HyperPhorb vise à étudier le traitement hyperspectral du moment angulaire orbital de la lumière.
- Paint étudie les rôles, propriétés et régulation du trafic intracellulaire des récepteurs AMPA dans la plasticité synaptique.
- TurboHEDP mène des expériences d'hydrodynamique turbulente dans des plasmas denses et chauds.

Trois nouvelles entreprises sur la Route des Lasers !

Ces derniers mois, trois nouvelles entreprises sont venues grossir les rangs des entreprises photoniques aquitaines. Moria Lase, spécialisée dans la fabrication de matériel médico-chirurgical et dentaire, est une filiale du groupe Moria. Son centre de R&D, installé au sein de l'Institut d'optique d'Aquitaine à Talence, est dirigé par François Salin, ancien directeur d'Eolite Lasers et du CELIA (Centre lasers intenses et applications). Il est spécialisé dans le développement de dispositifs médicaux innovants pour l'ophtalmologie.

L'activité de la société Irsiome concerne elle aussi le domaine médical. Son fondateur, Romain Royon, a développé, au sein du CELIA, un système laser accordable en

longueur d'onde, destiné notamment aux applications dermatologiques. Le projet de création d'entreprise a été lauréat du concours i-Lab en 2014 dans la catégorie émergence et en 2015 dans la catégorie création-développement.

La dernière société créée, Spark Lasers, est dirigée par Pascal Dupriez, qui dirigeait jusqu'en juillet 2015, le département sources laser et composants fibrés d'ALPhANOV, le centre technologique du pôle de compétitivité Route des Lasers. Elle propose une gamme de lasers industriels picoseconde haute énergie, mis au point en collaboration avec le laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'optique. Le projet a été lauréat du concours i-Lab en 2014 dans la catégorie émergence.

SALONS 2016

BIOS/Photonics West



ISP System

Cette année encore, le pôle Route des Lasers accompagnera ses entreprises sur les salons BIOS et Photonics West qui se tiendront à San Francisco respectivement les 13 et 14 et du 16 au 18 février 2015. Soutenue par la Région Aquitaine, cette action permet une présence collective sur ces deux salons majeurs de la profession. Sur BIOS, le pôle Route des Lasers organise pour la troisième année consécutive un stand en son nom. L'occasion de présenter les dernières nouveautés des sociétés implantées sur le secteur de la biophotonique. Sur Photonics West, les entreprises aquitaines sont accueillies sur le pavillon France géré par Business France.

Micronora

La Route des Lasers est partenaire du Club Laser et procédés (CLP) et du syndicat professionnel AFOP pour la coordination d'un stand collectif lors du salon Micronora 2015. Avec ses 616 exposants et ses 15 277 visiteurs (chiffres de la dernière édition qui s'est tenue en 2014), Micronora est le salon européen de référence dans le domaine des microtechniques, domaine dans lequel les applications de l'optique photonique connaissent un développement rapide, aussi bien pour la fabrication, que pour le contrôle ou la mesure. L'édition 2016 aura lieu à Besançon du 27 au 30 septembre 2016.

AGENDA

Forum des adhérents

9 et 10 novembre • Talence

Journée Photonique, aéronautique et spatial (PHAROS)

8 décembre 2015 • Mérignac

Informations : www.routedeslasers.com

■ Déménagement de Photonics Bretagne



Photonics Bretagne a déménagé cet été dans les locaux du futur Photonics Park, centre R&D photonique d'excellence, tourné vers l'applicatif, situé au 4 rue Louis de Broglie, à Lannion. Les bureaux sont en cours d'aménagement dans le nouveau bâtiment, qui a été intégré par une partie de l'équipe. Le déménagement des laboratoires devrait s'effectuer au printemps 2016, en raison de travaux à effectuer sur le site afin de construire de nouveaux équipements techniques de pointe (dont une tour de fibrage). Le Photonics Park

permettra une évolution vers un centre R&D photonique d'excellence, d'envergure mondiale et tourné vers l'applicatif. Il s'agira ainsi d'élargir le champ d'expertise actuel de PERFOS, tout en intensifiant les efforts dans le développement de fibres spéciales, briques technologiques des innovations de demain. Le Photonics Park visera également à favoriser les transferts de technologie et le montage de projets R&D, en stimulant les collaborations entre les acteurs de la recherche et de l'industrie.



■ Les valeurs du groupe Keopsys

Keopsys s'implique dans le monde des hautes technologies et se positionne aujourd'hui en tant que leader sur le marché des lasers et des amplificateurs pulsés et continus, de moyenne à forte puissance. À ce jour, Keopsys emploie 67 personnes, principalement à Lannion, où se situe l'intégralité de sa production. Keopsys choisit ses fournisseurs en favorisant les producteurs français et européens afin de garantir la traçabilité de ses systèmes et de proposer des produits de haute performance, tout en participant au développement d'activités de haute technologie dans l'Hexagone. Fin 2014, Keopsys a

racheté les actifs lannionnais de la société 3S Photonics et permis la sauvegarde de 39 emplois en créant une nouvelle société, Lea-Photonics, perpétuant ainsi le savoir-faire français et rapatriant toutes les activités de sous-traitance de production qui s'effectuaient à l'étranger.

Le groupe Keopsys ainsi formé se compose aujourd'hui de trois sociétés (Keopsys, Lea Photonics, SensUp) axées sur les lasers et amplificateurs à fibres et les systèmes optiques de détection, ce qui représente environ 130 emplois en France. Les valeurs du groupe reposent sur le déploiement industriel, la qualité et l'innovation.

■ Projet DELBIA

Le projet DELBIA (Détection En Ligne de Biocides pour l'Industrie Agroalimentaire au cours des opérations de rinçage) a été labellisé par le pôle Valorial. DELBIA vise à développer de nouveaux capteurs pour les résidus de biocides, destinés aux entreprises agroalimentaires. Il s'agit ainsi de contrôler les opérations de rinçage et d'optimiser les quantités d'eau utilisées, de garantir l'absence de résidus biocides et de mettre en place une traçabilité sur les opérations de nettoyage et de désinfection. Dans le cadre de ce projet, qui réunit des acteurs industriels et des centres de recherche (DIAFIR, Eau et Industrie, SILL, ANSES, ADRIA Développement, ACTALIA et Photonics Bretagne) Photonics Bretagne est impliqué en tant que centre de transfert et a ainsi pour objectifs de proposer une nouvelle expertise de développement de sondes en « milieux difficiles » et de favoriser le transfert des technologies photoniques vers les filières applicatives de l'industrie agro-alimentaire.

■ CMOI-Fluvisu à Lannion et Pleumeur-Bodou 16 au 20 novembre 2015

Le 14^e Colloque international franco-ophone sur les Méthodes et Techniques Optiques pour l'Industrie du Club CMOI/SFO, se tiendra à Pleumeur-Bodou (Pôle Phoenix) et Lannion, du 16 au 20 novembre 2015. L'édition 2015 du colloque CMOI est organisée en partenariat avec FOTON (CNRS UMR 6082) et Photonics Bretagne, et est associée au 16^e Congrès Français de Visualisation et de Traitement d'Images en Mécanique des Fluides (Club FLUVISU/SFO).

Le colloque CMOI 2015 proposera une grande exposition à laquelle seront conviées les nombreuses PME de Bretagne ayant une activité liée à l'optique et à la photonique. Simultanément, le colloque sera l'un des événements clés, mis en place au titre de « 2015, Année de la Lumière en France ».

NOUVEAUX ADHÉRENTS



FIST SA (75 – Paris)
www.fist.fr

France Innovation Scientifique et Transfert SA (FIST SA), créée en 1992, est aujourd'hui filiale du CNRS à 70 % et de BPI France à 30 %. Elle a pour mission le transfert vers l'industrie de technologies innovantes, principalement pour le CNRS.

Contact : Olivier Daniel
 01 40 51 00 90 - frinnov@fist.fr

LHERITIER
 (95 – Cergy Pontoise)
www.lheritier-alcen.com

Depuis 30 ans, LHERITIER est un acteur du domaine de l'optronique, spécialisé dans les conditions de visibilité dégradées, proposant des produits innovants et adaptés aux marchés de la défense, de la sécurité, de l'énergie et du transport.

Contact : Pascal Dupuy
 01 34 24 38 20
info@lheritier-alcen.com



NeTHIS - New Terahertz Imaging systems
 (33 – Mérignac)
www.nethis-thz.com

NeTHIS industrialise et commercialise des composants de vision industrielle dédiés à l'imagerie pénétrante offrant aujourd'hui la plus large bande de sensibilité spectrale.

Contact : Arnaud Van Hove
 05 47 74 62 10 - info@nethis-thz.com



SOFRADIR
 (91 – Palaiseau)
www.sofradir.com

Sofradir, fabricant de détecteurs infrarouge pour applications militaires, spatiales, commerciales et scientifiques.

Contact : Claire Valentin
 01 60 92 18 30 - info@sofradir.com

Rencontres Recherche & Industrie : embarquez pour une visite d'Airbus et du CNES

Les 8 et 9 décembre prochains, l'AFOP organise de nouvelles Rencontres Recherche & Industrie en région toulousaine. L'occasion de visiter plusieurs entreprises et laboratoires et notamment le CNES, Airbus ou encore le LAAS lors de

trois demi-journées spécialement axées autour de l'optique et de la photonique. Le programme de ces journées, exclusivement réservées à ses adhérents et sur inscription, est disponible sur demande ou sur notre site internet.

www.afoptique.org, portail des activités et des acteurs photoniques

Véritable portail du secteur photonique, le site www.afoptique.org regroupe à la fois des actualités secteur, partenaires et sociétés, des informations produits ou encore des offres d'emplois. Outil de promotion des activités des adhérents de l'AFOP, il permet d'être un canal supplémentaire dans la diffusion de leurs informations (communiqués de presse, fiche détaillée, vitrine produits, offres d'emplois) mais également dans leur stratégie commerciale grâce à sa

nouvelle plateforme « Place de marchés ». En effet, suite aux demandes de plus en plus fréquentes de mise en relation ou de besoins spécifiques photoniques, l'AFOP a créé ce nouveau module qui permet gratuitement à tout internaute de déposer sur le site, une demande de produit(s) ou de service(s) en rapport avec la photonique. Ouverte à tous, cette nouvelle fonctionnalité permet la recherche simple et rapide de partenaires commerciaux adaptés.

Nouveaux locaux en plein cœur du 12^e arrondissement

Suite logique de sa prise d'autonomie en début d'année 2015, l'AFOP continue sur sa lancée en ayant emménagé début septembre dans de nouveaux bureaux au sein de l'Institut de la Vision. Notre nouvelle adresse : 13 rue Moreau dans le 12^e arrondissement à Paris, entre les stations Bastille, Ledru-Rollin et Gare de Lyon. Rien ne change pour les adhérents au niveau des services et activités de votre syndicat. Concernant leur accueil, un bureau de passage équipé pour 4 personnes pourra être occasionnellement mis à disposition pour des réunions ponctuelles.

Contact

AFOP
 Tél. : 01 53 46 27 08
contact@afoptique.org
www.afoptique.org





DEFI Photonique : bilan à mi-parcours

Un projet national pour la filière, des services pour les entreprises

La présentation en juin 2015 de l'étude sur la photonique menée à la demande de la Direction Générale des Entreprises a permis de mettre en lumière quatre enjeux stratégiques pour la photonique française : améliorer le financement et la rentabilité des entreprises du secteur, réduire le temps de mise sur le marché, mettre en place des politiques de soutien différenciées selon les marchés ciblés et poursuivre la structuration de la filière nationale. Structurer la filière nationale de l'optique-photonique est en effet un enjeu capital pour que les positions françaises dans le domaine puissent être entendues tant en France qu'à l'étranger et particulièrement en Europe où le partenariat public-privé Photonics21 peut être un outil efficace de développement de nos entreprises si elles se présentent de façon coordonnée et unifiée.

Lorsque le projet DEFI Photonique, soutenu par l'État via le Programme d'Investissements d'Avenir, a été lancé en 2012, il s'était donné l'objectif de contribuer à cette structuration du secteur. Maintenant que ce projet est à mi-parcours, il est bon de tirer quelques enseignements.

D'abord, et avant même sa mise en œuvre effective, il a été l'occasion pour toutes les composantes du Comité National d'Optique-Photonique (CNOP) de réfléchir collectivement sur les priorités à donner pour faciliter la croissance de nos entreprises. Il en est résulté un projet construit autour de deux volets, l'un sur l'accompagnement des PME dans leurs projets de croissance ou de diversification, l'autre sur la formation continue.

La maîtrise d'œuvre du projet a été confiée à l'AFOP, le syndicat professionnel optique photonique et le pilotage des deux volets au tandem Opticsvalley / Photonics Bretagne pour le premier et au pôle de compétitivité Route des Lasers pour le second. Mais ce sont bien toutes les composantes du CNOP qui participent

à la gestion de ce projet et aux actions qui en découlent.

La structure de gestion de projet mise en place dès juin 2013 (commission de gouvernance, comités techniques de pilotage) a facilité les réalisations ultérieures de la filière comme son comité stratégique qui permet de faire ressortir les projets industriels les plus structurants nécessaires au développement économique non seulement de la photonique, mais aussi de ses domaines applicatifs.

Le projet DEFI a, de plus, permis de communiquer largement sur l'importance stratégique de la filière photonique. C'est ainsi que l'équipe du projet DEFI a déjà rencontré près de 800 responsables industriels, académiques, ou institutionnels, lors de manifestations nationales ou régionales pour expliquer les objectifs et les volets proposés.

Volet « Accompagnement des entreprises »

Accompagnement par un consultant

DEFI Photonique propose aux PME de se faire accompagner par un cabinet de consultants pour les aider à analyser et mettre en place une stratégie de croissance ou de diversification de leurs produits et marchés.

La subvention du Programme des Investissements d'Avenir permet de financer à hauteur de 50 % les frais de consultation, à concurrence de 5000 €. L'équipe du volet a labellisé une quinzaine de cabinets de consultants, évalués sur leur méthodologie, leur expérience et leur capacité à soutenir les entreprises du secteur. L'annuaire des cabinets est disponible en ligne : http://cnop-france.org/wp-content/uploads/2013/06/DEFI_annuaire-2014.pdf

Les demandes d'accompagnement sont traitées au fil de l'eau, avec une réponse sous 15 jours.



ENABLING PHOTONIC TECHNOLOGIES

La précision est au cœur de tout ce que nous faisons



Acousto-Optique | Electro-Optique |
Fibre Optique | Optique de Précision |
Instrumentation

Pour tout renseignement,
merci de contacter
Sébastien Lenoir

E: slenoir@goochandhousego.com
T: 06 08 78 52 56

goochandhousego.com

Advanced Photonic Solutions for
Aéronautique & Défense |
Industrie | Sciences de la Vie |
Recherche Scientifique



Objectifs et résultats : 70 projets d'accompagnements sont prévus à fin 2017. Après un temps de mise en route, le volet a permis d'accompagner 19 PME de toute la France en 18 mois.

Conditions et candidatures : toute PME française ayant besoin de soutien pour définir une stratégie.

Contact : croissance@defi-photonique.fr / www.croissance.defi-photonique.fr

Achat mutualisé d'études de marchés

En mutualisant l'achat de licences pour des études marchés, DEFI Photonique permet d'économiser jusqu'à 75 % sur le prix d'une licence individuelle, en couplant la négociation collective et en subventionnant les PME qui participent.

Objectifs et résultats : 10 achats d'études sont prévus à fin 2017. Le volet a permis d'acheter 2 études.

Une des clés du succès est la manifestation d'intérêt par une entreprise auprès de DEFI Photonique qui recherche alors d'autres acheteurs. Les entreprises sont invitées à solliciter l'équipe projet.

Contact : croissance@defi-photonique.fr / www.croissance.defi-photonique.fr

Volet « Structuration de la formation continue »

L'objectif principal de ce volet est le développement et la promotion d'un Réseau National de la Formation Continue et la mise à disposition de ressources pédagogiques.

Le volet a réalisé une étude de marché en 2014 sur les besoins des entreprises et continue à collecter leurs besoins et les

compétences de formation des acteurs industriels ou des organismes de formation. Un site Internet dédié sera mis en ligne en septembre 2015 pour diffuser l'ensemble des offres de formations continues.

Le volet DEFI Photonique propose un tarif réduit jusqu'à 50 % pour les PME.

Objectifs et résultats : 8 nouvelles formations, 100 stagiaires formés.

Les formations réalisées portaient notamment sur les thèmes de la sécurité laser, des fibres optiques, des écrans et de la visualisation. Les futures formations, en cours de création porteront sur le marketing stratégique et le marquage CE des dispositifs médicaux.

DEFI Photonique définit actuellement un système de reconnaissance des formations sur la sécurité laser avec le soutien du CNSO, Comité National de Sécurité Optique.

Enfin, DEFI réalise une enquête auprès des acteurs dans le but de créer un certificat de qualification professionnel (CQP) pour les opérateurs laser.

Contact : formation@defi-photonique.fr / formation.defi-photonique.fr

Il reste plus de 2 ans au projet DEFI pour récolter les fruits de son travail tout en continuant à s'insérer dans l'ensemble des actions que va mener le CNOP en réponse aux quatre enjeux stratégiques soulignés par l'étude DGE et aux huit recommandations émises par la profession le 17 juin, journée sur les « Perspectives de la photonique française » :

- amplifier le financement sur le secteur, en multipliant les actions permettant aux PME de comprendre les mécanismes de financement et de rencontrer leurs acteurs ;

- rapprocher l'industrie photonique de ses marchés d'application, en poursuivant la mise en place d'événements nationaux ou locaux menés en partenariat avec les acteurs des domaines applicatifs ;
- renforcer la capacité d'industrialisation des entreprises photoniques, en aidant les PME à s'appuyer sur les plateformes existantes et en donnant à certaines de ces plates-formes une dimension nationale ;
- promouvoir le marketing stratégique et opérationnel comme levier de croissance, en s'appuyant sur le projet DEFI et en poursuivant des actions spécifiques locales portées par les membres du CNOP ;
- lancer des projets stratégiques et structurants, en suscitant des propositions d'actions industrielles et en aidant les industriels porteurs de projet à les faire connaître des pouvoirs publics ;
- améliorer la formation, tant professionnelle via le volet formation de DEFI qu'initiale via les travaux de la SFO (Société Française d'Optique) ;
- faire connaître la photonique, avec cette année l'opportunité que représente la décision de l'Organisation des Nations Unies de déclarer 2015 « Année Internationale de la Lumière et des Techniques utilisant la Lumière » ; c'est donc naturellement que le CNOP assure le pilotage de sa déclinaison française « 2015, Année de la Lumière en France » ;
- structurer et pérenniser l'organisation nationale du secteur, qui reste un challenge majeur.

www.defi-photonique.fr



Le projet DEFI Photonique a bénéficié du Programme d'Investissements d'Avenir



■ Les publications en physique au CNRS : combien, par qui et où ?

Martina Knoop, Lorenzo Brighigni et Bart van Tiggelen
Institut de physique du CNRS
martina.knoop@univ-amu.fr

L'évolution rapide du paysage des publications scientifiques fait surgir beaucoup de questions et de discussions dans nos communautés. C'est une bonne chose, car cela nous concerne plus que jamais. Dans une démarche commune, l'Institut de physique (INP) du CNRS et la Société française de physique (SFP) contribuent à ce débat en proposant des outils aux chercheurs, et en organisant des sessions d'informations (voir, par exemple, [1]).

Afin d'ancrer la discussion sur des bases plus solides, nous présentons ici une étude statistique sur les publications scientifiques dans le domaine de la physique en France, en particulier celles du CNRS. Les chiffres sont extraits directement de l'analyse du Web of Science ou de l'outil Zento du CNRS, qui recense la production scientifique par extraction de la base de données ISI Web of Science

(<http://wokinfo.com/>) sur mot-clé prédéfini. Cette base de données est sans doute tronquée (comme toutes les bases de données), mais dans le domaine de la physique elle comporte 3500 revues, pour la plupart des journaux réguliers, et peu d'actes de colloque. Dans cet article, la « physique » correspond aux domaines de recherche tels que définis sur le Web of Science.

En 2013, un peu moins de 10 000 articles de « physique » étaient publiés en France. Si nous nous intéressons aux données concernant toutes les unités affiliées au CNRS (UMR, UPR, UMS, UMI...), on repère ainsi environ 81 % de toute la production scientifique de la France en physique. Les 19 % restants concernent les articles signés par des unités sans mixité avec le CNRS, par d'autres EPST, EPIC (CEA, CNES, Onera...) ou des entreprises. On a constaté d'ailleurs que presque 16 % des auteurs français en physique renseignent leur affiliation de façon incorrecte et ne sont pas repérés par le mot-clé « CNRS ». Sans doute la multiplication des tutelles incite les coauteurs à tronquer les signatures, mais une fraction non négligeable des physiciens-auteurs

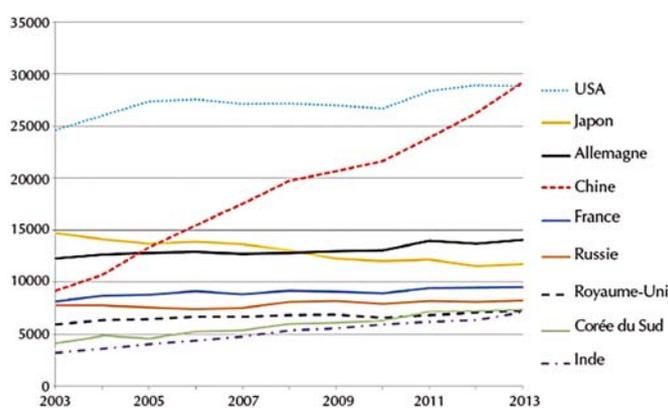


Figure 1. Évolution du nombre des publications en physique par pays pendant 10 ans. Entre 2003 et 2013, le nombre total est passé de 102 000 à 137 000 (données Web of Science).

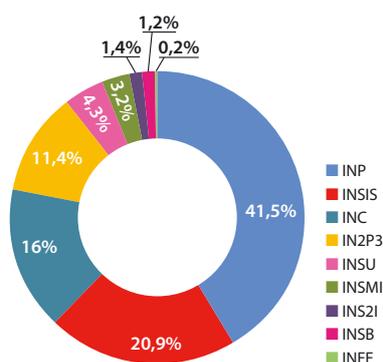


Figure 2. Répartition des publications en physique par institut du CNRS. Pour les publications signées par plusieurs (n) instituts, chaque institut obtient sa part fractionnée (1/n) (données 2011-2012).

des unités du CNRS ne mentionnent même pas le nom de leur cotutelle, voire de leur propre employeur. Au niveau mondial, et toutes thématiques confondues, presque 1,6 million d'articles paraissent par an. Plus de 130 000 articles de physique, soit 8,6 % de l'ensemble, étaient publiés en 2013 dans le monde, un chiffre qui a augmenté d'un

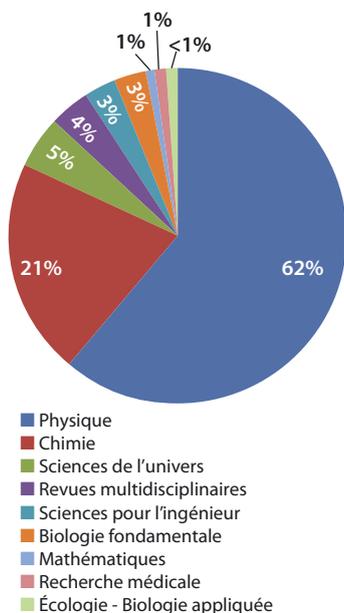
tiers depuis 2003. Presque 7500 articles en physique par an sont cosignés par une unité CNRS, soit 5,8 % de l'ensemble mondial en physique, ou 15 % de la production totale du CNRS, estimée à 50 000 par an. Au cours de la dernière décennie, le poids relatif des pays publieurs s'est modifié, comme le montre la figure 1, avec une forte croissance des publications venant

de la Chine.

Si nous considérons « toute la physique au CNRS », ceci comporte *a priori* la production des instituts INP et IN2P3 dans leur totalité, et une partie significative des publications des instituts INSIS et INSU. Par ailleurs, des publications peuvent être cosignées par des auteurs de différents instituts. Dans le cas d'auteurs de deux instituts différents, la publication compte, dans notre analyse, 0,5 pour chaque institut. Ce calcul « fractionné » est généralement utilisé pour pondérer les contributions collaboratives. De ce calcul résulte la structure fine de la répartition des publications, visible sur la figure 2. L'ensemble des instituts du CNRS (exception faite des sciences humaines et sociales) publie des articles en relation avec la physique. Si on compte directement les signataires d'un article, alors 50 % de toutes les publications en physique au CNRS sont signées par au moins un auteur de l'INP. On peut par ailleurs observer (figure 3) que presque deux tiers de la production scientifique de l'Institut de Physique du CNRS concerne vraiment « la physique » – définie dans le sens des domaines de recherche du Web of Science. Les figures 2

Figure 3. Répartition des catégories du Web of Science dans les publications de l'Institut de Physique du CNRS (un article peut se retrouver dans plusieurs catégories) (données Zento 2013, utilisation de l'indexation OST, www.obs-ost.fr).

Domaines de publication de l'INP



et 3 montrent que le périmètre de l'INP couvre une large palette de thématiques et que la physique est une activité intrinsèquement interdisciplinaire. Il y a une vraie synergie qui existe aux interfaces de la

physique, et en particulier avec la chimie. Au sein de la physique, on peut remarquer que la production scientifique mondiale est dominée en nombre d'articles par trois grandes thématiques : la physique appliquée, la physique de la matière condensée et la physique des matériaux. Cette répartition peut être retrouvée dans la distribution des principaux journaux dans lesquels les articles de l'INP apparaissent, avec Physical Review B (matière condensée) largement en tête du classement. La figure 4 illustre (en rouge) le poids des articles écrits par des auteurs affiliés à l'INP sur la totalité des articles d'une revue. Les barres d'erreur de ce type de statistique sont évidemment grandes pour des journaux de petit volume. Il est remarquable de constater que 7 % de toutes les publications dans les journaux de type « lettre blanche » (toutes thématiques confondues), comme Physical Review Letters (PRL) et EPL, sont signées ou cosignées par un auteur de l'Institut de Physique du CNRS ! Concluons sur le facteur d'impact (IF). Il est bien connu que le calcul d'un IF n'a de sens que pour l'ensemble des articles d'un journal, et que cette moyenne ne reflète jamais la qualité d'un article individuel [2]. Il va sans dire que, pour juger cette dernière, il n'y a pas de solution

de calcul : il faut lire l'article ! Plus de 80 % des journaux qui publient les articles de l'INP ont un IF < 4, avec une valeur moyenne d'environ 2,8 ; un deuxième petit pic dans cette distribution peut être retrouvé autour de l'IF de Physical Review Letters (figure 5). Le calcul de l'IF est malheureusement devenu un argument de « vente », qui s'appuie sur une valeur moyennée sur une variété d'articles et de communautés trop différentes [2]. Même les grands journaux multidisciplinaires (tels que Nature ou Science) publient des articles à zéro citation ! Le graphique de la figure 5 montre bien que les publications de l'INP sont distribuées dans une large gamme de journaux de différents facteurs d'impact. La très grande majorité (> 80 %) des articles sera citée au moins une fois au cours des cinq ans suivant leur parution, ce qui est très rassurant dans un domaine où certaines publications ne deviennent intéressantes qu'après plusieurs décennies.

