

Photoniques

LA REVUE DES SOLUTIONS OPTIQUES N° 79 • Novembre - Décembre 2015

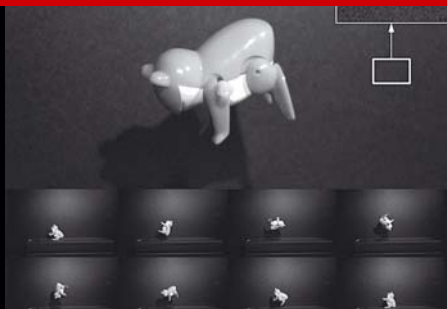
**IMAGERIE MÉDICALE
IN VIVO**

L'AVENTURE INTÉRIEURE

**FOCUS : MESURES ET
PROCÉDÉS PHOTONIQUES
POUR L'INDUSTRIE**



**ACHETER UNE CAMÉRA
CCD / CMOS**



**■ HISTOIRE
DES SCIENCES**
L'héritage d'Ibn Al Haytham

France/EU : 19 € - Reste du monde : 25 €



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



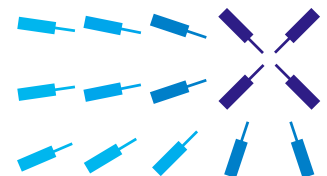
PID Controller



Digitizer

Experience LabOne

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



Find out more today.
www.zhinst.com

Zurich
Instruments

2015 : une année lumière

L'an XV des siècles précédents a souvent été riche en chamboulements, qu'ils aient été politiques, économiques ou sociaux. Ainsi en est-il allé de quelques ans XV « récents », qui ont en effet initié une nouvelle ère – au moins pour la France, parfois pour le monde. Qu'on en juge... En 1415, c'est le désastre d'Azincourt et l'installation des anglais en France, mais c'est aussi, en réaction, une cause majeure de l'épopée de Jeanne d'Arc, puis de l'investissement dans l'artillerie qui deviendra une spécialité française. En 1715, c'est la mort de Louis XIV et le début officiel du Siècle des Lumières. En 1815, c'est la déroute de Waterloo et la fin de l'Empire, mais c'est aussi la naissance du mythe Napoléonien...

Il est évidemment trop tôt pour faire le bilan de l'année 2015 que nous finissons de vivre, mais il est sûr qu'elle a été riche en événements « durables ». Parmi ceux-ci, et non des moindres, il y a la COP21 qui s'est tenue début décembre à Paris. Il ne fait pas de doute que cette conférence et les engagements pris auront des conséquences sur l'avenir collectif. Chers lecteurs, ne nous y trompons pas. En tant que citoyens du monde, nous avons évidemment un rôle à tenir sur le court terme, dans le respect des conduites identifiées par la COP21 et qui relèvent souvent du bon sens. Mais plus encore : en tant qu'ingénieurs et physiciens de la photonique, nous devons participer à l'effort collectif et proposer des solutions pour révolutionner notre monde. Car la photonique est une piste parfaite pour accompagner le tournant énergétique ; la photonique peut rendre les progrès technologiques plus verts et plus respectueux de l'environnement ; la photonique peut aider à construire une agriculture raisonnée, à optimiser la production industrielle et à réduire l'empreinte de nos activités sur Terre grâce à des outils techniques ou scientifiques d'un nouveau genre. Nous pouvons être acteurs du monde à venir. Soyons innovants, soyons entrepreneurs, soyons inspirants !