Références

- [1] A. Henri et al., Réflexions sur la « Voie dorée » des publications scientifiques, *Reflète de la physique* 30 (2012) 28-30.
- [2] La SFP et l'INP du CNRS sensibilisent les physiciens à l'utilisation abusive des facteurs d'impact, *Reflète de la physique* 32 (2013) 46.

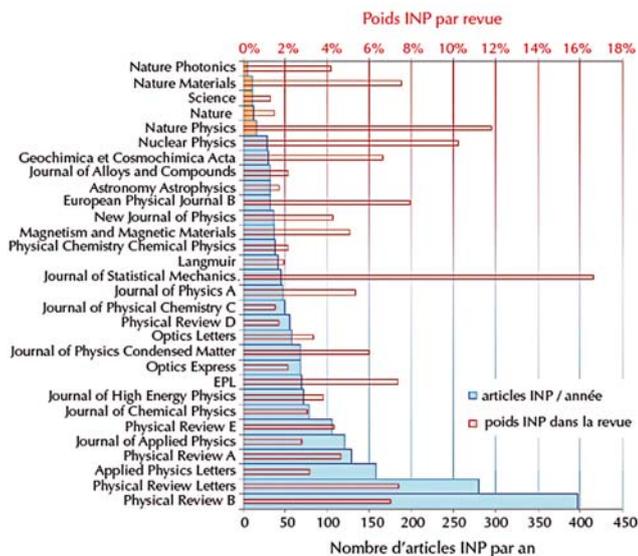


Figure 5. Nombre de publications de l'Institut de Physique du CNRS, en fonction du facteur d'impact de la revue. Ces chiffres sont cumulés sur 5 ans (2007-2011). La figure montre que 50 % des articles sont publiés dans des revues avec un facteur d'impact (IF) à 5 ans inférieur à 2,5.

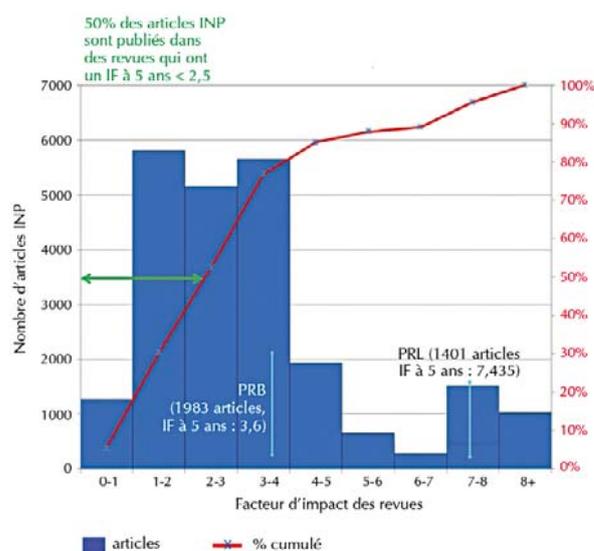


Figure 4. Nombre moyen annuel (entre 2007 et 2011) de publications signées par une unité rattachée à l'INP pour les 25 revues de physique dans lesquelles l'INP publie le plus (en bleu) et pour 5 revues « prestige » multidisciplinaires (en orange), et poids relatif (en rouge) (données Web of Science 2007-2011).

Note : Cet article est adapté de l'article éponyme paru dans *Reflète de la Physique* en décembre 2014. Nous avons renoncé à simplement élargir le contenu à l'optique-photonique, car ce thème s'est avéré suffisamment vaste pour justifier d'une étude (et donc d'un article) à part.

■ Une fibre optique pour stopper la lumière

En plongeant une fibre optique dans un nuage d'atomes froids, des physiciens du laboratoire Kastler Brossel (UPMC/CNRS/ENS/Collège de France) ont ralenti, arrêté, puis relancé un faisceau lumineux se propageant au cœur de la fibre. Ce dispositif constitue la première réalisation fibrée d'une mémoire optique. Ce travail a été publié le 7 mai 2015 dans la revue *Physical Review Letters*.



Arrêter la lumière dans une fibre optique. Des atomes froids de césium sont piégés au voisinage d'une fibre optique qui a été étirée dans une région de quelques centimètres. En arrivant dans cette zone, la lumière guidée est ralentie et l'information qu'elle porte est transférée aux atomes. Plus tard, à la demande, la lumière est réémise dans la fibre et peut se propager vers un nouveau nœud du réseau.

Depuis plusieurs années, les physiciens parviennent à ralentir très fortement la lumière, et même à la stopper complètement pour enregistrer l'information qu'elle porte. Ces mémoires optiques reposent sur une interaction contrôlée entre un faisceau lumineux et des atomes. La mise en œuvre nécessite des montages optiques complexes à base de miroirs, lentilles et autres éléments optiques qui se prêtent mal à des systèmes complexes de communication. Pour la première fois, des chercheurs du laboratoire Kastler Brossel à l'université Pierre et Marie Curie (UPMC/CNRS/ENS/CdF) viennent de réaliser une telle mémoire directement intégrée dans une fibre optique, un composant au cœur de nos réseaux de télécommunications. Ce dispositif est un nouvel ingrédient pour le développement d'un futur réseau de communication quantique dans lequel l'information pourra être transportée et synchronisée entre plusieurs nœuds distants. Pour réaliser ce dispositif, les chercheurs ont utilisé une fibre optique commerciale qu'ils ont chauffée et étirée sur quelques centimètres, jusqu'à obtenir une nanofibre avec un diamètre de 400 nanomètres, plus

petit que la longueur d'onde de la lumière. Ils ont ensuite refroidi par laser des atomes de césium et superposé le nuage ainsi obtenu avec cette zone étirée. Lorsque la lumière atteint cette région, une grande partie de l'énergie circule autour de la fibre – on parle d'onde évanescente et elle peut alors interagir avec les atomes environnants. En utilisant la technique dite de transparence induite électromagnétiquement qui permet de contrôler les propriétés du milieu atomique par un laser additionnel, les chercheurs ont ralenti la lumière par un facteur 3000 puis l'ont arrêtée complètement. Cette méthode est connue en espace libre mais est combinée pour la première fois avec une fibre optique.

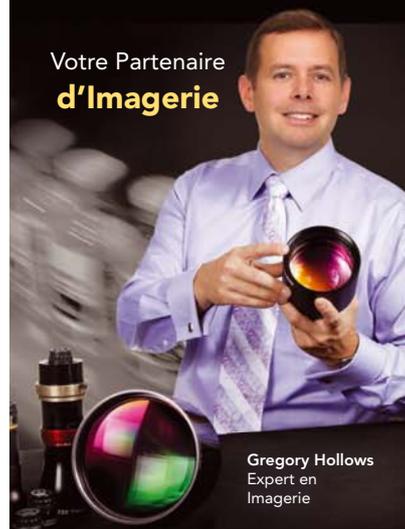
L'information portée par la lumière est transférée aux atomes sous la forme d'une excitation collective, une large superposition quantique. Les quelque 2000 atomes impliqués dans le processus peuvent ensuite émettre de nouveau la lumière après un temps de mémoire programmable pouvant atteindre cinq microsecondes. La lumière reprend alors son chemin et ressuscite ainsi l'information initiale. Sans cet arrêt imposé, la lumière aurait parcouru dans le même temps plus d'un kilomètre ! Les physiciens ont également montré que des impulsions lumineuses contenant un seul photon pouvaient être stockées et relues avec un large rapport signal sur bruit, un ingrédient central pour l'utilisation de ce système comme mémoire quantique pour des réseaux à grande distance. Dans cette réalisation fibrée, 10 % du signal est relu, une performance prometteuse déjà proche des valeurs obtenues en espace libre.

Référence

B. Gouraud, D. Maxein, A. Nicolas, O. Morin, J. Laurat, Demonstration of a memory for tightly guided light in an optical nanofiber, *Physical Review Letters* **114**, 180503 (2015).

UN SAVOIR-FAIRE À VOTRE SERVICE

Votre Partenaire d'Imagerie



Nouveaux Produits :



Objectifs à Large Champ – Faible Distorsion



Objectifs Compacts VIS-NIR TECHSPEC® à Focale Fixe



Objectif Télécentrique TECHSPEC® à Grossissement Variable



TECHSPEC® Objectifs d'Imagerie µ-VIDÉO™ Mégapixels Conjugués Infinis

Contactez-nous dès aujourd'hui !

EO Edmund optics | worldwide

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

www.edmundoptics.fr/eo-imaging



■ Année de la lumière en France : un premier bilan

Agnès Henri,
Agnes.Henri@edpsciences.org
 Rania Haidar,
rania.hajjar@institutoptique.fr

Déjà neuf mois que l'année de la lumière bat son plein, et il est donc temps de faire un premier bilan ! Après l'inauguration du 8 janvier à la Sorbonne dans laquelle toutes les palettes de la lumière ont été évoquées (de la physique à la médecine, en passant par l'art), plusieurs centaines de manifestations ont été (ou vont être) organisées en France.

Ainsi, 426 événements exactement ont été labellisés, et toutes les régions de France, de l'Île-de-France (avec 122 manifestations) à la région Rhône-Alpes (67 manifestations) en passant par la Bretagne (29 manifestation) ou l'Aquitaine (27 manifestation), se sont largement impliquées. Des manifestations pour tous et sur toutes les thématiques, dont il est impossible ici de décrire toute la richesse. Pour en citer seulement quelques-unes : la magnifique exposition qui a eu lieu à la Cité des Sciences et de l'Industrie, « 2015 : l'odyssée de la lumière » ou encore l'exposition « Keith Sonnier : Light Works » qui a lieu en ce moment même au Mamac de Nice jusqu'en novembre, le congrès de la SFO consacré à cette thématique, les événements organisés par le CNAM ou l'université Denis Diderot, etc. : n'hésitez pas à vous plonger dans le site www.lumiere2015.fr qui les répertorie tous.

Dans les publications aussi, la lumière a fait l'objet de nombreux numéros thématiques que nous vous invitons à consulter : celui de Photoniques bien sûr, mais également La Recherche, l'Actualité chimique, ou les Reflets de la physique.

De belles expositions sont encore à venir, comme ce que propose la Région Franche-Comté, avec une myriade d'événements (un village des sciences, une exposition d'hologrammes entre autres) ou encore la fête des lumières à Lyon.

Enfin, octobre, c'est le moment de la fête de la science, et bien évidemment, la lumière en sera un thème central ! Voici donc une sélection de quelques événements phares qui auront lieu à cette occasion.

Bordeaux	Couleurs de la nature !	Comment l'Homme perçoit-il ces couleurs ? Les animaux ont-ils les mêmes perceptions que nous ? Avec le « Muséum chez vous », découvrez les mystères d'un monde en couleurs.
Bordeaux	Jouer avec son ombre, jouer avec la lumière !	À travers les animations proposées à la ludothèque des Berges du Lac, chacun expérimentera à sa façon les phénomènes d'ombres et de lumières.
Chooz	Fête de la Science à la centrale de Chooz !	La centrale de Chooz proposera une visite des installations ainsi que des animations pédagogiques pour petits et grands : Planète Sciences sera présent au Centre d'Information du Public pour une animation autour de la lumière.
Paris	À la découverte des sciences et des métiers scientifiques à l'ETSL	Venez participer aux ateliers découverte de l'ETSL pour découvrir que les filières scientifiques recouvrent de nombreux domaines : santé, lumière, couleur, matériaux.
Montreuil	La lumière, visible et invisible ?	Les bibliothèques de Montreuil vous accueillent pour un circuit d'expériences sur la lumière qui vous sera proposé par l'association Icare dans les 4 bibliothèques (ateliers pratiques pour les 6-12 ans)
Bohain en Vermandois	La lumière dans la peinture de Matisse	Henri Matisse est le peintre de la couleur et de la lumière par excellence... à travers ses tableaux, redécouvrons le pouvoir de la palette du peintre, qui capture les nuances les plus subtiles !
Amiens	Éclairage artificiel - la LED dans tous ses états !	2015 - Année de la Lumière. Ce thème va nous permettre de vous faire découvrir tous les dispositifs pédagogiques que nous utilisons pour étudier la lumière artificielle obtenue grâce aux différents types de lampes. En effet, depuis 2012 la filière BAC STI2D et son approfondissement énergie et environnement, dispose de dispositifs dédiés à l'étude technologique des lampes et les élèves travaillent sur des projets qui ont permis la réalisation de maquettes didactiques et innovantes.
Bellegarde sur Valserine	Balade crépusculaire sur les hauteurs, entre lumières du ciel et de la ville !	La nuit tous les chats sont gris ? Pas si sûr ! Venez apprécier les lumières particulières du crépuscule : cette balade nous fera monter en direction du Crêt de la Goutte, et nous surprendrons peut-être quelques animaux nocturnes. Et quand la lumière du jour aura fait place à celle des étoiles, nous observerons le scintillement de la vallée. Mais quel impact cela peut-il bien avoir ? Nous en discuterons autour d'un thé bien chaud, avant de redescendre doucement de notre alpage.
Grenoble	Ouverture Lumière !	Deux jours de fête pour lancer la Biennale Arts-Sciences, l'Année de la lumière et la Fête de la science... Spectacle, exposition, ateliers, parcours. Sous l'impulsion de Grenoble-Alpes Métropole, des citoyens chercheurs, artistes, ingénieurs, étudiants, techniciens de l'agglomération s'associent pour célébrer l'esprit créatif, le partage des savoirs, l'imagination d'un territoire qui allie richesse artistique cosmopolite, recherche scientifique connectée au monde et innovation sociale permanente.
Besançon	Le temps fort LUX !	Expériences scientifiques, spectacles, installations, concerts et conférences, visites guidées, balade lumineuse... Quatre jours dédiés au partage des savoirs et à la convivialité, sur le site des Prés de Vaux à Besançon.
Lyon	Lugdunum la ville lumière. La lumière dans l'Antiquité romaine	Les collégiens sont invités à faire la lecture du temps au travers du cycle des saisons, le calendrier lunaire et solaire, les astres, la lecture des heures grâce à l'horologium, les divinités Apollon et Diane, les festivités liées à la lumière et la lumière domestique... Puis, en participant à un atelier sur la fabrication d'une lampe à huile, ils découvriront comment on s'éclairait à l'époque romaine. Niveau : Cycle 3 collège 6 ^e et 5 ^e .

L'optique photonique au Canada

Trois ans après notre dernière excursion au Québec (*Photoniques* n°61, septembre-octobre 2012), notre nouvelle enquête permet de constater que le dynamisme de l'optique photonique canadienne ne se dément pas. L'innovation y est foisonnante, spécialement dans les secteurs applicatifs, et rencontre un franc succès à l'export. Les structures de transfert technologique, nombreuses, jouent leur rôle à plein, stimulées par les mesures de soutien déployées par les pouvoirs publics.



Le Québec, terre d'innovations

Au Québec, l'université Laval a reçu mi-2015, une subvention de 98 millions de \$ can. pour mener le projet Sentinelle Nord, dans le cadre du programme fédéral Apogée Canada qui octroiera 350 millions de \$ can. à la recherche sur sept ans. Sentinelle Nord doit permettre de tracer en temps réel la cartographie de l'écosystème et des géosystèmes arctiques, subarctiques et nordiques, grâce à une instrumentation novatrice basée sur l'optique photonique et la neurophotonique. L'initiative doit consolider la position du Canada en tant que chef de file de la recherche sur l'Arctique.

Autre acteur majeur de la R&D, l'Institut national d'optique (INO) basé à Québec, compte près de 200 collaborateurs, dont environ 80 chercheurs. Centre de recherche et de transfert, il propose aux entreprises et

selon une étude commanditée par le consortium photonique canadien en 2012, on dénombre au Canada environ 400 entreprises impliquées de près ou de loin dans l'optique photonique, dont la moitié peuvent être assimilées à des PME, avec moins de 50 collaborateurs et moins de 10 millions de \$ canadiens de chiffre d'affaires. Toujours selon cette étude, l'optique photonique générerait au Canada un chiffre d'affaires annuel de 6 milliards de \$ can., soit un peu plus de 0,4 % du PIB.

Rassemblant chercheurs universitaires et partenaires des secteurs public et industriel, le consortium photonique de l'industrie canadienne, Photons Canada, a naturellement pour mission de soutenir le développement des entreprises du secteur, et de favoriser le transfert technologique. Également dénommé Consortium photonique de l'industrie canadienne (CIPC), Photons Canada est né de la fusion, en 2012, des organisations en place jusqu'alors - CIPI (Institut canadien pour les innovations en photonique) et CPC (Consortium photonique du Canada).

Au plan des regroupements régionaux, après la disparition de l'Ontario Photonics Industry Network et du cluster photonique d'Ottawa, seul le Québec est désormais doté d'un pôle régional : le Cluster réseau photonique du Québec, qui regroupe une cinquantaine d'entreprises et instituts de recherche.

industriels des services de consulting, conception, développement de systèmes et de procédés, prototypage, préproduction et production de courtes séries. Le centre traite en moyenne 120 projets par an, dont deux tiers en R&D, et un tiers en production. Nombre de ces projets se traduisent par la réalisation de transferts technologiques ou par la création de spin offs, au Québec et au-delà : citons notamment CorActive (fibres et lasers), FISO Technologies (capteurs fibre optique), handyem (cytomètre compact), Instruments Régent (analyses pour la sylviculture), LeddarTech (détection et mesure de distance par LED), Neoptix (capteurs thermiques à fibre optique), Obzerv (caméras à vision nocturne), OpSens (capteurs à fibre), TeraXion (composants optiques), Optiwave (logiciel de conception), P&P Optica (spectromètres), ces deux dernières étant basées en Ontario. L'INO vient d'annoncer sa 30^e spin off : RaySecur, qui propose un appareil basé sur une technologie térahertz, capable de détecter les lettres piégées avec des poudres ou liquides.

Également actif dans le transfert technologique québécois, le C2MI (Centre de Collaboration MiQro Innovation), vient de recevoir de l'État canadien une subvention de 8 million de \$ can. sur 5 ans pour appuyer les entreprises canadiennes dans le développement de leurs systèmes électroniques. Dans l'actualité récente du centre, signalons le projet « imagerie infrarouge » en partenariat

avec Teledyne-Dalsa, l'université de Sherbrooke et l'École polytechnique de Montréal, destiné à créer une nouvelle famille de capteurs IR adressant des marchés commerciaux ; ou encore la collaboration avec l'université du Québec à Montréal et Aeponyx, sur les circuits optiques-mécaniques pour les réseaux de télécommunications.

Les avancées dans les applications biomédicales pour leur part, sont tirées par le consortium de recherche et d'innovation en technologies médicales du Québec – MEDTEQ, lancé en 2013 et qui regroupe plus de 60 membres représentant les grandes entreprises et PME du secteur, les établissements publics de recherche et les 5 CHU du Québec, avec pour but d'accélérer le développement de technologies innovantes destinées aux cliniciens et aux patients.

L'Ontario, tout aussi en pointe

Bien que dépourvu de cluster régional, l'Ontario, où se concentre une part essentielle de l'activité économique canadienne, s'appuie sur des entreprises dynamiques, que ce soit dans les télécommunications, la bio-photonique, l'imagerie (avec notamment Ciena, Teledyne-Dalsa, ou les centres de R&D de Huawei et Infinera), ou encore le photovoltaïque, ainsi que sur des instituts de recherche tels que l'université d'Ottawa – qui a annoncé en mai dernier l'ouverture d'un centre d'expertise en photonique quantique et extrême en partenariat avec la Société Max Planck.

L'Impact Centre de l'université de Toronto, dédié à l'innovation et au transfert technologique, a vu naître de nombreuses spin offs en optique photonique – Attodyne (lasers picoseconde), Interaptix (réalité augmentée), Axela Biosystems (diagnostic médical), Lumentra (éclairage LED), Opalux (lutte anti-contrefaçon)...

La région peut aussi compter sur le Centre canadien de fabrication de dispositifs photoniques implanté à Ottawa, guichet unique de services d'ingénierie et de fabrication.

La bio-photonique est aussi particulièrement dynamique, avec de nombreux transferts de technologie réalisés dans le cadre du University Health Network, pour le développement d'appareils destinés aux applications médicales.

R&D : des subventions et une fiscalité favorable

La raison du dynamisme de l'innovation, est en partie à rechercher du côté du soutien dont elle bénéficie de la part des pouvoirs publics – État canadien ou régions, Québec en particulier – avec différents programmes incitatifs.

Le réseau « Accélération de l'amélioration des processus de fabrication » (AAPF) a par exemple reçu en 2014 une subvention fédérale de 7,7 millions de \$ can. L'AAPF regroupe des universités, des organismes de recherche et des entreprises dans le cadre de projets de R&D visant à faire progresser les techniques de fabrication en électronique. Plusieurs acteurs de l'optique photonique figurent parmi les partenaires : Tornado Special Systems, TeraXion, Cisco Systems, Celestica ou encore Honeywell.

Le programme fédéral de crédit d'impôt à la recherche scientifique et au développement expérimental définit une fiscalité favorable à la R&D, y compris pour les projets confiés à des instituts de recherche ; il est susceptible de concerner toutes les entreprises

du secteur. Ce programme est complété au Québec par un dispositif similaire et cumulable – toutes les régions ne déployant pas hélas un tel effort. Crédits d'impôts et déductions fiscales fédérale et québécoise cumulés, ce dispositif permettrait, selon l'INO, de diviser par 2 le coût final d'un projet de R&D éligible aux taux de déduction les plus importants.

Le soutien aux entreprises prend aussi la forme d'aides remboursables. Par exemple la société handyem, qui conçoit et fabrique une plate-forme d'analyse d'échantillons biologiques basée sur une technologie de microfluidique par fibre optique, vient de se voir octroyer par l'Agence de développement économique du Canada pour les régions du Québec une aide de 150 000 \$ can. qui l'aidera à commercialiser ses produits, notamment à l'export.

Une offre appréciée à l'export

L'optique photonique canadienne dans son ensemble, se révèle particulièrement dynamique à l'export. Le chiffre d'affaires domestique ne représenterait, selon le consortium photonique canadien, que 25 % du chiffre d'affaires global des entreprises : celles-ci réaliseraient une part majeure de leur CA à l'export, avec les États-Unis (32 % du CA global), suivis de l'Europe et de l'Asie, où une percée sur le marché chinois est constatée depuis environ 5 ans.

Confirmant le développement de la collaboration avec la Chine, l'INO a signé un partenariat avec Nanopolis Suzhou/STINI, plaque tournante mondiale de l'Industrie de la nanotechnologie et des MEMS (microsystèmes électromécaniques), qui lui permettra d'accéder à MEMSRIGHT, une installation dédiée à la fabrication en courtes et moyennes séries.

On notera la part importante à l'export, des produits destinés aux marchés des sciences de la vie et de la santé. Ainsi Opsens commercialise d'ores et déjà aux États-Unis, au Japon et en Europe ses appareils de diagnostic des maladies coronariennes employant un capteur de pression à fibre optique ; des hôpitaux belge (Centre de cardiologie d'Alost) et néerlandais (Catharina Hospital, Eindhoven) font déjà partie des utilisateurs.

AUG Signals a pour sa part conclu un partenariat avec l'université de Pékin, pour implanter en Chine sa technologie de mesure de pollution de l'air, et signé avec la ville de Lanzhou pour la fourniture de son système de mesure de pollution de l'eau. La société est également partenaire de l'allemand Remote Sensing Solutions pour le développement d'un radar de mesure de la biomasse forestière, sous l'égide de l'agence spatiale canadienne et du centre aérospatial allemand.

Les solutions d'imagerie thermique développées par les services canadiens de R&D de Thales Optronique, ont récemment été adoptées par les armées de 7 pays, pour un total de 40 M\$; les appareils seront fabriqués dans l'usine de Montréal.

Dans le domaine de la mesure tridimensionnelle, citons Creaform, filiale de Ametek, qui a récemment ouvert un bureau aux États-Unis ainsi qu'une filiale en Corée du Sud. La société a conclu en 2012 un partenariat avec EADS pour le développement d'applications destinées à l'aéronautique, au spatial et à la défense. Elle est également présente en Allemagne, en Chine, en Inde, au Japon et en France avec un centre d'innovation situé à Grenoble.

Autre entreprise canadienne implantée en France : Telops, spécialisée dans les caméras infrarouge et l'imagerie hyperspectrale pour la défense et la sécurité, qui a ouvert une filiale en 2014.

La collaboration France/Canada

Des collaborations étroites ont vu le jour avec les centres de recherche français, à l'instar du partenariat entre Photon etc et l'IRDEP – Institut de Recherche et Développement sur l'Énergie Photovoltaïque – pour le développement d'une plate-forme d'imagerie hyperspectrale pour l'analyse des cellules photovoltaïques.

RDDC (Recherche et Développement pour la Défense Canada) et Transports Canada ont collaboré avec l'Onera, dans le cadre du projet Polluproof financé par l'ANR, visant à consolider les preuves de pollution maritime chimique par moyens aéroportés radars et optiques. Des essais ont été réalisés, fin 2014, dans le bassin du Cedre, afin d'évaluer la capacité de 5 capteurs optiques à détecter des polluants chimiques et pétroliers.

En attendant de nouvelles collaborations transfrontières telles que les encouragent nos deux pays (voir par exemple le site Internet du Consulat de France au Québec), souhaitons à nos collègues canadiens, de pouvoir continuer à s'appuyer sur le soutien des pouvoirs publics ; et de voir aboutir leurs efforts de fédération : des discussions ont récemment été initiées pour parvenir sur le sol canadien, à une organisation similaire à ce qu'a accompli Photonics21 en Europe.

Vincent COLPIN

Sur www.photoniques.com

Retrouvez les liens vers 130 entreprises canadiennes au cœur du domaine, à l'adresse : www.photoniques.com/component/content/article/88-actualites/societes/2755-canada

Pour en savoir plus

Consortium Photons Canada : <http://photonscanada.ca>

Cluster réseau photonique du Québec : www.photoniquequebec.ca

Institut national d'optique : www.ino.ca

C2MI - Centre de Collaboration MiQro Innovation : www.c2mi.ca

Université Laval - Centre d'optique, photonique et laser : www.copl.ulaval.ca

Institut Max Planck à l'université d'Ottawa :

<http://recherche.uottawa.ca/centres-instituts/centre-max-planck>

Développement économique Canada pour les régions du Québec : www.dec-ced.gc.ca

Impact Centre de Toronto : www.impactcentre.ca

Centre canadien de fabrication de dispositifs photoniques : www.nrc-cnrc.gc.ca/fra/solutions/installations/prototype_index.html

University Health Network :

<http://tdc.uhnresearch.ca/>, http://tdc.uhnresearch.ca/partnering-opportunities/?type=devices_and_software

MEDTEQ : <http://medteq.ca>

Consulat de France au Québec : www.consulfrance-quebec.org

FAST BUT SERIOUS

La nouvelle USB 3 uEye CP -
Incroyablement rapide,
incroyablement fiable,
des capteurs incroyables



Plus d'informations sur la caméra
USB 3 uEye CP de nouvelle génération :
www.ids-imaging.fr/usb3

IDS
www.ids-imaging.fr

gentec-EO



À propos de Gentec-EO



Située en plein cœur de la Cité de l'optique de la superbe ville de Québec, Gentec Electro-Optique (Gentec-EO) met à votre disposition et à votre service plus de 40 ans d'innovation et de solutions de qualité pour les applications de mesure de puissance et d'énergie laser.

Qualité et innovation, un engagement au quotidien

Gentec-EO s'engage à vous fournir les meilleures solutions de mesure possibles, étalonnées par l'institut NIST. Bien sûr, nous améliorons en permanence la technologie de nos détecteurs afin de suivre au plus près l'évolution de la performance de vos lasers. Nous sommes également reconnus comme le tout premier fournisseur mondial de calorimètres à large ouverture utilisés dans la mesure des énergies pulsées les plus hautes.

Une forte présence en europe

Les clients de nombreux pays européens sont maintenant desservis par notre partenaire exclusif *Laser Components*, une collaboration qui a débuté en 2003 et n'a cessé de grandir depuis. Outre la France, le partenariat s'étend maintenant sur les territoires de l'Allemagne, de l'Autriche, du Danemark, de la Finlande, de la Norvège et de la Suède.

Un centre de calibration local

Depuis 2004, *Laser Components GmbH* dispose d'installations de calibration dédiées à nos produits. Ces dernières respectent en tout point nos hauts standards de rigueur et fournissent à nos clients les mêmes avantages qu'une calibration usine, soit une traçabilité au NIST et la table de correspondance en longueur d'onde (PWC). Forte du succès de ses nouvelles installations, *Laser Components GmbH* a récemment ajouté la calibration des énergie-mètres afin de compléter son offre. Avec ce centre de calibration complet situé en zone Europe, nos clients bénéficient maintenant de délais de calibration et de coûts de livraison réduits.

Un partenariat orienté vers l'avenir

Les succès rencontrés dans ces nombreux pays nous ont incités à renforcer notre partenariat avec *Laser Components* : désormais nous couvrons également les territoires de la République Tchèque, de la Hongrie et de la Roumanie. Représentée en France par :

Contact
LASER COMPONENTS S.A.S
 45 bis Route des Gardes, 92190 Meudon
 Tél. : 01 39 59 52 25, Fax : 01 39 59 53 50
info@lasercomponents.fr www.lasercomponents.fr

Institut national d'optique

Fondé en 1988, l'Institut national d'optique (INO) est basé à Québec et développe des solutions optiques et photoniques sur mesure pour ses clients. Pionnier dans le domaine de l'optique, l'INO détient à ce jour plus de 200 brevets, a réalisé 60 transferts technologiques et a essaimé 30 entreprises de haute technologie.

Caméra térahertz : voir à travers la matière

L'INO a mis au point l'IRXCAM-384-THz, un module de caméra térahertz haute sensibilité, optimisé pour les longueurs d'ondes allant de 70 à 3189 μm (4.25 – 0.094 THz). La caméra comprend un détecteur microbolométrique non refroidi de 384 x 288 pixels ayant un pas de 35 μm , offrant ainsi une très haute qualité d'image. Le module de caméra produit un signal brut de 16 bits ainsi que des images finales de 8 bits, à une fréquence de 48 Hz, par l'intermédiaire d'un lien gigabit ethernet. Ses dimensions compactes et son poids plume permettent de la transporter facilement. Elle est opérationnelle entre -10°C et $+50^\circ\text{C}$.

La lentille est faite de HRFZ-Si (*high resistivity float zone silicon*), qui couvre la totalité de la bande térahertz, et elle est recouverte d'une couche antireflet en parylène C qui permet une transmission accrue. Avec une longueur focale de 44 mm, cette optique rapide présente un nombre d'ouverture (ou F/#) de 0,7.

Tous les paramètres du détecteur peuvent être configurés, ce qui garantit une liberté maximale de configuration pour le développement d'applications par l'utilisateur.



De multiples applications

La technologie térahertz est idéale pour la recherche de menaces dissimulées sous des vêtements ou encore l'inspection de colis. Grâce à sa capacité intrinsèque à voir à travers les objets, elle est aussi efficace pour assurer un contrôle qualité rigoureux via un contrôle non destructif. Elle ouvre enfin des perspectives dans les domaines des applications multispectrales et de l'astronomie submillimétrique.

Contact
INO
 Pierre TALBOT
 Tél. : +001 418 657 7006
info@ino.ca www.ino.ca

OPTTECH

La recherche appliquée en optique, catalyseur de compétitivité des entreprises

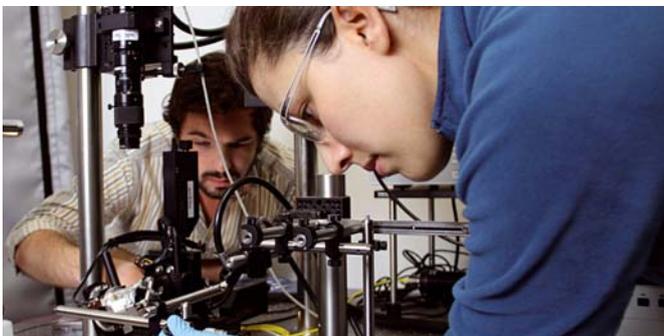
À la recherche d'un point d'entrée sur les marchés nord-américains ?

Opttech est un centre canadien de recherche appliquée et de transfert technologique en optique-photonique, spécialisé en fibres optiques et capteurs fibrés, en imagerie et illumination, en métrologie et en microsystèmes.

Notre mission est de dynamiser l'économie technologique québécoise et canadienne en aidant les entreprises à intégrer les technologies de l'optique-photonique dans leurs procédés et dans leurs produits. Que ce soit dans des domaines aussi variés que l'aéronautique, l'environnement, l'architecture ou les arts de la scène, nous mobilisons nos experts ainsi que plusieurs programmes de subventions et de crédits d'impôt.

Nos projets de développement sont systématiquement structurés en collaboration avec des entreprises privées. Nous définissons nos projets afin de répondre aux besoins et défis liés au développement de produits et de procédés afin de favoriser le transfert technologique en entreprise.

Nous recherchons des entreprises intéressées à structurer des partenariats. Ce partenariat donnerait accès à notre expertise et notre réseau afin d'augmenter votre potentiel de développement technique sur les marchés nord-américains.



Nous mobilisons entreprises et chercheurs en optique autour de l'innovation et de la compétitivité.

Contact
OPTTECH
 Maroun MASSABKI
 Tél. : (514) 364-3325 poste 6851
 Maroun.Massabki@cctt-optech.ca www.cctt-optech.ca

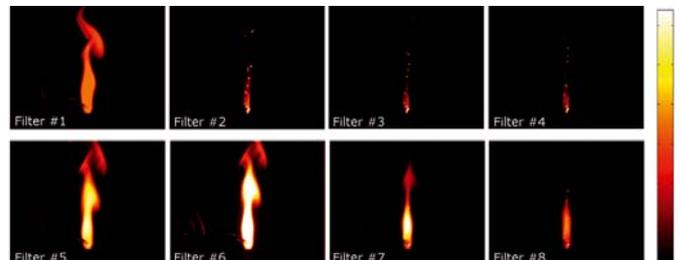


Établie dans la ville de Québec, au Canada, depuis 2000, **Telops** se spécialise dans la conception et la production de systèmes optoélectroniques pour les industries de la défense, de l'environnement et de la recherche industrielle. Telops offre une large gamme de produits spécialisés dans le domaine de l'imagerie infrarouge.



Parmi ceux-ci, on retrouve l'**Hyper-Cam**, une solution de pointe dans le domaine de l'imagerie infrarouge thermique hyperspectrale. La haute résolution spectrale que procure cet instrument permet la détection, l'identification ainsi que la quantification de nombreuses substances sur de grandes distances.

De plus, Telops a développé une série de caméras infrarouge haute performance dont la **FAST-IR**, la caméra procurant la plus rapide fréquence d'image disponible sur le marché.



Tout récemment, Telops a mis sur le marché la série **MS-IR**, une famille de caméras infrarouge multispectrales. Ces caméras sont munies d'une roue à filtres à haute révolution permettant l'acquisition en mode dynamique sur 8 bandes spectrales. Ainsi, l'obtention d'information spectrale est accomplie tout en maintenant d'excellentes performances sur le plan de la résolution spatiale et temporelle. Ce type de renseignement est crucial en présence d'espèces chimiques dont la réponse infrarouge dépend de la longueur d'onde. Ceci confère notamment une certaine sélectivité à l'utilisateur, un net avantage pour bon nombre d'applications, dont l'étude de combustions et l'acquisition de signatures infrarouge. Les caméras de la série **MS-IR** de **Telops** allient performances et fiabilité, les plaçant parmi les caméras scientifiques les plus avancées disponibles sur le marché.

Contact
TELOPS
 100 - 2600, avenue St-Jean-Baptiste
 Québec (Québec) Canada G2E 6J5
 Tél. : +1 (418) 864-7808, Fax : +1 (418) 864-7843
 www.telops.com



Principales dates

5 mars 1794 – Naissance à Lusignan, France	
1820	Professeur de physique au collège Saint-Louis, Paris
1827	Énonce le Principe de Babinet
1831	Examineur à l'École polytechnique
1840	Membre de l'Académie des Sciences
1854	Astronome-adjoint au Bureau des Longitudes
21 octobre 1872 – Décès à Paris, France	

Jacques Babinet

Riad Haidar, haidar@onera.fr

Mathématicien, physicien et astronome français, vulgarisateur talentueux, Jacques Babinet est surtout connu pour le principe d'optique qui porte son nom (selon lequel la forme d'une figure de diffraction est la même, en dehors de l'image géométrique, si elle est créée par un corps opaque ou par son « conjugué » obtenu en perçant une plaque aux emplacements où se situe ce corps). On lui doit plusieurs inventions ou perfectionnements d'instruments scientifiques, dont un polariscope, un goniomètre à collimateur pour la mesure des indices de réfraction, ainsi qu'un hygromètre... En cartographie, il a inventé le système de projection homalographique, qui conserve le rapport réel des surfaces.

Jacques Babinet naît à Lusignan, dans la Vienne, le 5 mars 1794. Sa mère, Marie, est la fille du lieutenant-général Bonneau du Chesne, maire perpétuel de Lusignan. Son père, Jean Babinet, est Conseiller au présidial de Poitiers, comme son propre père avant lui ; plus tard, il deviendra propriétaire du château du Murault, et occupera la charge de maire de Lusignan de 1812 à 1828.

Après de bonnes études littéraires au lycée de Poitiers, complétées par une année au lycée impérial Napoléon à Paris, Jacques entre en 1812 à l'École polytechnique. Onze mois après, il est envoyé à l'École d'application de Metz. Il prend part en 1814, comme lieutenant au 5^e régiment d'artillerie à pied, à la défense de la ville face aux Alliés (troupes coalisées de la Russie, de la Prusse, du Royaume-Uni, de la Suède, de l'Autriche et de plusieurs États allemands). Rappelons que 1814 est l'année de la Campagne de France, qui s'achève sur l'abdication de Napoléon.

Activités d'enseignement

L'année suivante, le gouvernement de la Restauration décide de réduire l'effectif des armées ; Babinet abandonne alors la carrière militaire pour se vouer à l'enseignement. En 1816, il est régent en mathématiques au lycée de Fontenay-le-Comte en Vendée et publie, à tout juste 22 ans, son premier mémoire dans les Annales de Physique et de Chimie, intitulé *Analyse mathématique sur les moyens de rendre sensible l'attraction solaire et lunaire par les variations du volume d'une masse de gaz soumise à une pression*

ne variant qu'avec la pesanteur. L'année suivante, après avoir obtenu le diplôme de bachelier es sciences sur son seul titre d'ancien élève de l'École polytechnique, il passe avec succès son examen de bachelier es lettres. Fort de ces grades académiques, il est nommé professeur de physique au Lycée de Poitiers.

En 1820, il devient professeur de physique au collège Saint-Louis, qui vient d'être fondé à Paris, et épouse Adélaïde Laugier, la fille d'André Laugier, professeur et administrateur du Muséum d'histoire naturelle – union dont naîtront deux fils, Charles et Léon. Il s'installe donc à Paris et côtoie les grands physiciens français de l'époque, parmi lesquels Fresnel, Arago ou Ampère. En 1822, il fait paraître avec Ampère un *Exposé des nouvelles découvertes sur l'électricité et le magnétisme*. En 1828, il succède à Fresnel au sein de la Société philomathique de Paris.

En 1831, Babinet entre dans le corps enseignant de l'École polytechnique comme examinateur, poste qu'il conservera plus de trente ans, successivement pour la géométrie descriptive, la physique et les sciences appliquées. À ce propos, l'un de ses élèves rapportera qu'« il n'examinait pas comme tout le monde et s'attachait moins à constater si l'élève avait retenu plus ou moins fidèlement ses cours qu'à reconnaître si cette jeune intelligence saurait un jour tirer parti de l'instrument qu'on lui avait mis entre les mains, quand l'usage lui en aurait facilité le maniement » [1]. Fort de son expérience d'enseignant, Babinet publie en 1851, sur la demande de l'éditeur Hachette, un *Traité élémentaire de géométrie descriptive* qui fera longtemps partie des livres de préparation au concours d'entrée à l'École polytechnique.

Travaux scientifiques

On doit à Babinet de nombreux travaux originaux sur l'optique et sur les phénomènes météorologiques. Sa carrière se distingue particulièrement par les nouveautés qu'il introduit dans le domaine de l'instrumentation scientifique. En 1824, il équipe l'hygromètre de Horace de Saussure, destiné à mesurer l'humidité de l'air, d'un système de lecture par microscope et vis micrométrique qui en améliore sensiblement les performances. En 1827, s'inspirant des travaux de Fraunhofer sur la diffraction de la lumière par les réseaux, il montre que l'observation des franges d'interférence permet d'étalonner les longueurs de façon très précise, suggestion qui mènera plus tard à la définition du mètre à partir de la longueur d'onde d'un rayonnement des atomes de krypton. Il énonce également le principe d'optique qui porte son nom, selon lequel deux écrans d'ouvertures complémentaires produisent la même figure de diffraction.

En 1830, l'Académie royale des sciences le récompense pour un perfectionnement important de la machine pneumatique de Robert Boyle qui permet d'obtenir un vide plus poussé sous une cloche de verre. En 1839, il réalise un nouveau type de goniomètre destiné à mesurer les angles dièdres des cristaux ; portable et maniable, il permet aussi de mesurer la déviation de la lumière par un prisme et sera utilisé vers 1860 par Kirchhoff et Bunsen pour une analyse spectroscopique des corps introduits dans une flamme.

Babinet publie de nombreux mémoires dans les Annales de physique et de chimie, de 1824 à 1841, et dans les Comptes rendus de l'Académie des sciences, de 1837 à 1865. On lui doit également un nouveau système de projection, dit homalographique ou à parallèles rectilignes, dans lequel les cercles parallèles sont représentés par des droites et les méridiens par des ellipses : pour dresser les cartes, ce système permet d'établir une proportionnalité exacte entre des surfaces quelconques de la Terre et les parties correspondantes de sa représentation.

Excellent pédagogue, Babinet supplée Ampère au Collège de France en 1832, et y enseigne l'optique. En 1839 et 1840 il supplée Savart, toujours au Collège de France, puis Pouillet en 1846, cette fois à la Sorbonne, et y dispense les leçons d'acoustique et d'optique. Babinet est élu à l'Académie des Sciences en 1840, où il succède à Dulong, chimiste et physicien français, auteur de travaux sur la dilatation et l'indice de réfraction des gaz. Il en devient l'un des membres les plus assidus, jusqu'à sa mort. En 1854, il est nommé astronome-adjoint au Bureau des Longitudes. Par ailleurs, il entretient pendant 40 ans (de 1829 à 1869), une correspondance suivie avec l'illustre astronome anglais John Herschel.

Ultima verba

Plus encore que par ses qualités d'enseignant, Babinet acquiert une formidable popularité par le talent avec lequel il sait vulgariser la Science. Ses lectures aux solennités annuelles de l'Institut, ses articles insérés dans la Revue des Deux Mondes ou le Journal des Débats, ses cours à l'Athénée et ses conférences publiques à l'École de Médecine, sous les auspices de l'Association polytechnique, sont tous très appréciés du grand public. Possédant une culture littéraire exceptionnelle, doué d'une mémoire prodigieuse, il sait captiver l'attention et rendre agréables les sujets les plus arides par des rapprochements inattendus et de piquantes anecdotes. Il est à Paris en 1870, et subit les privations du siège de la ville, ainsi que les tristes scènes de la Commune. Ces événements lui portent un coup terrible dont il ne parvient pas à se remettre : il rend l'âme le 21 octobre 1872, à Paris.

Pour en savoir plus

- [1] Albert de Rochas, Jacques Babinet, in *Le Livre du Centenaire de l'École polytechnique* (1897).
 [2] Bernard Pire, Jacques Babinet (1794-1872), *Encyclopædia Universalis*.

SPECTROGON

State of the art products

Filtres Interférentiels

De 200 à 15000 nm

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



Réseaux Holographiques

De 150 à 2000 nm

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



UK (parle français): sales.uk@spectrogon.com • Tel +44 1592770000
 Sweden (headquarters): sales.se@spectrogon.com • Tel +46 86382800
 US: sales.us@spectrogon.com • Tel +1 9733311191

www.spectrogon.com

Fibres optiques et développement durable : le FTTO vert

Jean-Michel MUR
jm.mur@orange.fr

Bien que les réseaux en fibres optiques consomment des matières premières et de l'énergie, ils présentent un bilan écologique positif par rapport aux réseaux en cuivre. Un exemple significatif à travers l'application fibre optique jusqu'au poste de travail (*fiber to the office* – FTTO) qui peut se décrire en concept « FTTO vert » ou *green FTTO*.



Figure 1. Différence de dimensions entre un câble en cuivre et un câble en fibres optiques.

Les réseaux en fibres optiques pour les applications des technologies de l'information et de la communication (TIC) sont gourmands en matières premières pour les fibres optiques et les câbles eux-mêmes, mais aussi pour les équipements passifs comme les armoires, coffrets, panneaux de brassage, cordons et jarretières optiques... et les matériels actifs comme les ponts, routeurs, commutateurs, serveurs... sans oublier la kyrielle de terminaux en tous genres tels microordinateurs, tablettes, imprimantes, téléviseurs, etc. Ils sont aussi gourmands en énergie pour fabriquer tout cela, le transporter, l'installer, l'alimenter en courant électrique et même le refroidir dans de nombreux cas tels les centres de données (*data center*). Cependant, par rapport aux réseaux en câbles de cuivre, leur bilan écologique est largement positif. Démonstrations à travers l'application FTTO des réseaux locaux d'entreprise.

Le FTTO est vert

Pour Géraud Danzel d'Aumont, directeur Europe de l'Ouest Nexans ANS : « Par rapport au cuivre, le FTTO est vert à la fabrication, vert à la mise en œuvre, vert dans la gestion et l'entretien, vert dans l'exploitation et vert dans son évolutivité ». Pour appuyer ses dires, il donne des explications complémentaires...

En ce qui concerne la fabrication, le FTTO est vert par rapport au cuivre. En effet, l'extraction du cuivre nécessite des processus très polluants qui, le plus souvent, portent atteinte à l'écosystème de manière irrémédiable. De plus, pour extraire une tonne de cuivre, cette activité est synonyme de 100 à 350 kilogrammes de déchets miniers alors que ce n'est pratiquement rien pour le quartz nécessaire à la fabrication de la fibre optique. C'est le même parallèle pour la consommation d'énergie qui se monte à 700 kWh pour

un kilomètre d'une paire torsadée, c'est-à-dire 28 000 kWh pour chaque tonne de cuivre, alors même qu'il ne faut qu'un seul kilowattheure pour un kilomètre de fibre, c'est-à-dire 1500 kWh pour chaque tonne de verre. Ainsi, l'empreinte carbone de la fibre optique est sans commune mesure avec celle du cuivre. À noter que les coûts de fabrication de la fibre optique ne sont pas tributaires des variations du cours du cuivre.

Pour la mise en œuvre, ce sont les qualités propres à la fibre optique qui créent un différentiel énorme par rapport au cuivre : le poids et les dimensions des câbles à fibres optiques sont nettement plus faibles que ceux en cuivre (cf. figure 1), ce qui veut dire réduction du coût de transport jusqu'au chantier et du coût d'achat des chemins de câbles et goulottes devant supporter les câbles. En un clin d'œil, après l'installation du câblage en fibres optiques, la dépose du câblage cuivre obsolète permet de récupérer des finances en vendant le métal. Quant à l'installation elle-même, la qualité d'insensibilité de la fibre optique aux perturbations électromagnétiques veut dire facilité de pose. Il est inutile de se soucier, d'une part, de la séparation courants forts/fibres optiques qui peuvent partager les mêmes chemins et, d'autre part, des nuisances des divers appareils et moteurs électriques comme les machineries d'ascenseurs. L'usage des cages de ces ascenseurs et monte-charges offre ainsi un cheminement aisé. L'absence de risque d'étincelle et donc d'incendie potentiel facilite le déploiement des réseaux

FTTO vert à la CRAMIF

Les évolutions des applications et des débits, l'arrivée des images animées pour vidéoconférence, vidéoprotection, vidéoformation... ont amené la Caisse régionale d'assurance maladie de l'Île-de-France (CRAMIF) à remplacer l'infrastructure de son réseau local d'entreprise (RLE ou local area network – LAN) en câbles cuivre par un réseau en fibres optiques desservant 4 bâtiments d'une douzaine d'étages chacun, totalisant 45 000 m² de bureaux et plus de 7000 prises RJ45. Au-delà de considérations technico-économiques, deux éléments ont fait pencher la balance vers la fibre optique : (1) la pérennité de l'installation apportée par la largeur de la bande passante qui permettra de suivre la montée des débits sur le même support de transmission – premier geste FTTO vert ; (2) la diminution du nombre de locaux techniques grâce aux distances de transmission plus longues supportées par la fibre optique. C'est ainsi que les 13 locaux techniques qui contenaient les sous-répartiteurs et les baies de brassage du réseau cuivre ont été remplacés par un seul local technique pour la fibre – deuxième geste FTTO vert. Cet unique local technique comprend les équipements de brassage et les deux commutateurs du cœur de réseau. L'architecture se déploie en étoile vers les étages et les microcommutateurs. Tous les mètres carrés économisés ont été réutilisés en centres d'impression-photocopie mis en commun.

locaux en milieu industriel. Cette mise en œuvre, Géraud Danzel d'Aumont la chiffre ainsi : « Le temps d'installation d'un réseau en fibres optiques ne représente que 40 % du temps d'installation d'un même réseau en câbles cuivre ». Enfin, le produit {débit × distance couverte} est sans commune mesure entre la fibre et le cuivre, ce qui veut dire beaucoup moins de locaux techniques répartis dans les étages (cf. encadré).

Du côté de la gestion et de l'entretien de réseaux d'entreprises en fibres optiques, ce nombre plus faible de locaux techniques signifie bien que le FTTO est vert par rapport au cuivre que ce soit en termes d'occupation de surfaces ou de climatisation mais aussi en nombre drastiquement diminué de cordons de brassage et de jarretières et, subséquemment, de moindre déplacement de personnel. En sus, pour sauvegarder les investissements déjà effectués dans les équipements informatiques des employés, il suffit de relier leurs microordinateurs, imprimantes, etc. au réseau en fibres optiques de l'entreprise, via un simple cordon cuivre, à l'aide d'un microcommutateur (cf. figure 2) facilement posé dans les plinthes 45 × 45 ou en boîtier de sol. L'ensemble des microcommutateurs est administrable à distance pour leurs configuration, supervision et gestion et donc, là aussi, sans déplacement de personnel.

Le FTTO est également vert dans son exploitation. Géraud Danzel d'Aumont cite deux exemples : « En gigabit ethernet, les réseaux en cuivre sont sensiblement plus énergivores car proches de 4 watts par port alors que la solution FTTO est de

l'ordre de 2 watts par port. Ce calcul intègre la consommation du commutateur central équipé de ports fibres optiques. Dans l'application 10 gigabit ethernet, compte tenu de l'implantation des locaux et des choix des technologies de câblage alors, sur 130 mètres, la consommation pour faire fonctionner un ordinateur de bureau sera de 63 watts en cuivre et seulement 24 watts en fibre, soit 2,5 fois moins ».

FTTO vert dans son évolutivité

C'est peu dire que le réseau d'entreprise en fibres est vert dans son évolutivité. Il suffit de regarder le passé avec la constante évolution des débits de plus en plus élevés – du tout premier réseau à 1 Mbit/s aux actuels à 10 Gbit/s – et de se projeter quelque peu dans l'avenir. Le passé fut complexe pour ceux qui ne se résolurent pas à franchir le saut technologique vers la fibre. En effet, pour suivre la croissance des débits de leurs réseaux locaux, ils connurent les systèmes de câblage en cuivre successifs de catégorie 3, puis de catégorie 5, puis 5E pour étendu, puis 6 et désormais la catégorie 7, réclamant une expertise certaine pour l'installation et la mise en œuvre, en attendant la catégorie 8 ! À chaque obsolescence de système et changement de catégorie, il fallut tout décâbler et recâbler, investir et réinvestir... alors même que les réseaux en fibres absorbaient aisément les différentes montées en débits.