Riad HAIDAR
Rédacteur en chef

SOMMAIRE

N°79 • NOVEMBRE - DÉCEMBRE 2015

■ ÉDITORIAL ET ACTUALITÉS DE LA SFO.....	2
■ ACTUALITÉS DES PÔLES ET ASSOCIATIONS.....	4
■ ACTUALITÉS DE LA PROFESSION.....	7
■ FOCUS. Mesures et procédés industriels.....	17
■ PORTRAIT. Étienne Louis Malus de Mitry.....	20
■ DOSSIER. Imagerie médicale in vivo	
Aiguille fibrée pour l'aide au diagnostic du cancer du sein par fluorescence endogène.....	22
La micro-imagerie infrarouge appliquée au diagnostic des cancers cutanés.....	26
L'imagerie rétinienne à haute résolution spatiale.....	30
■ HISTOIRE DE L'OPTIQUE	
L'Optique Arabe de la période médiévale. L'exemple d'Ibn al Haytham.....	34
■ CAHIER TECHNIQUE	
Comment fonctionnent les capteurs CCD et CMOS ?.....	39
■ PRODUITS	
Acheter une caméra CCD / CMOS industrielle ou scientifique.....	43
Nouveautés.....	47



Photos de couverture : © Sébastien Kaulitzki

LE MOT DU PRÉSIDENT

Chers adhérentes et adhérents à la Société Française d'Optique

Ce dernier trimestre 2015 sera celui de la mise en route de la nouvelle équipe SFO, forte d'un conseil d'administration (CA) renouvelé comptant treize membres issus de l'industrie, des grands organismes et de l'université. Ses membres sont investis d'une mission très importante, puisqu'il s'agit d'administrer au mieux notre société savante en cherchant à en améliorer plus encore l'efficacité et le rayonnement.

Une de nos premières missions sera la coordination d'Optique Bordeaux 2016. Après Grenoble 2007, Lille 2009, Marseille 2011, Villetaneuse 2013 et Bretagne 2015, c'est au tour de Bordeaux d'accueillir le congrès de la SFO pour sa sixième édition, avec Philippe Lalanne comme responsable du comité local d'organisation. Il y a donc ponctuellement rupture du rythme bisannuel pour notre congrès, de façon à effectuer un décalage par rapport au congrès de la SFP qui se tenait les mêmes années, parfois à une semaine d'intervalle. Ainsi dorénavant les années paires seront celles du congrès de la SFO, et les années impaires celles du congrès de la SFP, décision prise conjointement par les deux sociétés savantes. Par contre chacun des deux congrès comportera quelques sessions portées par l'autre société savante. Ainsi en 2016, se joindront au congrès de la SFO la division PAMO (Physique Atomique, Moléculaire et Optique) et les JSM - Journées de Spectroscopie Moléculaire - de la SFP.

Ce panachage au niveau des congrès illustre bien la volonté qu'ont les deux sociétés savantes de travailler ensemble. Dans ce même esprit, il y a un représentant de la SFP dans notre CA, Olivier Dulieu, et c'est Ariel Levenson qui représente la SFO à la SFP. Et dès 2016 sera mise en place la cotisation commune SFP/SFO. Autant de marqueurs de notre partenariat.



Benoît BOULANGER
Président de la SFO

Je termine en vous rappelant que nous sommes toujours dans l'Année Internationale de la Lumière, et je vous encourage vivement à en être pleinement acteurs.

Bien amicalement.

AGENDA

Conférences parrainées par la SFO

SOPAL 2015

13-15 décembre 2015 •
USTHB, Alger

La Société Algérienne d'Optique et Photonique organise la première édition de sa conférence internationale OPAL (Optics and Photonics Algeria).

www.opal2015.dz

c2i 2016

20-21 janvier 2016 • Saint-Nazaire
Les laboratoires GEM (Institut de recherche en génie civil et mécanique), GEPEA (Génie des Procédés Environnement et Agroalimentaire) et IREENA (Institut de Recherche en Énergie Électrique de Nantes Atlantique) organisent du 20 au 21 janvier 2016 le 7^e colloque interdisciplinaire en instrumentation.