Pour l'avenir, l'évolutivité des réseaux en fibres tient en deux mots-clés qui font



P O U R
V O I R
P L U S
L O I N
I L F A U T
Ê T R E
P R É C I S



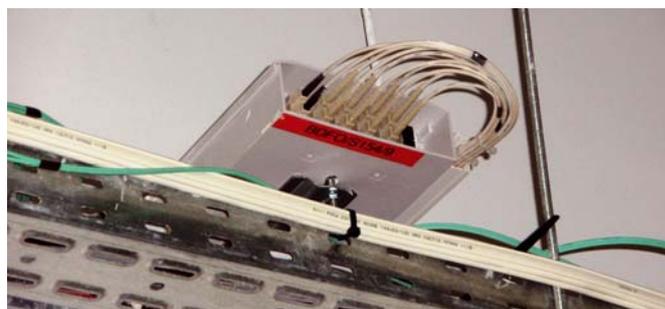
**ANALYSEUR DE
FRONT D'ONDE
MIROIR DÉFORMABLE
OPTIQUE ADAPTATIVE**

*Métrie optique et optique adaptative
pour lasers et microscopie*

www.imagine-optic.com



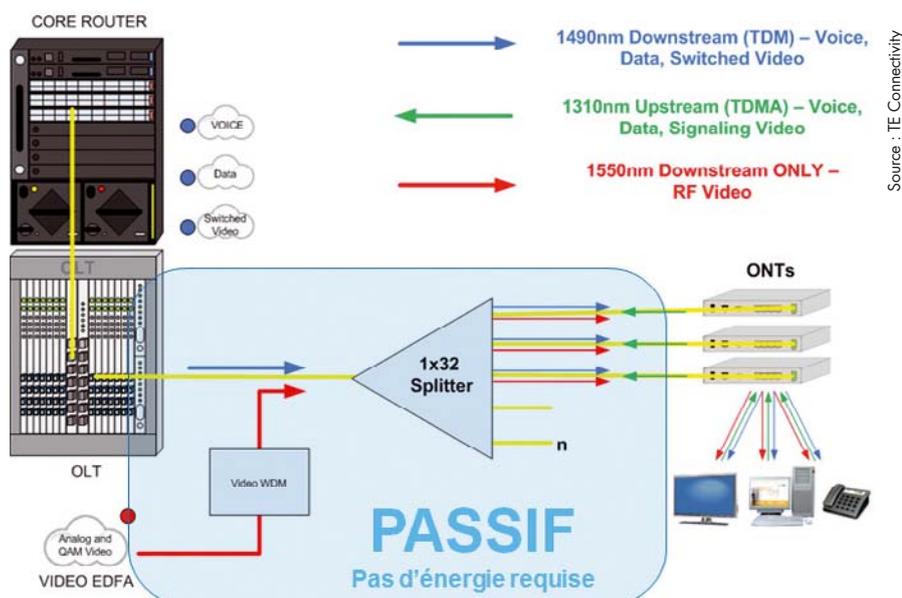
Source : Nexans ANS



Source : J.-M. Mur

Figure 2. Exemple de microcommutateur.

Figure 3. Exemple de boîtier de dérivation.



Source : IE Connectivity

Figure 4. Schéma de base d'un POL.

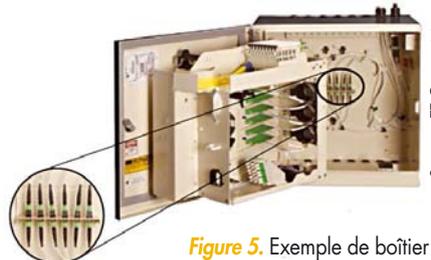
consensus : la bande passante et le multiplexage en longueur d'onde (MLO ou *wavelength division multiplexing* – WDM), ainsi qu'en une évolution nette des architectures, avec les architectures en étoile via des câbles à fibres optiques extractibles, l'architecture en anneaux avec des panneaux optiques et l'architecture POL (*passive optical network on Lan*). La largeur de la bande passante de la fibre optique est telle que cela permet l'installation des réseaux gigabitaires comme le 10 gigabits ethernet (10 GbE) sur des distances plus que suffisantes en réseaux d'entreprise en attendant les 25 GbE et 100 GbE, déjà présents dans les réseaux d'opérateurs. Le multiplexage en longueur d'onde autorise le transport sur la même fibre de services différents à des débits différents pour des utilisateurs différents. Les changements structurels et organisationnels de l'entreprise peuvent ainsi être pris

en compte sans réinstaller de nouvelles fibres optiques.

Quant aux architectures des réseaux, les câbles à fibres optiques extractibles, créés depuis quelques années déjà, sont intéressants en ce sens qu'une fois installés, ils peuvent être « ouverts » et une ou plusieurs fibres peuvent être extraites à l'endroit désiré. La suite de la desserte des postes de travail se fait alors via un boîtier de dérivation (cf. figure 3). Deux avantages pour les tenants de cette architecture : une

grande souplesse pour suivre l'évolution des besoins de l'entreprise et des fibres dédiées à leurs utilisateurs (ainsi, la bande passante n'est pas partagée). Dans le cas de l'architecture en anneaux optiques, ceux-ci sont équipés de points de consolidation actifs (PCA) pour la connexion et la distribution des équipements TIC. Pour les convaincus, cela permettrait une extension du réseau rapide sans travaux supplémentaires. Enfin, l'architecture POL, c'est la technologie des réseaux optiques passifs (*passive optical network* – PON) des opérateurs qui est adaptée aux réseaux locaux d'entreprise (cf. figure 4). L'avantage principal est la suppression des locaux techniques d'étages qui sont remplacés par de simples boîtiers de distribution qui organisent les câbles à fibres optiques et contiennent les coupleurs optiques passifs ne nécessitant pas d'alimentation électrique (cf. figure 5). Cela signifie la réalisation d'économies conséquentes tant en immobilier qu'en équipements passifs et, surtout, en énergie dont la consommation est diminuée de plus de moitié d'après TE Connectivity. Le marché concerne les entreprises étendues avec des bâtiments dispersés de type hôpitaux, universités, ports, etc., celles ayant une forte concentration d'équipements comme les centres d'appels téléphoniques ou des cas plus exotiques tels les « méga navires » de croisière.

En mot de conclusion, Géraud Danzel d'Aumont tient à préciser : « Pour le réseau voix-données-images de votre entreprise, si vous voulez faire un geste pour l'environnement, ne posez plus de câbles en cuivre mais installez des fibres optiques ». Cela facilitera grandement les évolutions vers les applications *fiber to the desk* (FTTD) et *fiber to the screen* (FTTS).



Source : TE Connectivity

Figure 5. Exemple de boîtier de distribution pour POL.

Silicium, couches minces, pérovskites, photonique : de nouvelles avancées de la recherche sur les cellules photovoltaïques

Un bon signe pour la COP 21

Daniel LINCOT^{1,2}, Stéphane COLLIN³, Jacky EVEN⁴, Jean-Paul KLEIDER⁵

¹ Institut de Recherche et Développement sur l'Énergie Photovoltaïque (IRDEP, UMR CNRS-EDF-Chimie Paristech), Chatou

² Institut Photovoltaïque Ile-de-France, Antony

³ Laboratoire de Photonique et Nanostructures (LPN, CNRS), Marcoussis

⁴ Fonctions Optiques pour les Technologies de l'Information (Foton, CNRS), Insa-Rennes, Rennes

⁵ Génie électrique et électronique de Paris (GeePs, UMR CNRS, CentraleSupélec, Univ. Paris Sud, UPMC), Gif-sur-Yvette

daniel.lincot@chimie-paristech.fr

L'objectif de cet article est de faire le point sur la situation actuelle des recherches dans le domaine des cellules photovoltaïques, en mettant l'accent sur l'analyse de la progression récente des rendements. L'augmentation des rendements est un axe stratégique pour rendre la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire toujours plus efficace et favoriser son développement à très grande échelle, afin de répondre aux attentes de la lutte contre le changement climatique, qui fera l'objet de la COP21 dans quelques mois à Paris. Les avancées dans l'ensemble des filières sont présentées (silicium, couches minces CIGS, CdTe) et l'accent est mis sur l'émergence de la filière pérovskite qui bat records sur records et qui pourrait à terme créer une nouvelle rupture en association tandem avec les cellules classiques. De récentes avancées en photonique sont également mises en relief.

La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire est devenue en quelques années une des étoiles montantes des énergies renouvelables. D'une capacité de production installée pratiquement négligeable au niveau mondial en 2000 (environ 1,4 GW), elle est devenue de plus en plus visible avec 40 GW en 2010 et 180 GW en 2014, ce qui représente 1 % de la production électrique mondiale – allant à près de 7 % dans différents pays dont l'Allemagne, l'Italie ou la Grèce. L'agence internationale de l'énergie prévoit que près de 16 % de l'électricité mondiale sera d'origine photovoltaïque en 2050, et sur le plus court terme une capacité installée de 500 GW en 2020 (s'approchant des 100 GW par an) est maintenant considérée par certains analystes. Un des éléments clés de progression de la filière concerne les recherches visant à augmenter le rendement des cellules photovoltaïques, et de ce point de vue les nouvelles sont plutôt bonnes comme

le montre le dernier bilan multifilières des rendements records en laboratoire édité par le National Renewable Energy Laboratory (NREL, USA) en août 2015, qui illustre aussi les progrès, parfois spectaculaires, réalisés ces dernières années (figure 1). On peut noter en particulier les progrès effectués depuis les derniers dossiers photovoltaïques de la revue *Photoniques* publiés en 2013, et surtout en 2009. Le *tableau 1* donne les valeurs correspondantes des rendements extraites des données du NREL en juin 2013 et en août 2015 pour différentes filières.

Les progrès au sein des filières établies

Les cellules à très haut rendement à base de multijonctions

On peut tout d'abord constater l'augmentation du rendement des multijonctions III-V sous concentration qui est passé

de 44 % à 46 %, et qui poursuit sa marche vers le seuil symbolique des 50 %. On peut noter que cette progression est liée aux progrès effectués sur des quadruples jonctions grâce à la technologie développée par Soitec (qui malheureusement a dû arrêter cette activité fin 2014) et le centre Fraunhofer ISE, et non à ceux effectués sur les triples jonctions qui dominaient jusque-là. En juin 2013 la filière des quadruples jonctions ne figurait d'ailleurs pas sur le graphe du NREL. La filière des multijonctions est celle qui, la première (et la seule jusqu'à présent), a permis de dépasser le rendement limite des cellules à simple jonction qui est autour de 33 % sous un soleil (ce dont se rapprochent le plus les cellules en GaAs d'Alta Devices qui atteignent 28,8 %) et d'aller vers les rendements théoriques maximum de 85 % calculés pour la conversion photovoltaïque. Une structure qui prend de plus en plus d'importance sur le plan des perspectives d'utilisation pratique à moyen terme est

celle des cellules à deux jonctions, dites tandem, de technologie plus simple, fonctionnant sous éclairage normal. Actuellement le record est de 31,1 % à base de GaAs, la progression est très faible. L'intérêt de cette approche tandem serait de l'appliquer en combinaison avec les cellules simple jonction actuellement sur le marché à base de silicium ou de CIGS.

Les cellules au silicium cristallin

Cet ensemble comprend les cellules obtenues à partir de silicium monocristallin et multicristallin massif, ainsi que par report de couches minces cristallines épitaxiées. Dans chaque catégorie, des records ont été battus récemment.

Pour les couches minces reportées, les progrès technologiques ont permis de franchir la barre des 21 %. Concernant le silicium polycristallin, le rendement qui était bloqué depuis des années autour de 20,3-20,4 % a été poussé à 20,8 % du fait également d'améliorations technologiques, en particulier l'emploi de couches de passivation sur les deux faces afin de limiter les recombinaisons tout en améliorant la réflexion en face arrière. Les progrès de cette filière se font ressentir au niveau des modules et de la production. Ainsi, Trina Solar a annoncé en 2015 un module à plus de 19,1 % de rendement. Toutefois, les meilleures rendements restent l'apanage du silicium monocristallin, où l'obtention d'un rendement de 25,6 % a permis de mettre fin à un palier de rendement à 25 % de plus de 15 ans ! Il s'agit d'une rupture majeure associée, à la base, à l'association de deux concepts : une architecture de cellule où tous les contacts sont en face arrière (telle que développée en particulier par Sunpower) permettant de réduire les pertes par ombrage et d'augmenter le courant dans les cellules ; et le développement de la technologie HIT qui combine du silicium monocristallin avec des couches minces de silicium amorphe pour la formation des jonctions p-n ou n-n⁺. Ces approches, impliquant également d'autres couches de passivation, tendent à se généraliser à l'ensemble des technologies silicium, ainsi que d'autres développements comme les cellules à contacts arrières microstructurés et des traitements de piégeage de

Tableau 1. Évolution des rendements records du photovoltaïque sur 2 ans, entre juin 2013 et août 2015 d'après les données du NREL et comparaison entre les différentes filières.

Type de cellule	Rendement (%) juin 2013	Rendement (%) août 2015
Multi-jonctions sous concentration	44	46
Tandem sous éclairage standard	30,8	31,1
Silicium monocristallin	25	25,6
CIGS	20,4	21,7
CdTe	18,7	21,5
Silicium polycristallin	20,4	20,8
Pérovskite hybride	14,1	20,1 (20,8*)
Couches minces Si	13,4	13,6
Cellules organiques	11,5	11,5
Cellules à particules quantiques	7	9,9

*Valeur annoncée au congrès de la Société Chimique de France en juillet 2015.

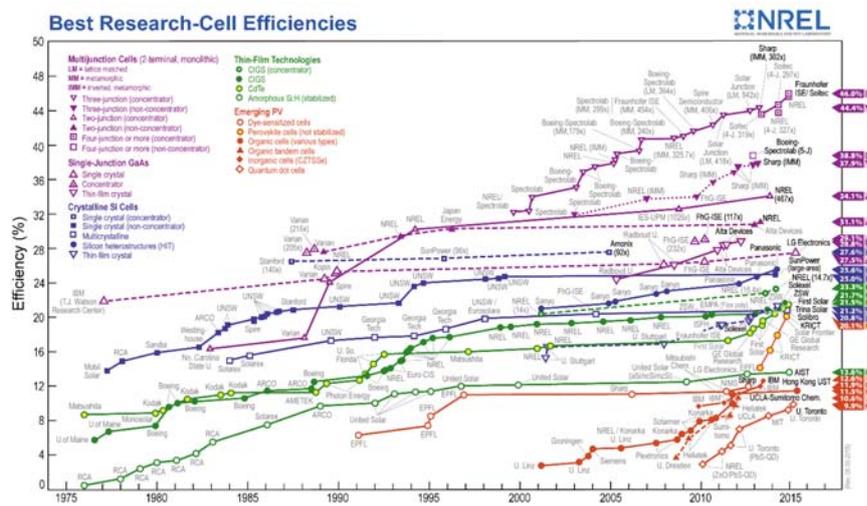


Figure 1. Fresque de l'évolution des rendements record en laboratoire des différentes filières photovoltaïques en août 2015. Source : site web NREL.

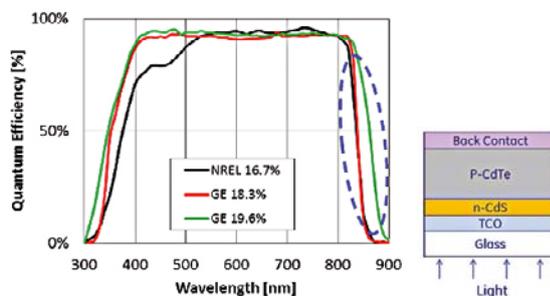


Figure 2. Illustration de l'évolution de la réponse spectrale des cellules CdTe avec l'amélioration dans l'UV et dans l'infrarouge permettant une collecte optimale des photons. Encart : schéma de la structure d'une cellule CdTe. Source : W.H. Hubber, A.R. Duggal, The renaissance of CdTe Photovoltaics, SPIE, août 2014 / Communication personnelle D. Lincot.

la lumière de plus en plus performants (*black silicon*). La course au rendement dans le domaine des cellules au silicium apparaît bien relancée.

Les cellules en couches minces

La progression la plus remarquable concerne les cellules en couches minces

polycristallines à base de CIGS et de CdTe. Pour le CIGS, alors que pendant de nombreuses années, le rendement était bloqué à 20 %, il a commencé à redécoller en 2013 avec un rendement à 20,4 %. Ainsi, pour la première fois une technologie couches minces faisait jeu égal avec la technologie silicium polycristallin et qui

plus est, pour une cellule solaire déposée sur plastique. Cette avancée a été confirmée par l'obtention d'un rendement record de 21,7 %. L'origine de cette rupture est maintenant bien connue et réside dans l'ajout de potassium à la surface de la couche de CIGS, qui conduit à la fois à une nanostructuration de l'interface favorisant le piégeage des photons et aussi à une modification de la composition superficielle avec la formation d'un composé pauvre en cuivre et intégrant le potassium comme élément de structure, du type K_xIn_ySe , qui agirait comme une couche de type n très peu recombinante. Cette découverte ajoute un volet à la déjà très riche histoire entre le CIGS et un autre élément alcalin, le sodium, qui était à l'origine du décolllement des années 1994-1995. Là encore le résultat expérimental précède la théorie et les chercheurs se mobilisent pour interpréter ce résultat et en tirer le meilleur parti pour augmenter les rendements vers les 25 %.

Le cas du CdTe est sans doute encore plus spectaculaire. En effet le rendement record, après avoir été bloqué pendant des années autour de 17 % (au point que beaucoup considéraient que la limite expérimentale était atteinte), s'est soudain débloquent en 2012 sous la pression de la recherche industrielle conceptualisée sous le terme *innovation factory* par General Electric en passant à 18,7 % en juin 2013 puis 21,5 % en 2015 (First Solar puis General Electric et à nouveau First Solar). Cette progression s'explique, pour ce que l'on en sait, par une amélioration de la collecte des photons, aussi bien dans l'UV grâce à des oxydes transparents et conducteurs de plus en plus performants (de type $CdSnO_3$ - $CdZnO_3$), que dans l'infrarouge avec des contacts arrière peu recombinants. Là aussi, la perspective de s'approcher des 25 % est ouverte. Ces deux technologies ont maintenant dépassé sur le plan des rendements record la technologie au silicium polycristallin, alors que l'opinion courante était qu'elles resteraient toujours en retrait. La *figure 2* illustre les progrès des cellules CdTe à travers l'évolution de leurs réponses spectrales au cours du temps.

La dernière technologie commerciale concerne les cellules à couches minces

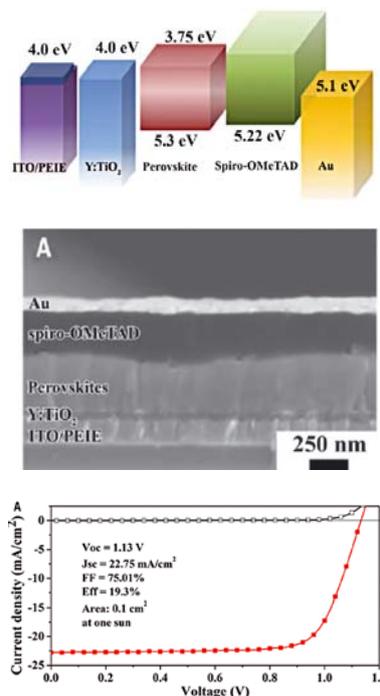


Figure 3. Structure d'une cellule pérovskite record et caractéristique courant-tension correspondante (d'après H. Zhou *et al.*, Interface engineering of highly efficient perovskite solar cells, *Science* 345, 542 (2014)).

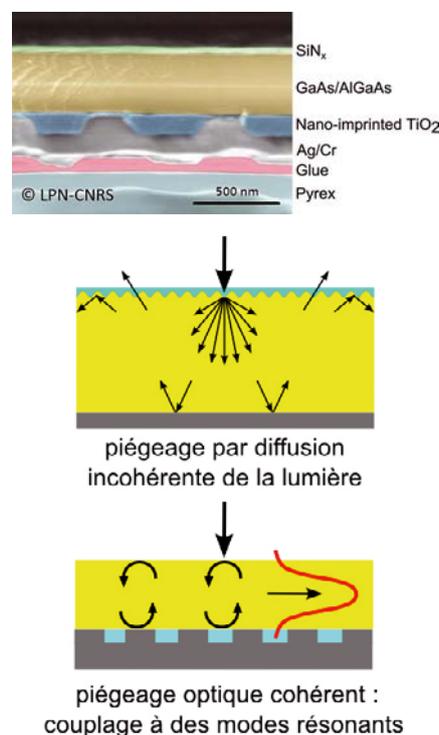


Figure 4. Schéma de principe des principales stratégies de piégeage optique. Vue en coupe d'une cellule solaire ultrafine en GaAs/AlGaAs : le miroir arrière nanostructuré en argent induit des résonances de modes guidés qui piègent la lumière dans la couche absorbante.

de silicium (amorphe et microcristalline en structure tandem voire triple jonction) dont le rendement record progresse peu, à 13,6 % après stabilisation, à un niveau qui reste encore en dessous des autres cellules CIGS et CdTe.

L'irruption d'une nouvelle filière : la filière pérovskite

Il s'agit sans doute d'une des évolutions les plus inattendues qu'ait connu le domaine du photovoltaïque au cours de son histoire, excepté peut-être le silicium dans les années 50, et qui se déroule depuis 3 ans.

Le domaine avait déjà connu une révolution majeure avec la découverte par l'équipe de Michael Graetzel à l'EPFL, des cellules hybrides à colorants en 1991 (appelées DSSC pour *dye sensitized solar cells*), s'inspirant de la photosynthèse et utilisant l'imprégnation de matrices nanoporeuses d'oxyde de titane par des molécules de colorants capables d'y injecter les électrons photoexcités d'un côté et de transférer les trous correspondants avec un électrolyte de l'autre. Ce concept complètement différent de la jonction p-n classique, a ensuite entraîné la renaissance du photovoltaïque organique, du fait de l'utilisation d'une structure interpénétrée. Classés dans la catégorie des concepts émergents par le NREL, les rendements record se sont hissés au niveau des 10-12 % ces dernières années, suscitant des recherches foisonnantes, mais donnant l'impression que de nombreuses années seraient nécessaires pour que les niveaux de rendements puissent se comparer aux filières établies. C'était sans compter sur la curiosité d'une équipe japonaise qui a eu l'idée en 2008-2009 d'utiliser les hybrides de iodure de méthylammonium de plomb de type $CH_3NH_3PbI_3$, de structure pérovskite (analogue au $CaTiO_3$ d'où leur nom), et bien connues pour leurs propriétés optiques exceptionnelles (luminescence) dans le visible, afin de remplacer les colorants par des clusters de pérovskite dans les DSSC. Malgré un rendement très modeste de 3,8 %, ces travaux ont été repris par une équipe coréenne portant le rendement à 6,5 % en

2011, et par l'équipe de Michael Graetzel avec un record à 9,7 % en 2012, qui a été affecté initialement à la progression de la filière DSSC avant d'être considérée définitivement en 2013 (à 15 %) comme le démarrage d'une nouvelle filière à part entière comme le montre la courbe du NREL récente.

Mieux encore, avec un nouveau record obtenu en 2014 (19,3 %), la cellule actuelle est constituée d'éléments qui sont empruntés à la fois aux cellules DSSC comme la présence de nanoporeux de TiO_2 à l'interface collectrice d'électrons, et aux cellules organiques avec l'utilisation d'un collecteur de trous organique. Il s'agit donc d'une cellule tout solide faisant converger les avancées des deux domaines précédents mais avec un élément majeur qui la rapproche des cellules de type CIGS et CdTe du fait que justement le matériau pérovskite est utilisé en couches minces et non en mode imprégnation. Il s'agit là d'une découverte fondamentale montrant que les propriétés de transport dans ce matériau, déposé à température proche de l'ambiante, sont exceptionnelles, avec des longueurs de diffusion annoncées à plus de 100 microns ! Un pan entier de recherche s'est ainsi ouvert, auquel la communauté scientifique française participe activement, afin de mieux comprendre les propriétés fondamentales de ces matériaux. Le dernier record annoncé par M. Graetzel en juillet 2015 est de 20,8 %, la « fusée pérovskite » a donc atteint les niveaux des autres filières couches minces et suscite un engouement considérable. Un dossier spécial vient de lui être consacré dans la revue de la Materials Research Society. Cependant

elle reste encore loin de la maturité, avec des problèmes de stabilité, de reproductibilité sur grandes surfaces, d'hystérésis... mais qui ne demandent qu'à être résolus, s'il n'y a pas de phénomène de dégradation d'origine fondamentale intrinsèque.

D'ores et déjà des travaux de transfert industriel sont lancés de par le monde avec en particulier une perspective de couplage avec les cellules silicium ou CIGS pour fabriquer des cellules tandem. L'équipe d'Henry Snaith (Oxford) a ainsi annoncé en mai 2015 (Rome, conférence HOPV) la première cellule tandem pérovskite/silicium avec un rendement record de 21,3 %, utilisant le matériau $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$, qui pourtant n'a pas un gap optimum pour cet usage. En effet la bande interdite des pérovskites est ajustable par substitution partielle des iodures par des chlorures ou des bromures, pour donner un spectre d'absorption mieux adapté à l'UV. De premiers travaux commencent à apparaître aussi avec le CIGS entre l'équipe d'Ayodhya Tiwari (record CIGS, EMPA) et l'équipe de Michael Graetzel (EPFL) avec un rendement de 19,5 % (juillet 2015). Ainsi cette filière serait en fait celle qui pourrait jeter les bases des cellules tandem de demain à plus de 30 % !

Développement récents de la photonique pour le PV

L'ingénierie optique des cellules solaires est une des principales sources d'amélioration potentielle des cellules solaires. Le premier enjeu est de diminuer l'épaisseur des couches actives pour réduire les coûts de fabrication et

la quantité de matériaux utilisés. La mise en œuvre d'un piégeage optique efficace est indispensable pour éviter la chute de courant engendrée par la diminution de l'absorption « simple passage ». Le second enjeu est de confiner la lumière à l'échelle sub-longueur d'onde pour mettre en évidence de nouveaux effets. Conversion de photon (*up- et down-conversion*), porteurs chauds, cellules à bandes intermédiaires, contrôle des recombinaisons radiatives... Ces effets nécessitent une forte exaltation du champ électromagnétique et/ou un contrôle fin du couplage avec l'espace libre pour devenir suffisamment efficace et améliorer l'efficacité des cellules solaires simple-jonction.

On peut classer les stratégies de piégeage de la lumière dans les cellules solaires planaires selon deux approches distinctes.

- Un piégeage optique par diffusion incohérente de la lumière est obtenu à l'aide d'interfaces rugueuses ou de nanoparticules disposées de manière aléatoire. La lumière est diffusée dans l'absorbeur dans toutes les directions, puis éventuellement réfléchi sur un miroir en face arrière et par réflexion totale interne en face avant. Le chemin parcouru par les photons peut être allongé d'un facteur F dont le maximum théorique est $F = 4n^2 \approx 50$, obtenu avec un antireflet parfait, une diffusion Lambertienne et un miroir en face arrière (n étant l'indice optique du matériau de la cellule).
- Un piégeage optique cohérent est réalisé à l'aide de nanostructures périodiques. L'exaltation de l'absorption peut provenir d'une grande variété d'effets résonants : structures diffractives, plasmoniques, à cristaux photoniques... Dans le schéma le plus courant, un réseau permet de coupler la lumière incidente avec des modes guidés dans les couches actives, dans le plan de la cellule. Cette stratégie est très adaptée aux cellules solaires en couches minces (GaAs, CIGS, CdTe,...), mais elle est plus délicate à mettre en œuvre car elle nécessite un contrôle très précis des nanostructures. Les études théoriques récentes prédisent un piégeage optique pouvant dépasser la limite Lambertienne (diffusion incohérente).

Une approche audacieuse et attractive : les cellules solaires à nanofils

Les nanofils de semiconducteurs sont une voie prometteuse pour lever plusieurs verrous pour la prochaine génération de cellules solaires : (1) la croissance localisée de nanofils est une solution « bottom-up » pour diminuer la quantité de matériau utilisé dans les cellules solaires et piéger la lumière dans de petits volumes, (2) la formation de jonctions radiales permet de découpler la direction de propagation de la lumière (axiale) et la direction de collection des charges (radiale), (3) la possibilité de faire croître des nanofils III-V sur substrats de silicium, voire sur substrats non cristallins, en s'affranchissant des limitations liées au désaccord de maille, offre de nouveaux degrés de liberté pour la conception de cellules multi-jonctions. La réalisation de cellules solaires efficaces à base de nanofils nécessite néanmoins de relever de nombreux défis : maîtriser la croissance des nanofils en assurant une excellente uniformité sur de grandes surfaces, confiner l'absorption dans un volume de semiconducteur réduit, réaliser des couches de passivation et de contact... Des progrès spectaculaires ont été réalisés au cours des deux dernières années, avec des cellules solaires à nanofils III-V dont l'efficacité est passée de 5 % à 15 %.

Depuis un ou deux ans, les études théoriques et numériques commencent à être validées par des résultats expérimentaux probants, qui attestent du potentiel énorme des nanostructures photoniques. Les recherches se poursuivent sur l'optimisation des dispositifs grâce à des simulations plus précises couplant modélisations optique et électrique. Avec la diminution de l'épaisseur des couches actives, le rôle des interfaces devient prépondérant, et leur passivation devient l'un des points clés dans l'architecture de nombreux dispositifs photovoltaïques. En conclusion, le domaine des cellules solaires ultrafines est de plus en plus actif dans toutes les filières. Un fossé subsiste entre les résultats expérimentaux et théoriques : la marge d'amélioration est considérable, en particulier dans les procédés de fabrication et pour concilier de manière optimale la collecte des photons et des électrons.

Conclusion

Le foisonnement de recherches dans le domaine de la conversion photovoltaïque qui est apparu il y a quelques années s'est à nouveau traduit par des progressions, parfois spectaculaires, des rendements de conversion record en laboratoire, que nous avons cherché à présenter et à analyser dans cet article. Compte tenu de la marge de progression très importante des rendements photovoltaïques, ces recherches de pointe servent de poissons pilotes pour les développements industriels

à venir. On notera en particulier l'irruption d'une nouvelle filière photovoltaïque, à base de couches minces de pérovskites hybrides, dont la progression est exceptionnelle et qui, combinée aux filières classiques (Si, couches minces CIGS) qui progressent également, pourrait annoncer le développement de cellules tandem encore plus efficaces et répondre encore mieux aux perspectives d'utilisation à grande échelle du photovoltaïque dans la lutte contre le changement climatique.

Remerciements. Daniel Lincot remercie W.H. Hubber pour les éléments de la figure 2.

Pour en savoir plus

- [1] Fresque des records photovoltaïques, http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg
- [2] Document sur le photovoltaïque de l'Agence Internationale de l'Énergie, https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapSolarPhotovoltaicEnergy_2014edition.pdf
- [3] Global Market Outlook for Solar Power 2015-2019, <http://www.solarpowereurope.org/>
- [4] Numéro spécial sur le photovoltaïque Pérovskite, Materials Research Society Bulletin, vol. 40, n°8 (août 2015)

Les premiers du genre



James Blyth a créé la première turbine à vent électrique en Ecosse en 1887.

Question:
Quand est-ce que le vent fut utilisé pour sa puissance pour la première fois?

Héron d'Alexandrie inventa la première 'roue à vent' durant le premier siècle.

Sans eau

Sonde de mesure haute puissance



- Pas d'eau, refroidissement optimisé par air
- Mesure jusqu'à 1100W
- Large ouverture de 65mm
- Utilisation du système 'Smart Head'

Toll Free 00800 67447678 • Regular + 49 6151 708-0
www.ophiropt.com/photonics



The True Measure of Laser Performance™



Rosetta : zoom sur VIRTIS H

Un spectromètre haute résolution pour l'étude de la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko

Stéphane ERARD

Responsable français de l'instrument VIRTIS/Rosetta
LESIA, Observatoire de Paris/PSL Research University/CNRS/
Université Pierre et Marie Curie/Université Paris-Diderot, Meudon
stephane.erard@obspm.fr

La mission Rosetta est la troisième pierre angulaire du programme Horizon 2000 de l'ESA. C'est la première mission étudiée pour se mettre en orbite, et pour se poser, sur une comète. La mission tire son nom de la pierre de Rosette qui permit à Jean-François Champollion de traduire les hiéroglyphes égyptiens et de reconstituer ainsi l'histoire de l'Égypte antique. De manière un peu similaire, la mission doit permettre de comprendre les premiers stades d'évolution du Système solaire en étudiant des objets primitifs, très peu modifiés depuis cette époque. Le profil de mission incluait donc également le survol de deux astéroïdes primitifs durant la croisière : (2867) Steins et (21) Lutetia, qui n'ont été que peu chauffés ou hydratés depuis leur formation.



Vue d'artiste de Rosetta à l'approche de la comète 67P/Churyoumov-Gerasimenko.

Rosetta devait initialement partir en 2003 vers la comète 46P/Wirtanen, pour l'atteindre en 2011. Le lancement ayant été reporté en mars 2004, le plan de vol et la comète cible ont été modifiés pour adopter la configuration actuelle. La sonde a rejoint 67P/Tchourioumov-Guérassimenko en mai 2014 et a déposé à la surface son atterrisseur Philæ en novembre. Elle l'accompagnera ensuite sur son orbite jusqu'en décembre 2015, après un passage au plus près du Soleil le 13 août 2015.

Parmi les instruments sélectionnés sur l'orbiteur, VIRTIS procède à des observations de spectroscopie de 67P/

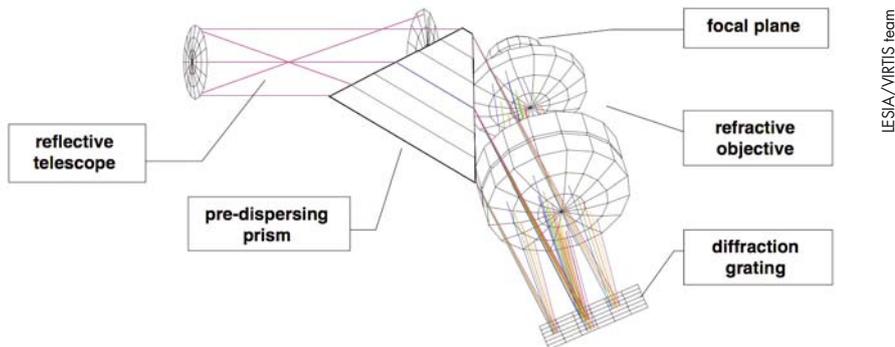
Tchourioumov-Guérassimenko dans le domaine visible et proche infrarouge. L'étude porte aussi bien sur le noyau de la comète que sur la coma¹, et permet d'identifier les principaux composants ainsi que leur abondance et dans une certaine mesure les conditions physiques. L'association d'un spectro-imageur visible-proche infrarouge (VIRTIS-M) et d'un spectromètre infrarouge à dispersion croisée (VIRTIS-H) fournit une combinaison optimale pour étudier la variabilité de la surface et les signatures subtiles de l'atmosphère et

¹ Le noyau de la comète est entouré d'une fine atmosphère brillante constituée de gaz et de poussières, appelée chevelure ou coma.

des glaces [1]. L'instrument VIRTIS résulte d'une collaboration tri-nationale : la voie H a été fabriquée au LESIA (Observatoire de Paris), la voie M par Selex-Galileo à Florence, l'électronique et le logiciel de bord à la DLR (Berlin). L'ensemble est sous responsabilité italienne (investigateur principal : F. Capaccioni, IAPS/INAF, Rome).

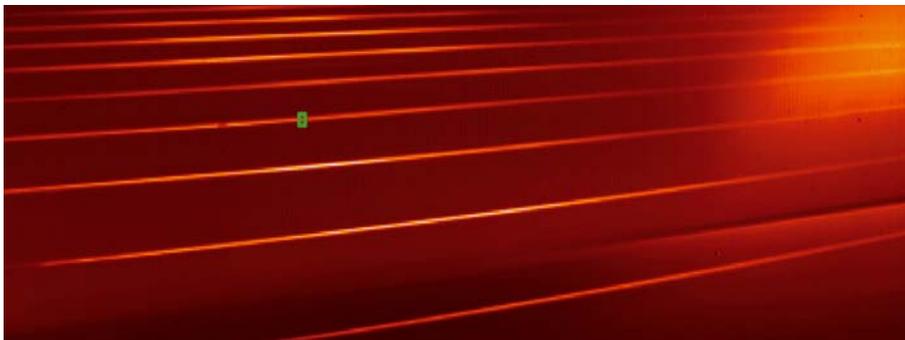
Description instrumentale

VIRTIS-M est un spectro-imageur moderne, qui disperse l'image d'une fente sur un détecteur bidimensionnel. L'une des directions est spectrale, l'autre spatiale (le long de la fente). La seconde dimension spatiale est acquise au cours du temps, soit en laissant la surface défilier sous la sonde, soit en pointant avec un miroir de balayage. 256 spectres sont acquis simultanément, ce qui permet de cartographier l'objet observé (surface ou coma). La résolution spectrale de la voie M est $\lambda/\Delta\lambda \sim 300$, ce qui permet de mesurer les absorptions des minéraux et des glaces en surface. La résolution angulaire est de 0,25 mrad pour une résolution maximum au sol de ~ 2.5 m (variant avec l'altitude



LESIA/VIRTIS team

Figure 1. Schéma optique de VIRTIS-H. La fente est placée dans le plan focal du télescope, avant le collimateur. Le terme FPA (*focal plane assembly*) désigne le système de détection installé dans le plan focal (détecteur et électronique de proximité).



LESIA

Figure 2. Image du détecteur VIRTIS-H illuminé. Le réseau disperse dans la direction horizontale. Les ordres successifs sont séparés dans la direction verticale par le prisme. L'ordre grandes longueurs d'onde est en bas, on distingue la limite du filtre juste au-dessus. Le rectangle vert représente le champ de vue dans un canal spectral.

de la sonde). Le domaine spectral exploité va de 0,22 à 5,1 μm , ce qui couvre les principales signatures attendues (silicates, sulfides, matière organique, glaces) et permet de mesurer la température de la surface côté jour.

VIRTIS-H est quant à lui un spectromètre échelle, utilisant un prisme suivi d'un réseau dispersant la lumière dans la direction orthogonale à celle du prisme (figure 1). Le domaine spectral 1,9-5,1 μm est dispersé en 8 ordres sur un détecteur infrarouge bidimensionnel en HgCdTe (décrit en détails plus loin dans l'article). L'instrument a donc un champ de vue ponctuel, mais une résolution spectrale bien plus élevée que la voie M ($\lambda/\Delta\lambda \sim 1700$ à 3500). Seule une petite partie du détecteur est utilisée pour la mesure (figure 2).

Design optique

VIRTIS-H est composé de quatre parties principales : un module afocal en entrée, un système dispersif, un objectif, et un détecteur dans le plan focal [2].

- Le module afocal est composé de deux paraboles hors-axe en aluminium (télescope et collimateur) partageant le même plan focal, dans lequel est disposée la fente d'entrée du spectromètre. Un obturateur placé près de la fente permet de fermer le champ et de mesurer le courant d'obscurité. Ce module est monté sur un banc réalisé dans le même matériau que les miroirs ; l'ensemble constitue un système achromatique compact, qui peut être réglé en lumière visible à température ambiante.
- Le module de dispersion est composé d'un prisme et d'un réseau en réflexion. Le système exploite 8 ordres du réseau, qui sont séparés dans la direction perpendiculaire par un prisme en MgO. En évitant le recouvrement des ordres successifs du réseau, ce système permet non seulement d'exploiter un large domaine spectral, mais facilite aussi grandement la calibration radiométrique. Les ordres 6 à 13 du réseau sont



ILLUMINEZ LE MONDE



Diodes Lasers Pulsées

Gamme de Produits

PLDs à 850 nm
10,5 W

PLDs à 905 nm
Mono-émetteur

Empilement
Versions multi-jonctions
jusqu'à 650 W

PLDs à 1550 nm
Versions sécurité oculaire
jusqu'à 45 W

Versions Spéciales

PLDs fibrées

Modules à
diode laser pulsée

Versions Spécifiques Clients

www.lasercomponents.fr





Figure 3. VIRTIS durant les tests au sol à Florence. L'instrument est entouré de ses protections thermiques. On distingue à gauche le baffle de la voie H, à droite celui de la voie M. La plaque supérieure sert de radiateur.

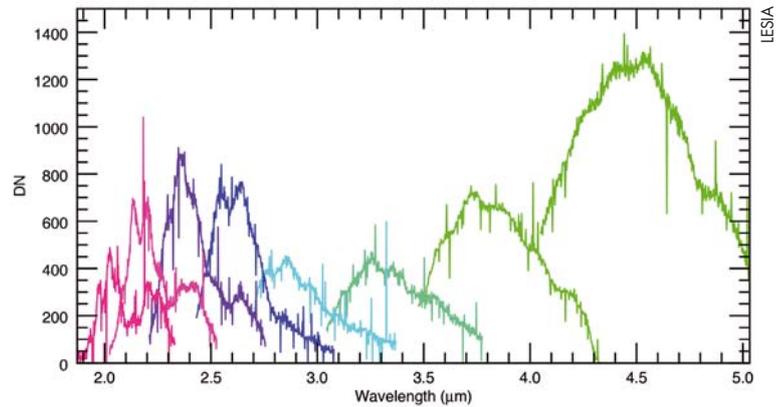


Figure 4. Spectre brut de VIRTIS H, tel que transmis au sol (le courant d'obscurité est soustrait à bord). Les 8 ordres sont affichés en couleurs. La réponse globale dans chaque ordre est liée à l'efficacité du réseau.

utilisés afin d'obtenir une dispersion comparable sur la matrice de détection. Le réseau échelle, gravé à 29,29 lignes/mm, est divisé en deux parties ayant des longueurs d'onde de blaze différentes (respectivement 26,16 μm et 28,24 μm), ce qui permet d'obtenir un profil d'efficacité élargi dans chaque ordre.

- Le faisceau est repris par un objectif F/2 composé de deux lentilles en silicium et d'une lentille en germanium. La première lentille de silicium, proche du réseau, est elliptique afin de réduire au mieux l'aberration sphérique.
- Le détecteur disposé dans le plan focal est protégé par un filtre à deux zones, qui isole l'ordre grandes longueurs d'onde (4,1 μm à 5,0 μm). Le rôle de ce filtre est d'éliminer le fond thermique, c'est-à-dire la lumière émise par l'instrument lui-même, qui n'est pas dispersée spectralement par le réseau. L'ensemble des parties optiques est maintenu à 130 K par refroidissement passif afin de limiter le rayonnement thermique dans l'instrument, mais le fond thermique reste important et réduit à la fois la dynamique et le rapport signal/bruit. Il est filtré au-delà de 4,1 μm , sauf dans l'ordre à plus grandes longueurs d'onde où il se superpose au signal attendu.

L'intérêt de ce montage est d'obtenir une bonne résolution spectrale (variant de 1700 à 3500 dans chaque ordre) dans un domaine spectral large. Celui-ci (1,9–5,1 μm) est couvert sur 3456 canaux spectraux.

Le champ de vue étant ponctuel, la qualité optique de l'instrument ne doit être maintenue que près de l'axe optique ; elle est limitée par la diffraction dans l'ensemble du domaine spectral. Le champ total (IFOV) est de $0,58 \times 1,74 \text{ mrad}^2$, correspondant à une région de 1×3 pixels sur la matrice de détection.

Des baffles sont placés à l'entrée du spectromètre, autour de la fente, et entre l'objectif et le plan focal pour réduire la lumière hors champ et les réflexions internes. En position de repos, un couvercle ferme complètement l'instrument pour protéger l'optique de la poussière cométaire.

Un étalonnage radiométrique et deux modules de calibration spectrale sont utilisés dans le spectromètre. Les modules de calibration spectrale utilisent une lampe au tungstène et un interféromètre de Fabry-Perot, qui produit plusieurs lignes spectrales dans chaque ordre. Un de ces modules est observé via un miroir situé sur la face interne du couvercle de protection, qui renvoie le flux vers le télescope. L'autre illumine l'arrière de la fente qui renvoie le flux vers le collimateur. Le module d'étalonnage radiométrique utilise une lampe au tungstène via le miroir du couvercle d'entrée.

Le réglage optique de l'instrument est effectué au moyen de cales dures qui le rendent très stable. Tout d'abord, la tête optique afocale (télescope/fente/collimateur) est ajustée à température ambiante en utilisant les cales du télescope et du collimateur. En raison de l'uniformité

du matériau, le système reste ajusté à la température de travail beaucoup plus basse (~130 K), en particulier les mêmes longueurs d'onde se projettent au même endroit du détecteur quelle que soit la température. Le réglage en IR à la température de travail de l'instrument global est ensuite effectué en utilisant les cales portant le détecteur et le réseau.

Détecteur et mesure

Le détecteur utilisé est une matrice HgCdTe Raytheon/IRCOE de 436×270 pixels sur 15 bits. Afin de réduire le courant d'obscurité, il est maintenu à 80 K à l'aide d'un refroidissement actif (machines RICOR K508) qui limite la durée de vie de l'instrument à quelques milliers d'heures en observation (figure 3).

Un faible nombre de pixels reçoit effectivement de la lumière (figure 2). L'image de la fente est réduite à une largeur de 3 pixels sur la matrice ; c'est l'épaisseur de l'arc produit par chaque ordre du réseau. Les pixels illuminés sont lus directement à bord, et sommés par groupes de 5 dans chaque canal spectral afin d'éviter toute perte de signal. Les spectres VIRTIS-H ont 3456 canaux spectraux répartis en 8 ordres. Les ordres successifs ont une partie commune, ce qui implique que les mêmes domaines spectraux sont observés avec deux résolutions différentes (figure 4).

En mode nominal les spectres sont donc extraits et reconstitués à bord avant transmission pour économiser la bande passante. Un mode de secours

beaucoup plus gourmand permet de transmettre toute la matrice pour des opérations de calibration, notamment pour vérifier la carte des pixels éclairés, la registration spectrale, et la présence de lumière parasite.

Le courant d'obscurité est mesuré à fréquence variable, généralement à raison d'un spectre sur 4. Le dernier courant d'obscurité mesuré est soustrait des observations, qui sont transmises avec ou sans compression ; les courants d'obscurité sont transmis séparément, ce qui permet d'affiner la correction une fois sur Terre, en interpolant au moment de la mesure. Dans ces conditions, le rapport signal sur bruit obtenu est couramment de l'ordre de 100 à 500.

En situation de fonctionnement, le courant d'obscurité est de l'ordre de 5000 pas-codeurs, sauf dans l'ordre grandes longueurs d'onde, non filtré, où il peut atteindre les 15 000 pas-codeurs. La saturation est atteinte aux environs de 28 000 pas-codeurs, ce qui contraint le temps de pose maximal (actuellement 3 s pour l'observation du noyau, 6 s pour la coma). Le bruit en $1/f$ devenant important à partir de 10 s d'exposition, les poses longues dans la coma sont effectuées par sommation uniquement. Un problème rencontré avec ces détecteurs concerne une non-linéarité notable à faible flux, et différente pour les deux circuits de lecture entrelacés (colonnes paires et impaires) ; celle-ci est traitée dans le pipeline de calibration au sol, à partir de l'étude des courants d'obscurité.

Utilisation en opérations

Alors que VIRTIS-M est dédié à la cartographie du noyau, la résolution spectrale plus élevée de la voie H permet avant tout une étude plus fine de la coma, puisque les raies de rotation des gaz principaux (H_2O , CO_2 , CO , OCS , CH_4 , etc.) sont résolues. Ceci permet non seulement de détecter les espèces et de mesurer directement la densité de colonne des gaz (intégrée sur la ligne de visée), mais également de déduire leur température rotationnelle, et dans le cas de H_2O de mesurer le rapport ortho/para, qui dépend directement de la

température de formation des molécules dans la nébuleuse primitive.

Sur le noyau, la résolution permet de résoudre le profil des bandes d'absorption de la matière organique et éventuellement des glaces exotiques (méthanol, etc.), ou de séparer les signatures de glace et de minéraux. Par ailleurs, la cadence d'acquisition plus élevée que celle de la voie M permet de résoudre les variations de températures, particulièrement complexes compte tenu de la forme du noyau de 67P. En particulier l'étude des phénomènes d'éclipse d'un lobe de la comète par l'autre permet de comprendre les propriétés thermiques de la surface, liées à sa porosité et à sa structure verticale.

Conclusion

Les développements liés à VIRTIS ont été réutilisés dans le cadre d'autres missions spatiales ; le modèle de recharge en particulier a volé entre 2006 et 2015 sur Venus-Express, et les études ont servi de base pour des propositions d'instruments à destination de Mars, du système de Jupiter, et d'astéroïdes proches.

Après 10 mois d'observation, VIRTIS-H a acquis ~4 Go de données sur 67P (pour 54 Go avec la voie M, avec ses deux détecteurs visible et infrarouge). L'ensemble représente de loin le plus gros jeu de données spectroscopiques concernant une comète, et décrit bien la situation à des distances héliocentriques relativement élevées [3]. Les phases de mission suivantes permettront de comprendre les mécanismes d'évolution de la comète à faible distance du Soleil, lorsque l'activité est complètement développée.

Pour en savoir plus

[1] Coradini *et al.* (2007), Virtis: An imaging spectrometer for the Rosetta Mission. *Space Science Rev.* 128, 529.

[2] Drossart *et al.* (2000), VIRTIS-H: A high-spectral-resolution channel for the Rosetta infrared imaging spectrometer. *Proc. SPIE*, 4131, Infrared Spaceborne Remote Sensing VIII, 78.

[3] Capaccioni *et al.* (2015), The organic-rich surface of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko as seen by VIRTIS/Rosetta. *Science*, 347, 6220.

Plateforme OSICS

Créez vos bancs de test



avec nos modules OSICS

Nouveaux modèles DFB CWDM



Grande stabilité

Puissance +10 dBm

Canaux disponibles

1270 nm	1470 nm
1290 nm	1490 nm
1310 nm	1510 nm
1330 nm	1530 nm
1350 nm	1550 nm
1370 nm	1570 nm
1390 nm	1590 nm
1410 nm	1610 nm
1430 nm	1625 nm
1450 nm	1650 nm

Yenista
OPTICS

Tél. : +33 (0)2 96 48 37 16
sales-emea@yenista.com
www.yenista.com

Développement de sources laser ultra-rapides de forte puissance pour l'usinage

Xavier DÉLEN

Groupe Lasers, Laboratoire Charles Fabry,
Institut d'optique Graduate School – CNRS, Palaiseau
xavier.delen@institutoptique.fr

Le micro-usinage laser de haute-précision est une technique qui est maintenant utilisée à grande échelle dans de nombreux secteurs de la production industrielle. Par exemple, il intervient dans le processus de production de nombreux produits électroniques mais aussi dans l'industrie automobile ou dans le secteur du luxe. On peut ainsi répertorier plus d'une dizaine d'opérations de micro-usinage laser dans le processus de production d'un smartphone ou d'une tablette numérique. L'usinage de précision permet aussi de percer les buses d'injection des moteurs diesel et produire ainsi des moteurs plus efficaces et moins polluants que leurs prédécesseurs. L'industrie du luxe l'utilise quant à elle pour lutter contre la contrefaçon ou encore pour produire des pièces mécaniques de haute précision pour l'horlogerie.

Dans ce contexte, l'Union européenne contribue au financement des efforts de recherche et développement (R&D) dans le domaine afin de stimuler l'activité de ce secteur. Les projets Européens Ultrafast_RAZipol et TiSaTD (présenté en fin d'article) visent à développer une nouvelle génération de sources laser de puissance pour le micro-usinage. Le projet Ultrafast_RAZipol est financé pour 3 ans dans le cadre du programme FP7 et a été lancé en novembre 2013. Le consortium est composé de laboratoires de recherche et d'entreprises dont deux membres français : le Laboratoire Charles Fabry (LCF) de l'Institut d'optique Graduate School et l'entreprise FiberCryst basée à Lyon qui sont partenaires depuis plus de 10 ans. Grâce aux savoirs faire et aux technologies des différents partenaires, plusieurs défis techniques et scientifiques sont relevés dans le cadre du projet. Le premier est de combiner plusieurs technologies

laser innovantes pour proposer de fortes puissances moyennes jusqu'à 500 W en régime sub-picoseconde à forte cadence. Le deuxième est de délivrer un faisceau à polarisation radiale ou azimutale dont les propriétés permettent de gagner en productivité mais aussi en qualité pour des applications de micro-usinage telles que le perçage laser. La haute cadence des sources développées dans le cadre du projet amène aussi à travailler sur le développement d'une nouvelle génération de scanners ultrarapides capables de gérer des cadences de répétition de 20 MHz pour diminuer les temps de process et améliorer la productivité.