<http://c2i-2016.sciencesconf.org/>

5^e Rencontres Annuelles en Nanométrie

26 janvier 2016 • CNRS, Paris
Les journées du Club Nanométrie LNE - C'Nano

<http://club-nanometrologie.fr/>

Devenez
membre
de la



Et bénéficiez de nombreux avantages :

- 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

Club nanoMétrologie

Les « 5^e Rencontres Annuelles en Nano-métrologie » du Club nanoMétrologie (CnM), organisées le mardi 26 janvier 2016 au siège du CNRS, Paris Michel Ange, seront le rendez-vous pour échanger et faire progresser les pratiques dans le domaine de la caractérisation à l'échelle du nanomètre.

Un des objectifs fondamentaux du CnM est le recueil des besoins en nanométrie venant des industriels. Ces derniers forment à ce jour plus d'un tiers de ses 330 membres, soit une représentativité record si l'on se réfère à des groupements scientifiques de ce type. Les différents travaux menés

L'heure de la maturité industrielle pour la nanométrie

jusqu'à ont abouti principalement à l'élaboration de plusieurs réponses à des appels à projets de recherche, mais aussi à deux inter-comparaisons de mesure, exercice par excellence dans le domaine de la métrologie et premières nationales dans le domaine des nanosciences.

Au-delà des activités de recherche qu'il contribue à initier, le CnM, à mesure qu'il grandit, est le témoin d'aventures entrepreneuriales dans le champ de la métrologie appliquée à l'échelle nano. C'est pourquoi l'accent sera mis cette année sur les transferts de technologies et/ou d'expertises des laboratoires académiques vers les

industriels. D'autres thématiques d'actualité dans le domaine de la nanométrie seront également abordées. Une session posters et une table ronde sur l'intérêt de participer à des exercices d'inter-comparaison contribueront enfin à orienter les actions futures du réseau national, voire son organisation.

<http://club-nanometrologie.fr/>

■ SFO : le Conseil d'administration 2015-2016

ALOUINI Mehdi (Institut de Physique de Rennes), AUBERT Jean-Jacques (CEA Léti), BILLABERT Anne-Laure (CNAM), BOULANGER Benoît (Institut Néel, Université Grenoble Alpes), BRIGNON Arnaud (Thales, R&T), CHENAIS Sébastien (Laboratoire de Physique des Lasers), DULIEU Olivier (Laboratoire Aimé Cotton), GIGAN Sylvain (Laboratoire Kastler Brossel), HAIDAR Riad (ONERA), NOUCHI Pascale (Thales R&T), PAULIAT Gilles (Institut d'Optique, Palaiseau), PUECH Claude, SIMON-BOISSON Christophe (Thales Optronique), SUBRAN Costel (Opton Laser International), WESTBROOK Nathalie (Institut d'Optique, Palaiseau). Le Conseil d'Administration de la Société Française d'Optique du 24 septembre, nouvellement renouvelé a élu les membres du Bureau, pour la période 2015-2017 :

- Président : Benoît Boulanger, Université Grenoble Alpes - Institut Néel CNRS
- Président sortant : Jean-Jacques Aubert, CEA Léti
- Présidente entrante : Pascale Nouchi, Thales R&T
- Trésorier : Riad Haidar, ONERA
- Secrétaire : Costel Subran, Opton Laser International
- Vice Président : Gilles Pauliat, Institut d'Optique Graduate School

■ Congrès OPTIQUE Bordeaux 2016 20 au 23 Juin 2016 - www.sfoptique.org



C'est un événement rare : la Société Française d'Optique vous propose un congrès pendant deux années consécutives ! Juste après OPTIQUE Bretagne 2015, nous sommes très heureux d'annoncer que le congrès national OPTIQUE Bordeaux 2016, se tiendra du 20 au 23 juin 2016 à l'ENSEIRB Matmeca, Talence. À cette occasion, seront regroupées toutes les communautés de l'optique en France avec le Colloque sur les Lasers et l'Optique Quantique (COLOQ'15), la 19^e conférence Horizons de l'Optique, la 36^e édition des Journées Nationales de l'Optique Guidée (JNOG), la 8^e édition des Journées Recherche Industrie de l'Optique Adaptative (JRIOA), les 4^e journées nationales du club photonique organique et les 3^e journées du club nanophotonique. Nouvellement ajouté au programme et invité par la SFO, se joint à nous le Colloque

commun de la division PAMO (Physique Atomique, Moléculaire et Optique) et des JSM (Journées de Spectroscopie Moléculaire) de la Société Française de Physique.