La polarisation radiale

Avant de rentrer dans le détail de l'architecture laser, arrêtons-nous un instant sur la notion de polarisation radiale. Alors

Le Micro-usinage ne doit pas être une tâche impossible

Platines de translation

- Modèles de course allant de 50mm à 1.5m
- Vitesse jusqu'à 2 m/s
- Conception à joints latéraux et capot acier
- Faible coût, haute performance
- Vis à billes ou à moteurs linéaires



Système intégré Axes servo / Scanner

- Grand choix de focales et ouvertures
- Précision ultime et stabilité thermique
- Synchro tirs laser en temps réel sur les positions scanner/axes servo



Système d'usinage cylindrique

- Plateforme de déplacement translation / rotation
- Architecture de contrôle avancée
- Configurations à simple ou double broche



Système gantry à moteurs linéaires

- Vitesse 3 m/s et acceleration 5 g
- Précision exceptionnel et performance pour une productivité maximale
- Versions "étanches" et options customisées pour votre application



Notre brochure gratuite Usinage LASER et Micro-usinage



<http://www.aerotech.com/resources/brochures.aspx>



Dedicated to the Science of Motion

Ph: +33 1 64 93 58 67
Email: sales@aerotech.co.uk
www.aerotech.co.uk



AT0815A-LPM-FR

que l'immense majorité des systèmes laser industriels ultra-rapides délivrent des faisceaux gaussiens polarisés linéairement, les intérêts des faisceaux à polarisation radiale ou azimutale ont été démontrés en laboratoire depuis de nombreuses années. Pour ces faisceaux, le champ électrique est orienté de manière radiale ou azimutale par rapport au profil d'intensité en tous points du faisceau laser (cf. figure 2). Cela signifie aussi que l'orientation du champ n'est pas définie au centre du faisceau, que son amplitude y est donc nulle et que le profil d'intensité a une forme d'anneau. Avec ces faisceaux, des différences d'efficacité de l'ordre de 50 % ont été mesurées pour des applications de perçage à fort rapport d'aspect. L'analyse des échantillons a aussi montré une plus grande profondeur de pénétration et une meilleure symétrie des trous obtenus grâce à la symétrie cylindrique de la polarisation des faisceaux. Produire et amplifier ces faisceaux s'avère être relativement délicat étant donné qu'un simple miroir laser utilisé à incidence non nulle est susceptible de dégrader l'état de polarisation.

L'architecture de la source laser

L'architecture laser de la source développée est basée sur un oscillateur suivi d'une chaîne d'amplification (MOPA – *master oscillator power amplifier*). L'injecteur est un oscillateur laser en espace libre utilisant un cristal dopé aux ions ytterbium et pompé par une diode laser. Les durées d'impulsion en régime picoseconde et sub-picoseconde sont obtenues par verrouillage des modes en phase grâce à un absorbant saturable à semi-conducteur. Ce travail est réalisé par Time-Bandwidth Products, un industriel du laser ultra-rapide basé à Zurich et récemment racheté par l'entreprise américaine JDSU.

Des fibres cristallines sont utilisées pour les premiers étages d'amplification qui sont testés au LCF de Palaiseau et seront intégrés par l'entreprise Lyonnaise Fibercryst. La fibre cristalline est une technologie hybride à la frontière entre le cristal laser massif classique et la fibre optique. Elle est développée depuis une

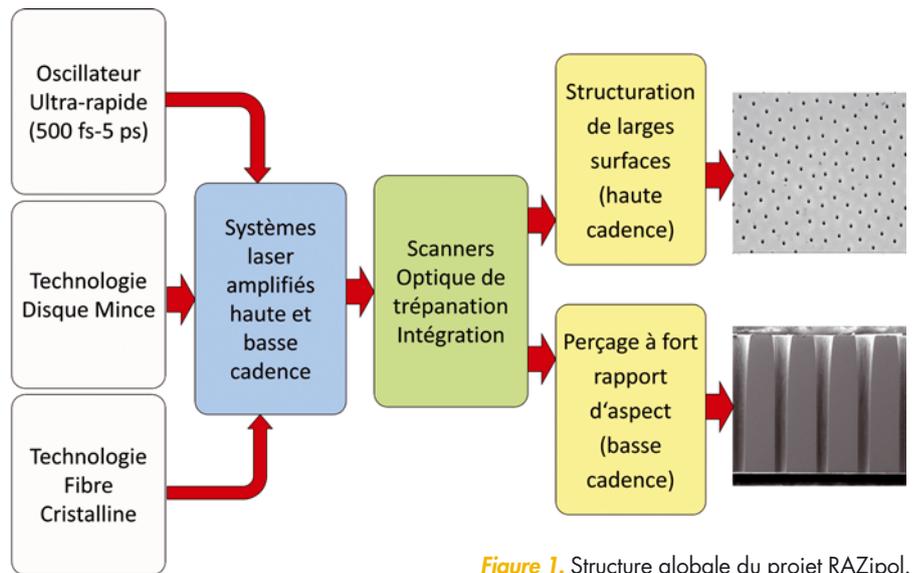


Figure 1. Structure globale du projet RAZipol.

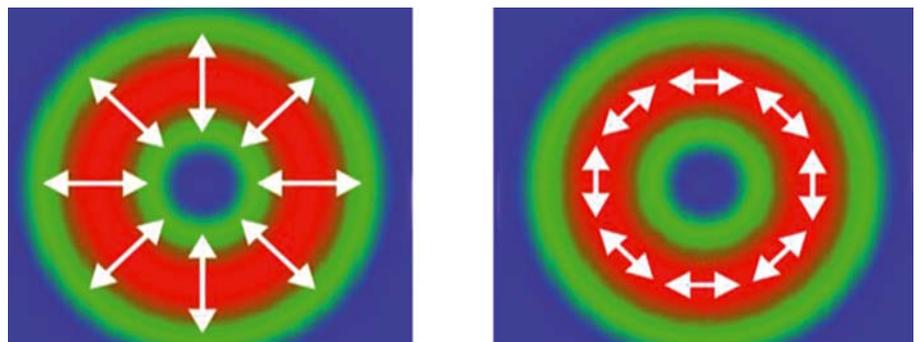


Figure 2. Profil d'intensité et orientation du champ électrique pour des faisceaux laser à polarisation radiale et azimutale.

dizaine d'années dans le cadre d'une collaboration entre le LCF et Fibercryst. Ce travail a donné lieu à une vingtaine de publications scientifiques, une cinquantaine de présentations en conférences, trois brevets et un produit commercial. Les modules de gain à fibre cristalline Taranis (cf. figure 3) offrent une solution technologique qui permet de tirer pleinement parti du concept de la fibre cristalline en assurant un excellent contact thermique entre le cristal et sa monture tout en limitant les contraintes mécaniques. Ils ont été utilisés pour réaliser de nombreuses démonstrations expérimentales qui ont précédé le projet dont un oscillateur laser de 250 W et un amplificateur laser en régime femtoseconde permettant d'atteindre une énergie d'un millijoule. Une première démonstration d'amplification de faisceau à polarisation radiale

a aussi précédé la soumission du projet de quelques mois.

Une fois les oscillateurs amplifiés intégrés, ils seront envoyés à l'IFSW de l'université de Stuttgart qui est à l'origine de l'invention du disque mince. Cette architecture laser permet de concevoir des oscillateurs et des amplificateurs de très forte puissance et est à l'origine d'une révolution dans le domaine des applications industrielles de l'usinage laser. Le principe est d'utiliser un cristal laser fin (100 µm à 200 µm) refroidi par la face arrière comme miroir actif. Cette approche a récemment permis à nos collègues allemands d'obtenir une puissance de sortie de 1,4 kW avec un amplificateur multi-passage. Une version adaptée à la polarisation cylindrique (radiale ou azimutale) sera développée dans le cadre du projet. L'objectif est d'atteindre jusqu'à 500 W à haute cadence.

Les applications

L'intégration de l'ensemble du système laser sera réalisée par Time-Bandwidth Products JDSU. La haute cadence de la source développée impose des vitesses de balayage du faisceau très élevées qui ne peuvent être obtenues avec les scanners classiques. La société Next Scan Technology, membre du consortium basé en Belgique et en Hollande, développe des scanners à base de polygones qui permettront aux utilisateurs d'exploiter ces fortes cadences pour gagner en productivité.

Deux sources sont développées dans le cadre du projet Ultrafast_RAZipol pour deux gammes d'application : l'une à très

haute cadence et l'autre à plus basse cadence. La texturation de larges surfaces et le développement de structures complexes de type « Lab on Chip » sur de grands wafers sont les deux principales applications visées pour la source haute cadence (500 W ; 20 MHz ; < 1 ps). La source basse cadence et forte énergie (200 W ; 200-500 kHz ; 5 ps) est quant à elle conçue pour le perçage de trous profonds de qualité supérieure avec un fort rapport d'aspect. La principale application est le perçage des buses d'injection des moteurs diesels. Trois partenaires travaillent sur ce volet du projet : la société allemande GFH qui développe des machines d'usinage laser ; la société allemande SLV M-V qui développe des processus industriels d'usinage laser ainsi que l'entreprise Suisse Class 4 Laser Professionals qui met son expertise en usinage laser au service du projet.

Figure 3. Module de gain à fibre cristalline Taranis commercialisé par l'entreprise Fibercryst.

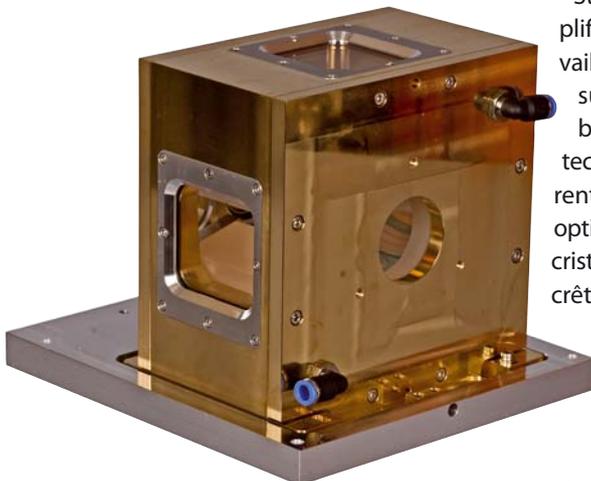
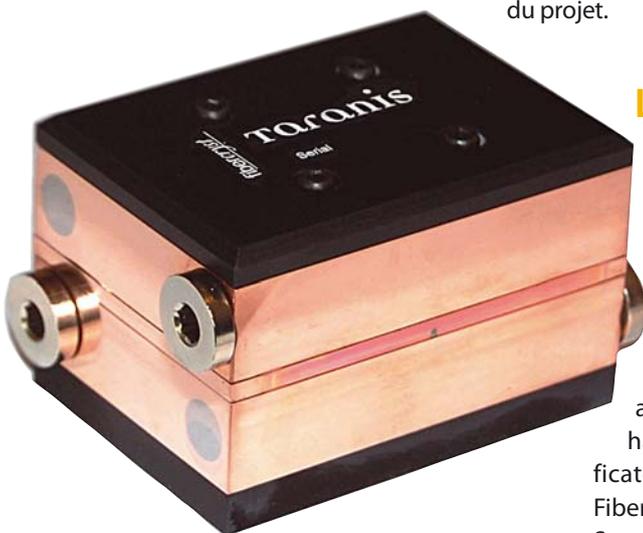


Figure 4. Module à disque mince développé par l'IFSW de l'Université de Stuttgart.

Les avancées du projet

Les deux partenaires français du projet ont atteint le 1^{er} jalon de performances avec plus du 70 W de puissance en polarisation cylindrique après amplification de la source haute cadence. Ces amplificateurs ont été intégrés par Fibercryst et envoyés à l'IFSW à Stuttgart pour développer l'amplificateur à disque mince. Le travail se concentre donc maintenant sur l'amplification de la source basse cadence pour laquelle les techniques de combinaison cohérente développées pour les fibres optiques seront adaptées aux fibres cristallines afin de gérer puissances crête élevées. Au terme du projet, les sources laser développées sont amenées à devenir des produits commercialisés par les partenaires industriels.

Pour plus d'informations et les dernières actualités du projet : rendez-vous sur www.razipol.eu



Avec l'apparition du premier spectromètre miniature au monde, Ocean Optics a permis à la spectroscopie d'être portable, bas coût et accessible. Inspirés par vos retours d'expériences, nous avons ré-inventé le spectromètre miniature pour adresser les challenges actuels et les applications les plus exigeantes. Le Flame a une meilleure stabilité thermique, une excellente reproductibilité, et donne la liberté à l'utilisateur de changer soi-même la fente d'entrée. Il dispose d'une connectique d'interfaçage et de LEDs témoins.



Pour plus d'information sur nos offres, contactez notre distributeur français

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



www.oceanoptics.com

Zoom sur le projet TiSaTD

Christophe SIMON BOISSON

Thales Optronique

christophe.simonboisson@fr.thalesgroup.com

Alors que l'utilisation de l'Yb:YAG limite la durée des impulsions à des valeurs minimum autour d'une picoseconde, le saphir dopé titane permet de générer des impulsions beaucoup plus courtes de durée inférieure à 100 fs. C'est l'un des matériaux « historiques » des lasers à impulsions brèves qui donne lieu par ailleurs à des développements considérables dans le domaine des lasers à très haute puissance crête pour applications scientifiques. Il est très peu utilisé dans le domaine du micro-usinage. Les raisons sont liées d'une part à l'absence de diodes de puissance vertes adéquates pour pomper directement le matériau, d'autre part et surtout aux difficultés d'obtention de puissances moyennes compatibles avec les besoins des utilisateurs quant à la productivité du micro-usinage. Ces difficultés sont provoquées par le comportement optique sous fort pompage du matériau qui devient alors très focalisant. Une alternative est le fonctionnement à basse température (autour de 70 à 80 K) car dans ce cas l'effet de focalisation est nettement moins prononcé grâce à l'augmentation de la conductivité thermique du matériau. Néanmoins cela nécessite la mise en œuvre de dispositifs de cryogénie qui sont peu compatibles d'un fonctionnement industriel.

Le projet et le consortium « TiSa-TD »

Le fait de ne pas pouvoir disposer de sources laser produisant des impulsions plus courtes que 300 fs peut s'avérer problématique pour les performances et la qualité du micro-usinage notamment pour ce qui concerne les matériaux diélectriques. L'idée directrice du projet *Ultrafast high-average power Ti:sapphire thin-disk oscillator and amplifiers* (dont l'acronyme est TiSa-TD pour titanium sapphire thin disk) est d'utiliser pour la première fois le saphir titane sous forme

de disque mince car cette configuration conduit à des gradients thermiques essentiellement longitudinaux, ce qui limite fortement les effets de focalisation. Par ailleurs, les dissipateurs thermiques initiaux seront constitués de diamant synthétique transparent qui est désormais disponible dans une ouverture suffisante de type centimétrique et dont les performances en absorption et en biréfringence résiduelles sont récemment en très nette amélioration.

Le projet TiSa-TD est un projet de 3 ans financé par l'Union européenne (*grant agreement* n°619777) qui a démarré en décembre 2013 et qui est piloté par l'Institut Für StrahlwerkZeuge (IFSW) de l'université de Stuttgart. Cet institut spécialisé dans la technologie des lasers et de leurs applications industrielles est l'inventeur du concept de disque mince. Dans le projet, outre la coordination, IFSW est plus spécifiquement chargé de la conception et de la réalisation de l'ensemble des modules de gain à disques minces et de la conception d'un oscillateur saphir titane à disque mince de haute énergie. Les autres partenaires du projet sont : le CNRS, au travers du laboratoire Femto-ST de Besançon qui est en charge d'optimiser les procédés d'interaction laser-matière utilisant les sources de TiSa-TD en mettant en œuvre des architectures d'interaction particulièrement innovantes comme celles utilisant des faisceaux de Bessel ; Element 6, société britannique leader mondial du diamant synthétique en charge de concevoir et qualifier l'ensemble des dissipateurs diamant du projet TiSa-TD ; Kite Innovation, société britannique en charge du management du projet, en appui à IFSW ; MSquared Lasers, société britannique spécialisée dans les oscillateurs femtosecondes qui est en charge d'industrialiser l'oscillateur saphir titane qui sera défini et caractérisé

par IFSW ; Oxford Lasers, société britannique spécialisée dans les systèmes de micro-usinage par laser qui est en charge pour TiSa-TD de réaliser une première intégration système avec une source produite par le projet et conjointement avec Femto-ST d'optimiser les procédés d'usinage en y incluant une comparaison des résultats obtenus par la technologie saphir titane avec ceux obtenus par la technologie ytterbium ; et enfin Thales Optronique, société française spécialisée dans les amplificateurs femtosecondes qui est en charge dans le cadre du projet TiSa-TD de réaliser deux dispositifs d'amplification, l'un de moyenne puissance, l'autre de forte puissance, utilisant les modules à disques minces réalisés par IFSW.

Situation du projet et perspectives

Les disques minces en saphir titane ont été tous fabriqués (incluant le polissage et le traitement) et une part a déjà été contactée sur les dissipateurs diamant réalisés par IFSW pour le projet. Les lames de diamant ont été réalisées et caractérisées par Element 6. Un premier module de gain à disque mince saphir titane destiné au premier amplificateur Thales est en cours de construction par IFSW qui en parallèle conduit des travaux préparatoires sur l'oscillateur de forte énergie en collaboration avec MSquared Lasers. Thales Optronique réalisera pour fin 2015 un premier amplificateur à disque mince saphir titane tandis que Oxford Lasers et Femto-ST ont engagé les travaux sur l'optimisation des procédés de micro-usinage. Les travaux de fin 2015 et de 2016 permettront donc de statuer sur les performances des oscillateurs et amplificateurs laser à base de disques minces de saphir titane contacté sur diamant synthétique transparent et sur les résultats de micro-usinage que ces sources pourront produire.

Stratégies frugales pour la fabrication d'instruments scientifiques basés sur la photonique à coût abordable

François PIUZZI

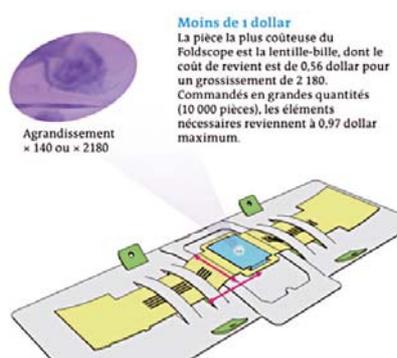
Groupe Physique pour le développement, Société Européenne de Physique

www.physdev.org piuzzifr@gmail.com

L'accès à l'instrumentation scientifique est essentiel pour le développement des pays à faibles ressources. Il conditionne les possibilités de mesure de paramètres physiques, chimiques et biologiques, en particulier pour la caractérisation des problèmes sociétaux comme la pollution atmosphérique, la pureté de l'eau, l'analyse de médicaments, la détection de maladies, le réchauffement climatique. Il est également important pour la formation universitaire en sciences expérimentales car il est indispensable pour la formation des étudiants, techniciens, expérimentateurs et chercheurs ainsi que pour la réalisation d'expériences scientifiques.

L'instrumentation scientifique reste chère et nécessite des conditions d'utilisation qui souvent ne sont pas à la portée des pays à faibles ressources, sans évoquer le problème de l'accessibilité aux pièces détachées, des consommables et de l'impossibilité de mesures de terrain.

Cette situation est en train de changer avec l'émergence de nouvelles méthodes : impression 3D, plateforme électronique open-source Arduino (www.arduino.cc), mini ordinateur à bas coût Raspberry Pi, mesures à distance avec des drones, ainsi que de nouvelles pratiques : science collaborative (*crowdsourcing*), matériel et logiciels en libre accès (hardware et software open source) et le libre accès à des articles scientifiques (comme PLOS, Public Library Of Science). Cette évolution est surtout due à des scientifiques solidaires, à des amateurs éclairés (*geeks*) ainsi qu'à l'émergence du DIY en science (*do it yourself*, voir www.instructables.com) qui a amené une croissance importante de la créativité. Le libre accès permet, comme pour des logiciels, d'améliorer petit à petit par la collaboration et le partage les instruments proposés. C'est également dû à une volonté de réaliser des mesures de manière indépendante dans le cas de problèmes sociétaux (Public Lab). En outre, l'évolution de la technologie permet maintenant



l'accès à des composants de haute technologie (souvent miniaturisés) pour des prix très bas car ils sont utilisés dans des appareils « grand public » notamment en photonique (détecteurs, caméras, LEDs du proche IR à l'UV, capteurs). La conjonction de l'évolution des logiciels, en particulier pour la cartographie, associée à la présence de GPS sur beaucoup d'accessoires permet la réalisation de cartographies à partir de mesures multiples pour caractériser la pollution par exemple (<http://publiclab.org/>).

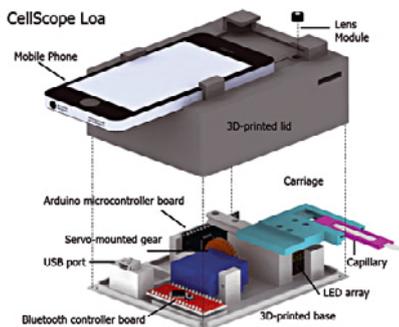
Il est maintenant possible que des scientifiques des pays à faibles ressources, après une formation de quelques mois, puissent concevoir et fabriquer localement des instruments scientifiques qui, s'ils ne sont pas l'équivalent des instruments haut de

gamme, permettent néanmoins de faire rentrer ces pays dans le domaine de l'instrumentation scientifique.

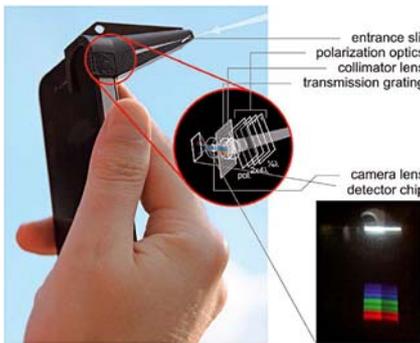
La photonique a toujours été partie prenante dans l'instrumentation scientifique car elle permet de maîtriser la lumière, outil de base de la mesure et de la caractérisation. Nous allons présenter des exemples de son utilisation « frugale » dans différents domaines en prenant le cas où l'instrument est conçu totalement de manière frugale, et celui où c'est un accessoire frugal qui est attaché à un équipement à coût plus élevé. Nous parlerons également de l'exemple de l'apport de la « science citoyenne » qui incite des citoyens à faire des mesures pour des scientifiques, ce qui a pour conséquence que le prix des équipements utilisés en grand nombre baisse rapidement.

La microscopie

Beaucoup de développements d'instruments à coût raisonnable concernent la microscopie car beaucoup d'applications y font appel. Récemment un microscope extrêmement frugal et créatif (coût < 1 \$) a été développé par Manu Prakash de Stanford [1] : du fait de sa méthode de construction, il a été appelé microscope



A schematic of the CellScope Loa device, a mobile phone-based video microscope. The device includes a 3D-printed case housing simple optics, circuitry and controllers to help process the sample of blood. CellScope Loa can quantify levels of the Loa bus parasitic worm directly from whole blood in less than 3 minutes. (Image by Mike D'Ambrosio and Matt Bakalar, Fletcher Lab, UC Berkeley)



origami ou « Foldscope ». Il est constitué de papiers pliés et d'une bille de verre utilisée comme lentille qui permet d'obtenir des grossissements jusqu'à $\times 2180$ [2].

Une autre solution utilisée dans la littérature est l'ajout d'une lentille extérieure à l'appareil photo d'un smartphone. De multiples solutions ont été développées, de la plus simple avec un support de lentille inclus dans une structure imprimée en 3D [3], jusqu'à l'option de lentille inverse [4]. Des applications pour la biologie sont également présentes dans la littérature avec par exemple le suivi en temps réel de la mobilité de cellules [5]. Une initiative de l'université de Berkeley (<http://cellscope.berkeley.edu/>) appelée *Aiding the world with mobile microscopy*

(aidons le monde par la microscopie mobile), a débouché sur la conception de microscopes liés à des téléphones mobiles pour réaliser des mesures sur le terrain. Les très bonnes performances permettent des applications à la détection de maladies comme la tuberculose et la malaria ainsi que des parasites dans le sang [6], des développements vers la médecine pour les pays à faible ressources comme la détection d'ulcères de la cornée [7]. La structure Cellscope a créé une start up pour les applications en médecine.

La spectrométrie

De la même manière on trouve beaucoup d'exemples dans la littérature qui utilisent un morceau de DVD comme réseau de diffraction, une webcam comme détecteur et une fibre plastique pour l'entrée, avec des performances tout à fait intéressantes pour des coûts inférieurs à 100 € [8]. L'impression 3D est utilisée pour réaliser les supports des différents composants ainsi que de l'enveloppe qui intègre les différents éléments constituant le spectromètre (domaine du spectre visible). Cela est très intéressant pour les travaux pratiques à l'université. Il est également possible d'adjoindre une extension (généralement imprimée en 3D) à un smartphone comprenant un réseau de diffraction et permettant d'obtenir directement le spectre sur l'écran. Des projets concernant la spectrométrie Raman sont en cours [9].

Un exemple intéressant est l'initiative « citoyenne » de mesures des aérosols par spectro-polarimétrie réalisées par un réseau de scientifiques citoyens en Hollande en utilisant l'ISPEC (<http://ispex.nl/en/>), un accessoire que l'on attache à un smartphone. Cela permet en liaison avec des mesures complémentaires de réaliser

la cartographie de la concentration d'aérosols dans le pays [10]. La production en masse de l'accessoire permet d'obtenir des coûts très bas.

Des spectromètres frugaux adaptés à la mesure de fluorescence pour la détermination de la nature de l'huile présente dans l'eau de mer ont été développés par la structure Public Lab [11]. La source d'excitation est un pointeur laser UV. Les LED UV sont également des sources de lumière d'excitation de choix pour la fluorescence.

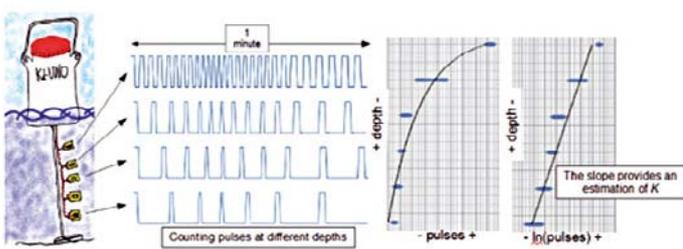
L'astronomie

L'approche frugale et le financement participatif ont permis à l'association non gouvernementale Astronomers Without Borders (AWB) de concevoir et fabriquer des télescopes performants et à bas coût comme le modèle ONESKY (200 \$) qui a été très bien noté par la revue *Sky and Telescopes* [12].

L'océanographie

Le projet européen citoyen Citclops [13] a réalisé des capteurs (KdUINO) pour mesurer le coefficient d'atténuation diffuse Kd relié à la transparence de l'eau des mers. Les capteurs sont accrochés à une bouée et ils transforment l'irradiance au niveau du capteur en impulsions de différentes fréquences. Les informations traitées sont ensuite transférées au bateau le plus proche.

Les stratégies frugales dont nous vous avons décrit ici quelques exemples permettent la conception et la réalisation d'instruments scientifiques performants et à un coût abordable en particulier pour les pays à faible ressources. Les méthodes mises en œuvre à l'origine dans ce but sont maintenant également utilisées dans les



milieux industriels. La principale qualité de ces méthodes est qu'elles permettent à la créativité des scientifiques (et citoyens avertis) de s'exprimer facilement.

Nous voudrions souligner l'apport important de l'impression 3D pour tous ces développements. Cette technique permet de réaliser des éléments importants pour l'utilisation de l'optique comme les supports de lentilles, de miroirs, des rails, supports de pointeurs laser, etc. Elle est d'autant plus importante pour les universités des pays à faibles ressources qui ne disposent pas d'ateliers de mécanique. Les fichiers 3D pour la plupart de ces éléments se trouvent en libre accès par exemple sur <http://www.thingiverse.com/>.

Pour une introduction aux stratégies frugales, on peut aussi consulter le livre de Josuah Pearce *Open-Source Lab: How to Build Your Own Hardware and Reduce Research Costs* (Elsevier, 2014). Les Fab Labs, dont le développement en France est récent, constituent une bonne

opportunité pour se former à l'impression 3D et au prototypage rapide.

Il faut rappeler que la plupart des développements que nous avons cités ici ont

été réalisés sous la licence CERN Open Hardware License 1.1 et les documents sous Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported License.

Pour en savoir plus

- [1] <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0098781>
- [2] http://abonnes.lemonde.fr/sciences/infographie/2014/04/01/le-foldscope-un-microscope-origami-a-moins-de-1-dollar_4393821_1650684.html?xtmc=microscope_origami&xtcr=1
- [3] <http://www.thingiverse.com/thing:280004>
- [4] <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4031072/pdf/pone.0095330.pdf>
- [5] <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0103547>
- [6] <http://newscenter.berkeley.edu/2015/05/06/video-cellscope-automates-detection-of-parasites/>
- [7] R.N. Maamari, S. Ausayakhun, T.P. Margolis, D.A. Fletcher, J.D. Keenan, Novel telemedicine device for diagnosis of corneal abrasions and ulcers in resource-poor settings, *JAMA Ophthalmol* **132**, 894-895 (2014)
- [8] <http://store.publiclab.org/products/desktop-spectrometry-kit-3-0>
- [9] <http://hackaday.io/project/1279-ramanpi-raman-spectrometer>
- [10] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2014GL061462/pdf>
- [11] <http://publiclab.org/wiki/oil-testing-kit>
- [12] <http://www.skyandtelescope.com/wp-content/uploads/OneSkyReflector.pdf>
- [13] http://www.citclops.eu/media/citclops/org/documents/publications/rbardaji_smallheader.pdf



Gagnez du temps

De la conception à la production

Pour tous vos nouveaux besoins, nous étudions et mettons en œuvre les meilleures solutions techniques pour fabriquer vos optiques spécifiques, en fonction de vos objectifs de coût et de performances. En utilisant dès le début de vos projets nos capacités de conception et de production de premier plan, vous éviterez un processus de requalification long et coûteux.

Contactez-nous au
+33 (0)1 30 12 06 80
ou visitez cvilaseroptics.com
pour en savoir plus.

CVI Laser Optics
Expertise to power your vision™

Rencontrez-nous sur le salon
Enova-Paris
22-24 septembre, Stand B28

Connectivité et lumière bleue

Tendances dans les technologies d'identification des codes à barres

Stefan LANGNER
Leuze electronic GmbH Owen (Allemagne)

L'identification des codes à barres reste à la base des solutions d'automatisation pour les systèmes de convoyage et de stockage. Le développement d'appareils est nettement influencé par des exigences en termes de débits qui ne cessent d'augmenter, mais aussi de disponibilité et de facilité d'implémentation. La tendance actuelle va à l'utilisation de lumière laser bleue, une connectivité intégrée et un design bien conçu.

Les LED rouges existent depuis presque 50 ans. Cependant, les scientifiques et les industriels qui tentaient de développer une diode bleue pour une utilisation commerciale ont échoué pendant trois décennies. Il y avait de quoi s'arracher les cheveux.

Isamu Akasaki, Hiroshi Amano et Shuji Nakamura ont été les premiers à relever ce défi technique en générant de la lumière bleue à partir de matériau semi-conducteur. Au début des années 1990, les scientifiques japonais ont réussi à cultiver du nitrure de gallium (GaN), un matériau semi-conducteur de haute qualité qui permet de produire de la lumière bleue. Les premières LED performantes sont arrivées sur le marché au milieu des années 90. En 2014, les trois chercheurs japonais ont obtenu le prix Nobel de physique pour leurs travaux.

Si, par le passé, l'utilisation des LED bleues était peu rentable en raison de leur prix élevé, à la date d'aujourd'hui, leur emploi commercial progresse allègrement. Désormais, les LED bleues sont utilisées dans les nouvelles générations de lecteurs de codes à barres. La diode laser bleue à ondes courtes permet en effet un gain de 50 % en profondeur de champ par rapport aux lecteurs à rayon laser de lumière rouge. Globalement, cela représente un avantage imbattable pour la lecture des codes avec de très petites épaisseurs de modules (largeurs de barres) pouvant atteindre 0,35 mm.

Une identification rapide et sûre

La détection rapide et sûre apporte une contribution significative à la grande puissance des installations de convoyage. Un grand débit, combiné à une disponibilité des installations et une sécurité des processus optimales, est ici au premier plan. Des vitesses de balayage élevées, différents champs de lecture et des technologies de lecture sophistiquées sont de rigueur dans les lecteurs, parmi lesquels on trouve aussi des modèles à miroir pivotant.

Avec une vitesse de 1000 balayages par seconde, les scanners ultrarapides actuels (tels que le lecteur BCL 600i de Leuze Electronic) peuvent être employés dans des processus extrêmement rapides. La technologie des fragments de code (CRT) apporte pour cela une sécurité de lecture accrue. Alors que, pour certaines applications, le code à barres peut être saisi complètement avec une ligne de balayage continue, pour d'autres, cela peut être exclu selon les besoins. Avec la CRT, les codes sont lus plusieurs fois, décalés, même s'ils sont largement inclinés par rapport à l'axe central. Ensuite, au moyen des éléments qui se superposent, les fragments individuels sont refusionnés en un résultat global par le logiciel du lecteur. Les avantages de cette technologie sont manifestes dans les cas où les étiquettes sont déformées, de petite



Figure 1. Lecteur de codes à barres moderne à lumière laser bleue dans le nouveau design Leuze Electronic.

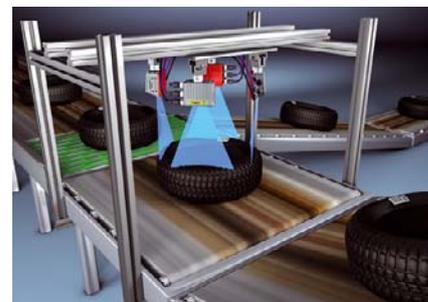


Figure 2. Lecture de codes omnidirectionnelle avec des portiques modulaires de scannage (MSP).

taille ou en mouvement rapide. Même les codes partiellement endommagés ou sales peuvent être décodés. Cela accroît le taux de lecture et donc la disponibilité des installations.

La lecture d'étiquettes à codes à barres non alignées requiert en général au moins deux scanners de codes à barres alignés entre eux. Certains constructeurs répondent à cette demande au moyen de portiques modulaires de scannage (MSP), des systèmes modulaires prémontés qui permettent de lire les codes de manière omnidirectionnelle.

Comprendre la CRDS pulsée

Nathalie LAMOUREUX

Laboratoire Physico-chimie des Processus de la Combustion et de l'Atmosphère, PC2A, UMR 8522 Lille 1/CNRS

nathalie.lamoureux@univ-lille1.fr

L'acronyme CRDS signifie *cavity ring down spectroscopy* et peut être traduit en français par « spectroscopie à temps de déclin d'une cavité optique » (ou spectroscopie par temps d'amortissement de résonance, STAR [1]). Cette technique, initialement dédiée à la mesure des coefficients de réflexion de miroirs, a été appliquée pour la première fois par O'Keefe et Deacon en 1988 à la mesure par spectroscopie d'absorption d'une espèce moléculaire avec une sensibilité de 10^{-6} par cm [2]. Depuis, des variantes de la technique ont été proposées ; cw-CRDS (*continuous wave CRDS*), BB-CEAS (*broad band cavity enhanced absorption spectroscopy*), PS-CRDS (*phase shift CRDS*), ICLAS (*intra cavity laser absorption*)... Dans cet article, nous présentons le principe de la CRDS pulsée et quelques applications aux mesures en combustion.

Absorption/absorbance

La technique CRDS est une méthode d'absorption et repose sur la loi de Beer-Lambert qui établit une relation de proportionnalité entre l'absorption d'un faisceau de lumière monochromatique dans un milieu homogène et isotrope, le trajet optique du faisceau et la concentration d'une espèce selon l'expression :

$$I_t = I_0 \exp(-\alpha \ell)$$

I_0 et I_t sont respectivement les intensités incidente et transmise du faisceau, ℓ est la longueur du trajet optique. α (exprimé en cm^{-1}) est le coefficient d'absorption du milieu qui est égal au produit de la section efficace d'absorption σ (en $\text{cm}^{-1}/(\text{molécule cm}^{-3})$) et de la concentration de l'espèce absorbante (en molécule cm^{-3}). Les termes σ et α dépendent de la longueur d'onde du faisceau et de la température du milieu. Cependant,

la loi de Beer-Lambert n'est vérifiée que si le milieu est optiquement mince, c'est-à-dire lorsque $\alpha \ell \ll 1$. La méthode d'absorption la plus simple consiste à mesurer l'atténuation du signal lumineux lors de son trajet dans le milieu absorbant de longueur ℓ , comme le montre la figure 1. Cela suppose de pouvoir mesurer avec précision une différence d'intensité de lumière, sachant qu'il est souvent délicat d'avoir une source de lumière parfaitement stable en intensité. L'augmentation de la sensibilité de la technique passe par l'augmentation du trajet optique, soit en augmentant la longueur du dispositif, soit en utilisant des miroirs qui vont permettre d'accroître le trajet optique en multipliant le nombre de réflexions de la lumière dans la cellule de mesure (absorption multi-passage). Dans ces conditions, l'atténuation d'intensité mesurable est de l'ordre de 10^{-3} , soit une sensibilité de 10^{-3} par cm.

SciencTec
La SoluTion à vos mesures

NOUVEAU
Luxmètre CL-70F
Sources lumineuses et LED

Précision et Résolution



KONICA MINOLTA

Mesure & évaluation

- Éclairage lumineux
- Température de couleur
- Indice de Rendu des Couleurs (IRC)
- Spectre



- Facile d'utilisation
- Grand écran couleur
- Portable & tactile
- Personnalisable
- Logiciel inclus
- Récepteur rotatif (180°)



SciencTec c'est aussi...

- Spectroradiomètres
- Vidéo-colorimètres
- Photomètres
- Luxmètres
- Chromamètres
- Sources de référence



info@sciencTec.fr / www.sciencTec.fr
01.64.53.27.00

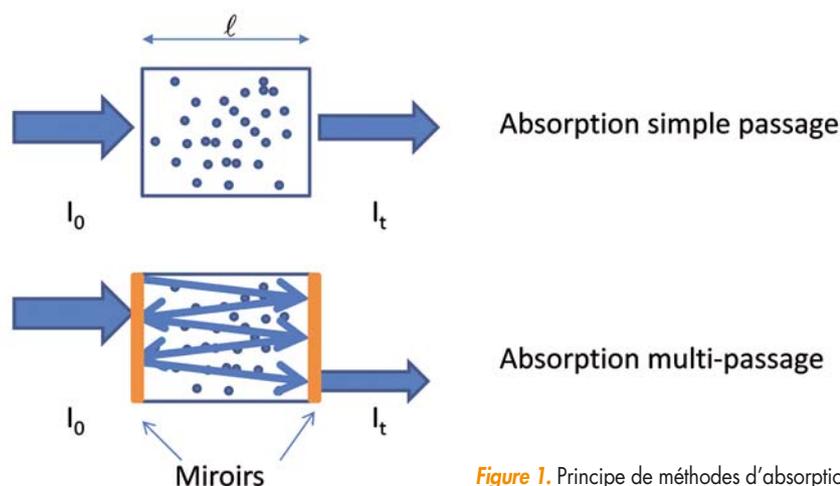


Figure 1. Principe de méthodes d'absorption.

Principe général de la CRDS

Le principe de la CRDS repose sur la mesure de la vitesse de déclin de l'intensité de la lumière dans une cavité optique, plutôt que sur l'amplitude d'absorption. De façon simple, la CRDS consiste à mesurer le temps de vie d'une impulsion laser qui effectue de très nombreux allers et retours entre les deux miroirs hautement réfléchissants de la cavité optique (coefficient de réflexion, R). L'intensité du pulse décroît dans la cavité du fait de l'absorption des molécules et des pertes à chaque réflexion sur les miroirs. À chaque fois que l'impulsion est réfléchiée, une faible fraction de l'intensité est transmise (I_1, I_2, \dots, I_n). Après n allers-retours, l'intensité transmise s'exprime selon :

$$I_n = I_0 R^{2n} \exp(-2n\alpha\ell)$$

Un détecteur placé en sortie de la cavité permet de mesurer l'intensité transmise en fonction du temps comme le montre

la figure 2. On peut alors remplacer la valeur discrète n par le temps rapporté à $t = n2d/c$ (c étant la célérité de la lumière, d la distance entre les miroirs). Compte tenu du fait que le coefficient de réflexion des miroirs est proche de 1 ($\ln R \approx -(1 - R)$), la décroissance temporelle de l'intensité peut s'exprimer selon une loi exponentielle :

$$I(t) = I_0 \exp\left(-\frac{tc}{d}(1-R+\alpha\ell)\right) = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

La CRDS repose donc sur la mesure du temps de déclin ou temps de vie de l'impulsion laser dans la cavité, τ . En absence d'absorption dans la cavité ($\alpha = 0$), le temps de vie s'exprime selon :

$$\tau_0 = \frac{d}{c[(1-R)]}$$

La présence d'un milieu absorbant dans la cavité ($\alpha \neq 0$) entraîne l'augmentation de la vitesse de déclin de l'impulsion et τ s'exprime selon :

$$\tau = \frac{d}{c[(1-R)+k]}$$

L'absorbance ($k = \alpha\ell$) peut être déterminée par comparaison des inverses des temps de vie mesurés respectivement avec et sans absorption :

$$k = \frac{d}{c} \left(\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_0} \right)$$

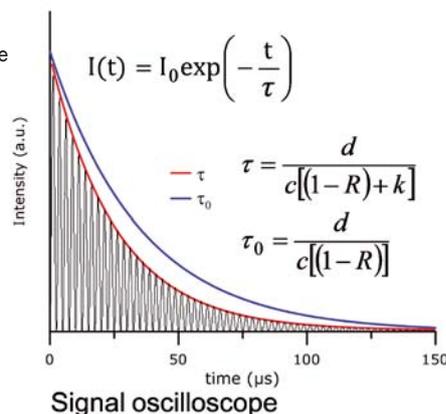
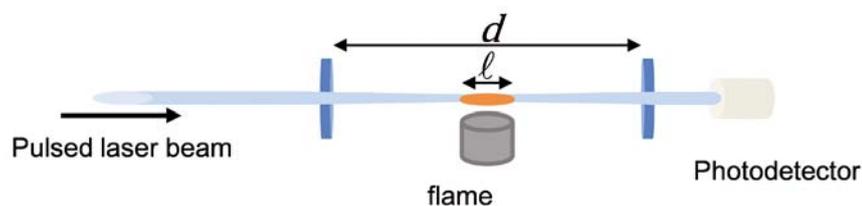
Lors d'une mesure CRDS, le temps de vie τ est mesuré en fonction de la pulsation de la radiation $\omega = 2\pi c/\lambda$, où λ est la longueur d'onde. Ceci permet de tracer un spectre des pertes par passage ($d/c\tau$) en fonction de ω , dont la ligne de base correspond aux pertes liées aux coefficients de réflexion des miroirs ($1 - R$). En retranchant cette ligne de base, on obtient le spectre d'absorbance $k(\omega)$. Il est important de noter que la longueur d'absorbance ℓ n'est pas nécessairement égale à la distance entre les miroirs d . La méthode ne nécessite pas de connaître les coefficients de réflexion des miroirs. Lors des études en flamme ou dans les plasmas, le milieu réactif est placé au centre de la cavité optique [3,4], comme le montre la figure 2.

Sensibilité de la CRDS

La puissance de la CRDS réside dans sa sensibilité. La technique permet d'une part de s'affranchir des fluctuations de l'intensité de la lumière incidente. D'autre part, le trajet optique dans la cavité augmente considérablement, et ceci d'autant plus que le traitement des miroirs est hautement réfléchissant. La limite de détection par absorption peut s'exprimer selon :

$$\left[\frac{\alpha\ell}{d} \right]_{\min} = \frac{1-R}{d} \left(\frac{\Delta\tau}{\tau} \right)_{\min}$$

Figure 2. Schéma de principe de la CRDS. R est le coefficient de réflexion des miroirs ; d , la distance entre les miroirs ; ℓ , la longueur d'absorbance ; c , la célérité de la lumière ; k , l'absorbance.



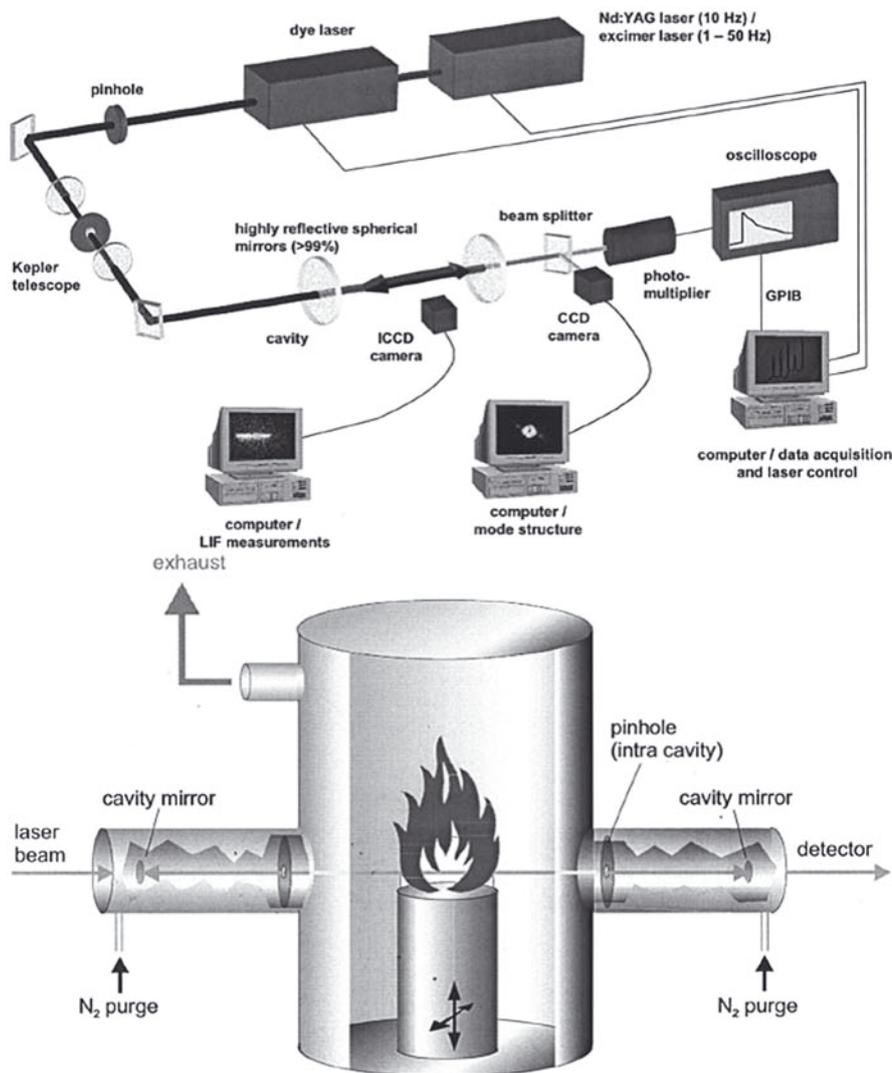


Figure 3. Dispositif expérimental de mesures CRDS dans une flamme, extrait de [3] avec la permission de The Optical Society.

Il est ainsi possible d'avoir une sensibilité de 3 à 4 ordres de grandeur supérieure à celle de l'absorption simple. Dans le domaine de l'infrarouge, la qualité de traitement des miroirs permet d'avoir des coefficients de réflexion supérieurs à 99,99 %. Cependant, dans le domaine du visible et de l'UV, les techniques de traitement ne permettent d'avoir des coefficients que de l'ordre de 99,5 % à 99,9 %. Cela se traduit par une sensibilité un peu moindre de la technique qui reste toutefois très élevée.

Prenons l'exemple d'une cavité de 50 cm, avec des miroirs de réflexion $R = 99,8 \%$, la distance effective parcourue par le rayonnement est de 250 m. Si la précision de mesure du temps de vie est de 0,5 %, le minimum détectable d'absorption est

égal à $2.10^{-5} \text{ cm}^{-1}$. Si on prend des miroirs avec $R = 99,99 \%$, le trajet effectif est égal à 5 km et le minimum détectable d'absorption est égal à $1.10^{-6} \text{ cm}^{-1}$.¹

Mise en œuvre de la CRDS pulsée en combustion

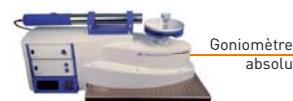
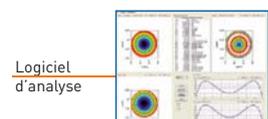
Dans cet article, nous nous limiterons au cas de la CRDS pulsée. Cette technique est en effet mieux adaptée aux mesures réalisées dans des milieux à fort gradient de température (flammes, plasma, ...). Dans ce cas, comme l'illustre la figure 3, la flamme est située au centre de la cavité

¹ Dans ce cas, si la distance d'absorption est égale à 5 cm, et que l'espèce absorbante présente une section efficace d'absorption égale à $1.10^{-16} \text{ cm}^2 / (\text{molécule cm}^3)$ à 5 kPa et 1500 K, le minimum détectable en fraction molaire de l'espèce est égal à 0,4 ppm.



UN UNIVERS DE PRÉCISION

- Solutions complètes pour le test des systèmes optiques
- Interféromètres, goniomètres, collimateurs, autocollimateurs, bancs de tests, bancs de FTM...
- Mesure de focale, centrage, front d'onde, FTM, topographie...
- Applications en R & D et production.
- Développements spéciaux.



TRIOPTICS France
Tél: 04 72 44 02 03
Fax: 04 72 44 05 06
www.trioptics.fr

optique. Le brûleur est mobile en translation (longitudinalement ou radialement). Comme toute mesure par absorption, la CRDS est une technique de mesure intégrée le long de l'axe laser. Dans ces applications, le mélange n'est pas homogène dans la cavité, mais on peut assimiler la longueur du volume de mesure associée au diamètre de la flamme.

Les propriétés de la cavité optique

La cavité optique doit présenter certaines spécificités qui sont bien décrites par Siegman [5]. Nous n'énonçons ici que les notions simplifiées.

❶ La cavité doit être optiquement stable. Le rayon de courbure des miroirs (*r*) est choisi en fonction de la dimension de la cavité (*d*) pour respecter $0 < d < 2r$. En pratique, dans le cas de la CRDS, on dénombre 3 types de cavités.

- Les cavités confocales pour lesquelles la distance entre les miroirs est égale au rayon de courbure des miroirs ($d = r$).
- Les cavités quasi-planes pour lesquelles le rayon de courbure des miroirs est infiniment grand devant la distance *d* ($r \gg d$). Dans cette configuration, le diamètre du faisceau est quasi constant le long de l'axe longitudinal de la cavité. Cette configuration est souvent choisie pour les mesures réalisées dans une cellule d'absorption dans laquelle le mélange est homogène.
- Les cavités quasi-concentriques pour lesquelles la distance entre les miroirs est voisine de $2r$. Dans ce cas, le faisceau est très étroit au centre de la cavité. On préférera cette dernière configuration dans le cas où les mesures sont réalisées au centre de la cavité optique. Elle offre en effet la meilleure résolution spatiale.

❷ Elle doit être résonante de façon à transmettre l'intensité lumineuse selon la théorie de Fabry-Pérot. L'intervalle spectral libre (ISL ou FSR - *free spectral range*) défini par $c/2d$ correspond à l'intervalle en fréquence des modes de résonance de la cavité. Seules les fréquences du laser en résonance avec l'un des modes de la cavité sont transmises. Cette condition est vérifiée si la fréquence du laser (ν) est égale à un multiple entier de l'intervalle spectral libre.

Injection de l'impulsion laser dans la cavité

La structure de mode de la cavité peut poser différents problèmes. Lorsqu'on travaille avec une source laser pulsée, la largeur de raie laser est généralement très grande devant l'espacement des modes de la cavité. Dans ce cas, quelle que soit la fréquence d'excitation du laser, il y a toujours au moins un mode de transmission de la cavité qui est excité. Au contraire lorsqu'on travaille avec une source très fine spectralement (typiquement avec les sources continues), il faut adapter la dimension de la cavité à la fréquence d'excitation.

Il est par ailleurs préférable de s'assurer que seuls les modes transverses longitudinaux TEM₀₀² de la cavité sont excités [2,6]. Pour cela, il convient de réaliser un montage optique généralement constitué de 2 lentilles et d'un *pinhole* pour injecter le laser selon les modes TEM₀₀ de la cavité. Le dimensionnement du montage optique et de la cavité est régi par les lois de l'optique gaussienne. Cette mise en forme du faisceau laser permet par ailleurs d'améliorer la résolution spatiale du dispositif optique.

Mesure de la décroissance temporelle

Un détecteur photonique (photodiode ou photomultiplicateur) situé à la sortie de la cavité optique permet de mesurer l'intensité du signal transmis par celle-ci en temps réel. Le détecteur est associé à un oscilloscope ou une carte d'acquisition, en

²TEM₀₀ désigne le mode fondamental des modes électromagnétiques transverses (TEM) de la cavité laser. On parle également du mode gaussien.

lien avec un ordinateur. Il est nécessaire de traiter en temps réel la détermination du temps de vie τ à partir de la mesure de la décroissance temporelle exponentielle du signal CRDS. Rappelons que la sensibilité de la technique est liée à la précision de la mesure de τ . Il est, par exemple, important de ne pas intégrer dans le traitement numérique le bruit qui a un effet conséquent sur la détermination de τ .

Aspect quantitatif de la mesure par CRDS

Lorsqu'on travaille en CRDS avec des sources laser accordables à colorant et pulsées (généralement présentant une largeur spectrale minimale de $0,05 \text{ cm}^{-1}$), la largeur spectrale du laser est plus grande que l'intervalle spectral libre, assurant la transmission de l'intensité laser sur plusieurs modes comme le montre la *figure 4*.

En réalité, le signal lumineux est transmis par la cavité CRDS selon les modes longitudinaux ω_m . Chacun de ces modes subit une vitesse de perte propre, et le signal s'exprime par la somme des pertes individuelles sur les modes ω_m selon [7] :

$$I(t, \omega) = \sum_m I_0(\omega) T(\omega_m) \exp \left[-t(1-R+k(\omega_m)) \frac{c}{d} \right]$$

Il faut prendre des précautions supplémentaires afin de s'assurer que le temps de déclin est représentatif d'une mesure quantitative. En effet, l'interprétation de la mesure repose sur une décroissance mono-exponentielle du temps de déclin.

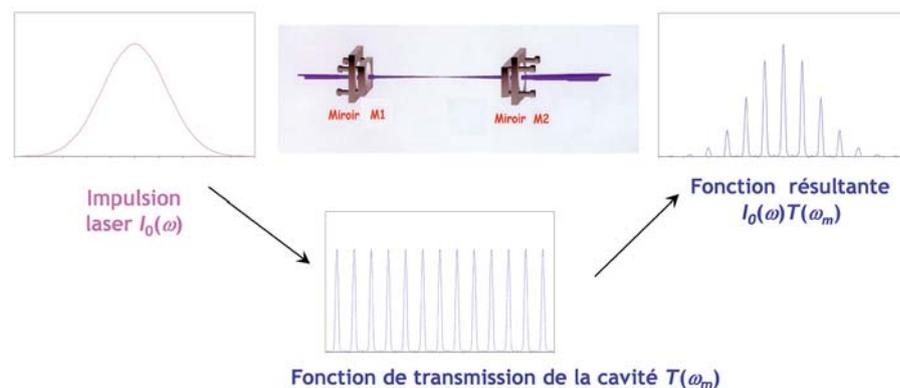


Figure 4. Modes de transmission d'une impulsion laser large spectralement (par exemple, un laser à colorant) dans une cavité optique CRDS.

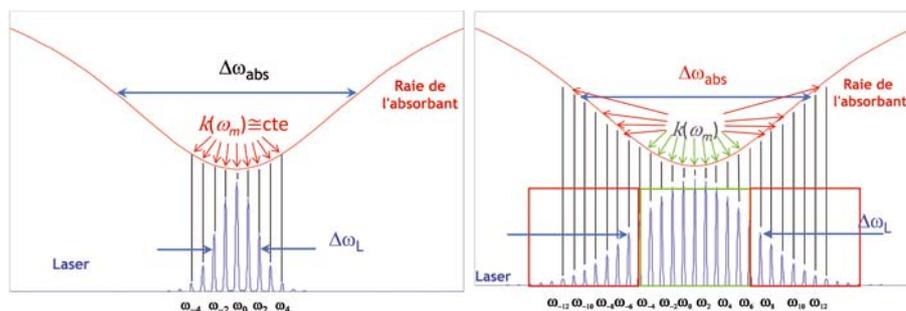


Figure 5. Modes de transmission de la cavité CRDS dans l'échelle des nombres d'onde dans un milieu absorbant centré sur ω_0 lorsque $\Delta\omega_L \ll \Delta\omega_{abs}$ (à droite) ou $\Delta\omega_L \cong \Delta\omega_{abs}$ (à gauche).

Deux cas de figure peuvent se présenter comme le montre la figure 5.

- Si la raie laser ($\Delta\omega_L$) est inférieure à la raie d'absorption de la molécule ($\Delta\omega_{abs}$), on peut alors faire l'approximation que tous les modes TEM₀₀ excités par le laser sont affectés de la même vitesse de pertes dues à l'absorption de la molécule ($k(\omega_m)$ reste constante pour tous les ω_m excités). La décroissance mono-exponentielle du temps de déclin de la cavité est alors vérifiée.
- Si la raie laser se caractérise par une largeur similaire à celle de la raie d'absorption de la molécule, les modes de transmission centrés sur la raie d'absorption subissent une vitesse de perte plus importante que ceux situés en périphérie. Dans ce cas, le caractère mono exponentiel de la décroissance temporelle n'est plus garanti. Il est alors nécessaire de prendre en compte le caractère multi exponentiel de la décroissance temporelle du signal afin d'accéder à une mesure quantitative [7,8].

Application de la CRDS aux mesures en flammes

De nombreux exemples d'applications de la CRDS pulsée pour des études en combustion sont répertoriés dans la littérature. Une synthèse des espèces détectées en flamme est reportée dans un ouvrage récent dédié à la technique CRDS [9].

En pratique, les pertes sont non seulement dues à la réflexion des miroirs et à l'absorption, mais également liées aux diffusions de Mie et Rayleigh dans la

cavité. Ces pertes sont indépendantes de la longueur d'onde de la radiation laser et le principe de mesure du temps de vie hors absorption permet de déterminer l'ensemble des pertes non absorbantes.

Obtention de spectres d'absorption

La technique CRDS permet d'obtenir des spectres d'absorption. La mesure du temps de vie mesurée en fonction de la longueur d'onde (ou de la pulsation) est convertie en pertes par passage ou absorbance (αL) en assimilant la ligne de base à la mesure du temps de vie sans absorption. Une illustration d'un spectre du radical NCO mesuré à 2000 K est présentée à la figure 6. Ce spectre a été mesuré au sein d'une flamme avec une absorbance maximale³ de 130 ppm, soit une atténuation de 2.10^{-5} par cm. Dans ce travail, la flamme plate d'un diamètre de 6 cm était placée au centre d'une cavité optique de 42 cm de long, et la fraction molaire de NCO a été mesurée égale à 20 ppm.

Analyse des mesures : détermination des concentrations d'espèces

Si la section efficace d'absorption $\sigma(\omega)$ de l'espèce est connue, la mesure effectuée par CRDS comme toute mesure d'absorption permet également de déterminer la concentration absolue de l'espèce. On peut faire une mesure soit par absorptivité intégrée, soit au pic de la raie d'absorption. Dans le premier cas, lorsque la molécule présente un spectre de raies, on peut mesurer une des raies d'absorption de l'espèce en effectuant un balayage en longueur d'onde du laser autour de

³ L'absorbance (ou pertes par passage) n'ayant pas d'unité, elle est souvent précisée en ppm.

acal | bfi

MAÎTRISEZ VOTRE LUMIÈRE



ANALYSEZ

Distribution spectrale



Uniformité



Gonio-photométrie



METTEZ EN FORME

Diffusion



Homogénéité



Piège



Absorption



Focalisation



N'hésitez pas à nous solliciter

T +33 (0)1 60 79 59 06 - photonique.fr@acalbfi.fr

www.acalbfi.fr

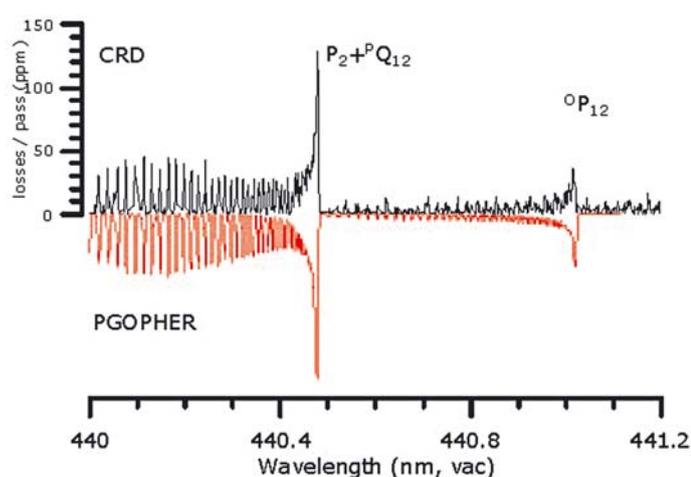


Figure 6. Comparaison entre un spectre simulé et un spectre expérimental de NCO mesuré dans une flamme à une température de 2000 K [10].

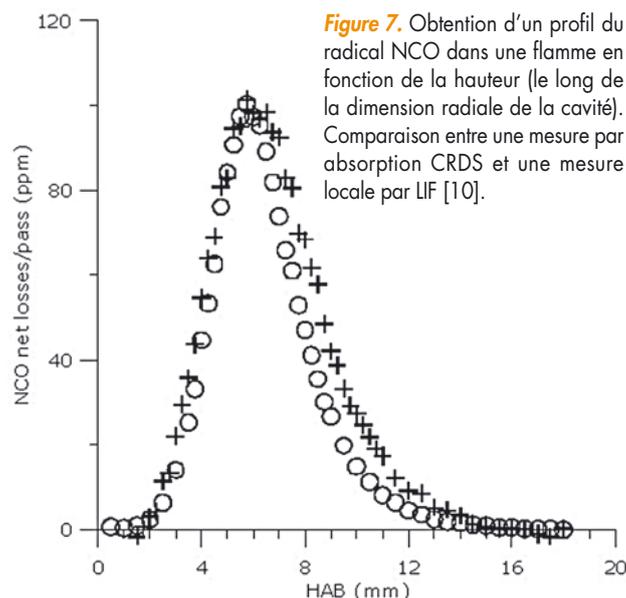


Figure 7. Obtention d'un profil du radical NCO dans une flamme en fonction de la hauteur (le long de la dimension radiale de la cavité). Comparaison entre une mesure par absorption CRDS et une mesure locale par LIF [10].

celle-ci. La détermination de l'absorptivité intégrée permet de déterminer la concentration de l'espèce à partir de la force de raie $I(\omega_0)$ et ne requiert pas de connaître la largeur spectrale du laser, selon :

$$A(\omega) = \int \sigma(\omega) N \ell d\omega = I(\omega_0) N \ell = f_B(T, \omega_0) h b \omega_0 N \ell$$

$f_B(T, \omega_0)$ est le facteur de Boltzmann à la température T , h est la constante de Planck, b est le coefficient d'Einstein pour l'absorption à la transition ω_0 (normalisé par c).

Dans le deuxième cas, on fait successivement la mesure du temps de vie au pic de la raie d'absorption et à une longueur d'onde hors absorption pour déterminer les pertes par absorption $k(\omega_0)$:

$$k(\omega_0) = \sigma(\omega_0) N \ell = I(\omega_0) g(\omega_0) N \ell$$

Il faut déterminer la fonction d'élargissement laser $g(\omega)$ (avec $\int g(\omega) d\omega = 1$).

On fait l'hypothèse que le mélange est homogène le long du diamètre de la flamme, ℓ . Celle-ci peut être vérifiée par comparaison des mesures relatives réalisées localement par fluorescence induite par laser (LIF, *laser induced fluorescence*) et des mesures par absorption CRDS comme le montre la figure 7. Notons que si dans le volume de mesure, le mélange n'est pas homogène mais présente au moins un axe de symétrie, on peut traiter la mesure de l'absorption par une inversion d'Abel.

Performances et variantes de la CRDS

La performance de la CRDS pulsée a été démontrée, et permet de mesurer des espèces traces avec une sensibilité de l'ordre de 10^{-6} cm^{-1} . Cette technique, relativement simple à mettre en œuvre, est applicable aux mesures dans des milieux complexes tels que ceux rencontrés dans les études en combustion ou plasma, avec la présence d'un fort gradient thermique. Cependant, avec les sources pulsées, plusieurs modes longitudinaux de la cavité sont excités et cela entraîne des limitations de la sensibilité. L'une des premières variantes de la CRDS est la cw-CRDS. Dans ce cas, les sources continues qui offrent généralement une largeur spectrale fine (10^{-2} cm^{-1}) permettent de n'exciter qu'un seul mode de la cavité. La sensibilité de la cw-CRDS est de l'ordre de 10^{-9} cm^{-1} . Cependant, la mise en œuvre de cette technique est plus délicate (optimisation de la longueur de la cavité avec la fréquence de la source) et n'est applicable que dans des cellules homogènes.

Pour en savoir plus sur la technique CRDS et ses variantes, nous recommandons l'ouvrage édité par Berden et Engeln [9].

Références

- [1] S. Kassi, D. Romanini, Spectromètre laser à amplification résonante d'absorption. Applications à la mesure de trace de gaz, Tech. Ing. RE-100 (2008)
- [2] A. O'Keefe, D.A.G Deacon, Cavity Ring-Down spectrometer for absorption measurements using pulsed laser sources, Rev. Sci. Instr. 59(12) (1988) 2544-2551
- [3] A. Schocker, K. Kohse-Höinghaus, A. Brockhinke, Quantitative determination of combustion intermediates with cavity ring-down spectroscopy: systematic study in propene flames near the soot-formation limit, Appl. Opt. 44(31) (2005) 6660-6672
- [4] G.D. Stancu, F. Kaddouri, D.A. Lacoste, C.O. Laux, Atmospheric pressure plasma diagnostics by OES, CRDS and TALIF, J. Phys. D: Appl. Phys. 43(12) (2010) 124002
- [5] A. Siegman, Lasers, University Sciences Books, Mill Valley, CA (1986)
- [6] D. Romanini, A.A. Kachanov, F. Stoeckel, Cavity ringdown spectroscopy: broad band absolute absorption measurements, Chem. Phys. Lett. 270(5-6) (1997) 546-550
- [7] P. Zalicki, R.N. Zare, Ring-Down Spectroscopy for absorption measurements, J. Chem. Phys. 102(7) (1995) 2708-2717
- [8] X. Mercier, E. Therssen, J.F. Pauwels, P. Desgroux, Comb. Flame 124(4) (2001) 656-667
- [9] G. Berden, R. Engeln, Cavity Ring-Down Spectroscopy : Techniques and Applications, John Wiley and Sons, Inc.

L'auteur souhaite exprimer ses remerciements à ses collègues Pascale Desgroux et Xavier Mercier.

■ Caméra scientifique IR

First Light Imaging s'apprête à lancer sa caméra scientifique infrarouge C-Red, présentée comme innovante en termes de sensibilité et de vitesse associée (1750 fps pour un bruit de lecture inférieur à un électron). Il est d'ores et déjà possible de consulter en ligne les spécificités techniques, et suivre les étapes de R&D, les actualités et les dernières informations sur la fabrication.

www.firstlight.fr/c-red-one-project/



■ Laser femtoseconde



Light Conversion lance le laser femtoseconde CARBIDE, refroidi par air et compact (650 x 210 x 200 mm). Toute l'électronique de contrôle et les diodes de pompe sont incluses dans la tête laser, qui se branche directement à une prise secteur. La puissance est > 5 W @1028 nm avec des énergies par impulsion > 85 µJ. Le taux de répétition est variable de 50 à 1000 kHz, et des durées d'impulsions vont de 300 fs à 10 ps, le tout contrôlé par ordinateur.

www.rofin.fr

■ Capteur de couleur/ proximité pour smart devices



Hamamatsu Photonics a développé un capteur multifonction intégrant un capteur de couleur, un capteur de proximité, ainsi que 3 LED de couleur RGB, le tout dans un boîtier CMS (5,5 x 1,7 x 1,0 mm) de type flip-chip et piloté via une interface I2C. Le P12347-01CT est destiné aux smart devices, pour des applications telles que la gestion d'énergie d'un écran (marche/arrêt selon la proximité d'un visage ou d'une main), ou la gestion de la qualité d'image (couleurs, luminance/contraste).

www.hamamatsu.fr

■ Filtre de protection laser

Acal BFi propose le filtre bleu P1P10 de protection laser absorbant en polycarbonate, disponible en fenêtres de protection allant jusqu'à 2 x 3 m avec deux épaisseurs au choix (3 mm et 6 mm), et en lunettes de protection laser. Sa densité optique de 800 à 11 000 nm et sa transmission dans le visible d'environ 16 % sont complétés d'une bonne reconnaissance des couleurs. Adapté aux diodes laser à 980 nm, lasers Nd:YAG, lasers fibrés et disques laser, il est certifié CE et homologué EN 207 ; homologué DLB6 et IRMLB8 de 1030 à 1400 nm et RB1 de 670 à 700 nm pour les travaux d'alignement.

www.acalbfi.com



Leybold Optics est à présent Bühler.

Optique de précision

La HELIOS est conçue pour des dépôts par pulvérisation cathodique dans les domaines d'applications spatiale, l'astronomie, la télécommunication optique, l'optique instrumentale, la biologie médicale, et les filtres notch, UV et VIS.

Elle est totalement automatisée et réalise des dépôts optique de haute qualité, très précis et très homogènes.

Notre adresse et site internet:

Bühler SAS

Paris Nord 2, 22 avenue des nations

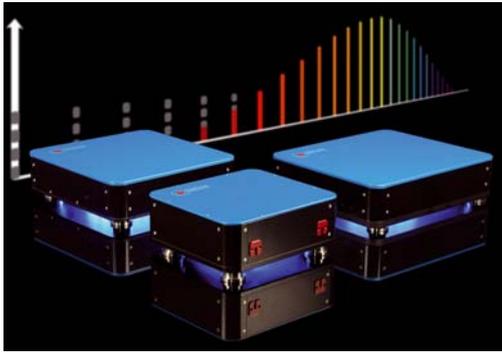
T + 33 6 0766 72 58, F + 33 1 49 89 60 55

yvonne.bonnin-degner@buhlergroup.com

www.buhlergroup.com

BUHLER

■ **Peigne de fréquences**



Opton Laser, distributeur de Toptica Photonics en France, présente son nouveau peigne de fréquences. Ce peigne sans offset obtenu par différence de fréquences s'appuie sur la technologie CERO (zero fceo). Il est proposé comme complément aux lasers à cavités externes et électroniques de stabilisation fabriqués par Toptica.

www.optonlaser.com

■ **Caméras stéréo 3D**

IDS propose les caméras Ensenso stéréo 3D, étanches à la poussière et à l'eau (IP65/67) et supportant une immersion jusqu'à 1 m de profondeur. Leurs deux capteurs intégrés CMOS 1,3 MP permettent des taux de fréquence d'images élevés, pour la capture de données 3D d'objets en mouvement. Les longueurs de câble peuvent atteindre 100 m tandis que les connecteurs GPIO à vis, pour le déclenchement et le flash, les prédisposent à une utilisation industrielle.

www.ids-imaging.fr

■ **Hexapode pour alignement de fibres**

Le H-206 de Physik Instrumente est dédié à l'alignement de fibres optiques. Son ensemble de plateformes amovibles permet d'installer supports de fibres et composants optiques au plus près du point d'intérêt. Il offre des résolutions de 0,1 µm et 2 µrad. Le système peut être proposé avec un contrôleur intégrant un photomètre (visible et IR) ou provenant d'une source de tension analogique 0-10 V. Un ensemble de routines de scan est également à la disposition de l'utilisateur pour automatiser et optimiser les phases d'alignement.

www.physikinstrumente.com



■ **Kit de développement pour détecteurs IR**

Afin de permettre aux utilisateurs de trouver rapidement la configuration la mieux adaptée à leur application, Laser Components propose un kit de développement pour les détecteurs pyroélectriques et les détecteurs PbSe non refroidis, incluant des sources de rayonnement adaptées. Ce kit de fonctionne de manière autonome avec un ordinateur mono-carte, ainsi qu'avec des modules d'émission et réception. Les résultats de mesure sont affichés sur un écran tactile qui est également utilisé pour contrôler l'appareil. Une carte mémoire permet de stocker les données, tandis qu'une sortie analogique gère le signal amplifié.

www.lasercomponents.com



■ **Hexapode forte charge**

Conçu pour positionner de fortes charges allant jusqu'à 400 kg avec une résolution de 50 nm, l'hexapode Zonda de Symétrie offre des courses de 400 mm en XY, 300 mm en Z et 40° dans les 3 rotations Rx, Ry, Rz. L'intégration de composants en Invar (coefficient de dilatation thermique de 1 µm/m/°C), les codeurs absolus linéaires intégrés en standard dans les actionneurs et la conception d'articulations rigides, autorisent précision et stabilité thermique. L'hexapode est livré avec son contrôleur et une interface logicielle compatible LabVIEW, EPICS, SPEC, TANGO ou C ; il peut être, en option, compatible vide ou salle blanche.

www.symetrie.fr



■ **Platine de nanositionnement hybride**



Optophase propose la platine de nanositionnement développée par la société française Piezoconcept, qui combine une platine de micropositionnement manuelle ou motorisée avec une platine de nanositionnement 2 ou 3 axes. Sa grande ouverture et sa faible épaisseur la rendent intégrable dans tout type de microscope inversé. La course des platines peut aller jusqu'à 300 µm sur 3 axes. Le positionnement s'appuie sur des capteurs silicium permettant de mesurer la position absolue de la platine avec une résolution picométrique. Un breadboard optionnel permet d'intégrer des sondes au dessus de la platine.

www.optophase.com

■ **Capteur spectral miniature**

Le capteur spectral Spark d'Ocean Optics permet de réaliser des mesures spectrales sur la plage de longueurs d'ondes visibles de 380 à 700 nm avec un niveau de résolution optique de 4,5 à 9,0 nm (FWHM). Disponible dans les configurations OEM et autonomes, il est adapté aux mesures d'absorbance, de fluorescence et de l'émission des couleurs. Il peut être embarqué dans des dispositifs de détection portables de nouvelle génération et connectés à internet pour des applications environnementales, alimentaires, agricoles, biomédicales et de contrôle de la qualité.

www.oceanoptics.com



ANNONCEURS

Zurich Instruments.....II ^e de couverture	Laser Components.....IV ^e de couverture
Aérotech33	INO.....16
Alcal BFI.....45	Laser Components.....29
Bühler.....47	Ophir.....27
Edmund Optics.....11	Optech.....17
Gentec-EO.....16	Scientec.....41
Gooch & Housego.....7	Spectrogon.....19
Idex.....39	Telops.....17
Idil Fibres Optiques.....35	Trioptics.....43
IDS Imaging.....15	Yenista.....31
Imagine Optic.....21	

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 – www.edpsciences.org



Photoniques est la revue de
la Société française d'optique
2 avenue Augustin Fresnel
91127 Palaiseau Cedex, France

mariam.mellot@institutoptique.fr
Tél. : 33 (0)1 64 53 31 82 – Fax : 33 (0)1 64 53 31 84

Erratum Photoniques 77

Contrairement à ce que nous avons écrit dans notre article Acheter un modulateur de phase spatiale, les produits de la société ALPAO (groupe EVEON) sont commercialisés par ALPAO.

Contact : Vincent HARDY - 06 24 59 77 41, vincent.hardy@alpao.fr

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

Journaliste et secrétaire de rédaction Vincent Colpin
vincent.colpin@edpsciences.org

Rédactrice-graphiste Jacqueline Solitude
jacqueline.solitude@edpsciences.org

Comité de rédaction

Pierre Baudoz (Observatoire de Paris),
Azzedine Boudrioua (Institut Galilée, Paris 13),
Didier-Luc Brunet (Horiba Jobin-Yvon),
Émilie Colin (Quantel),
Céline Fiorini-Debuisschert (CEA),
Wolfgang Knapp (Club laser et procédés),
Patrice Le Boudec (IDIL Fibres Optiques),
François Piuze (CEA),
Marie-Claire Schanne-Klein (École polytechnique),
Christophe Simon-Boisson (Thales Optronique),
Costel Subran (Opton Laser International),
Ivan Testart (AFOPI).

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

Gestion des abonnements

Photoniques
EDP Sciences
17 avenue du Hoggar
PA de Courtabœuf
BP 112 – 91944 Les Ulis cedex A

Impression Fabrègue imprimeur
B.P. 10
87500 Saint-Yrieix la Perche

Dépôt légal Octobre 2015

Routage Routage 93 (93)



IMPRIM'VERT®

PROCHAIN NUMÉRO

Le numéro 79 de Photoniques paraîtra le 15 décembre 2015



Optique et médical l'imagerie in vivo

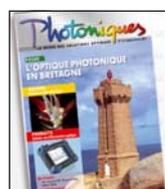
Au programme également :

- Focus : mesure et procédés industriels
- Comprendre : les capteurs CCD et CMOS
- Acheter : une caméra CCD/CMOS

Et aussi...

- L'actualité de ceux qui font l'optique photonique française
- Les pages de nos partenaires
- Opticien célèbre : Etienne Malus
- Une sélection des nouveaux produits introduits récemment en France

Vous pouvez nous faire parvenir vos communiqués de presse avant le lundi 2 novembre.



Votre avis nous intéresse !

Vous souhaitez réagir sur un des articles de ce numéro, sur notre nouvelle maquette, ou sur tout autre sujet ? N'hésitez pas à nous envoyer vos questions, remarques, critiques et suggestions !

photoniques@edpsciences.org

gentec-


LASER
COMPONENTS



L'innovation c'est, Quand technologie et compétence se rencontrent

Le mesureur laser qui tient dans la poche. Notre partenaire Gentec Électro-Optique, Inc., introduit le Pronto, son tout nouveau mesureur ultracompact pour la puissance laser allant jusqu'à 250 W grâce à un boîtier tout en métal et à l'absorbeur le plus résistant sur le marché. Avec son interface tactile intuitive et son prix imbattable, le Pronto est l'outil parfait pour les applications de marquage laser.

- Affichage couleur tactile.
- Pour les basses et les hautes puissances (1 à 250 W).
- Fonctionnalités avancées telles que la sauvegarde et le transfert des données via USB vers un PC.
- 2 modèles disponibles:
Pronto-250: Calibration YAG large bande (0.248 – 2.5 μm)
Pronto-250-CO2: Calibration CO2

Pour un conseil personnalisé:

Tél: 01 39 59 52 25
info@lasercomponents.fr



www.lasercomponents.fr