Comme à chaque édition, vous êtes tous invités à soumettre vos découvertes pour que vos travaux puissent être sélectionnés par un des comités scientifiques, pour apparaître sous forme de poster ou de présentation orale dans le programme. La date d'ouverture de la plateforme de soumissions est le 22 janvier 2016.

À tous les industriels, marquez vous aussi vos agendas : la date d'ouverture de location de stands sera le 12 janvier 2016. En participant à cette exposition vous aurez la possibilité de partager vos avancées technologiques et d'échanger avec toute la communauté de l'optique et de la photonique.

Le reste de l'actualité du congrès est à votre disposition sur www.sfoptique.fr, le nouveau site de la SFO !

Philippe Lalanne (IOA, philippe.lalanne@institutoptique.fr) et Rania Hajjar Haidar (SFO, rania.hajjar@institutoptique.fr) restent à votre écoute pour toutes autres questions.

La Mission Chine dispose désormais d'une zone d'exposition

Dans le cadre de sa Mission Chine, le pôle Route des Lasers vient de mettre en place une zone d'exposition au sein de ses locaux, situés à Suzhou, à 100 kilomètres à l'ouest de Shanghai. Ce « showroom » va ainsi permettre aux entreprises participant à la mission de présenter leurs produits et plaquettes. Cet espace d'exposition complète le site Internet chinois www.jiguangzhilu.com mis en ligne dans le courant de l'été : là encore, les entreprises participant à la Mission Chine peuvent présenter leurs produits et activités et déposer des documents à télécharger. La Mission Chine, coordonnée sur le sol chinois par Balthazar Boyer, a pour objectif

d'accompagner les entreprises désireuses de s'implanter sur le sol chinois à travers la mise en place d'actions spécifiques : études de marchés, visites commerciales, salons professionnels, démonstrations... Elle est financée par les entreprises participantes à hauteur de 65 % du budget global, par une subvention de la Région Aquitaine et par les fonds propres du pôle. Elle est ouverte à tous les adhérents du pôle.

Cette année, 11 entreprises participent à la Mission Chine, certaines pour la première année : Amplitude Systèmes, Auréa Technology, Edit Laser, Eolite Lasers, Imagine Optic, Muquans, Nethis, Photonis, Quantel, Silimelt et Sunna Design. Le pôle Route des Lasers est présent, avec tout ou



L'espace d'exposition situé dans les locaux du pôle Route des Lasers à Suzhou.

partie de ses entreprises, sur les principaux salons chinois tout au long de l'année notamment Laser World of Photonics à Shanghai (prochaine édition du 15 au 17 mars 2016) et Optics Valley of China qui vient de se tenir à Wuhan.

Plus de 220 personnes ont visité l'Institut d'optique d'Aquitaine



ALPHANOY



ALPHANOY

Les 9 et 10 octobre 2015, pour la première fois de son histoire, l'Institut d'optique d'Aquitaine a ouvert ses portes aux scolaires et au grand public. Organisée dans le cadre de l'Année internationale de la lumière, cette opération « Portes ouvertes » a permis d'accueillir plus de 220 personnes autour d'un programme mêlant présentations orales, films, démonstrations et temps de discussions informelles. Installé au sein de l'Institut d'optique d'Aquitaine depuis maintenant bientôt 2 ans, le pôle Route des Lasers a assuré la coordination de l'organisation de ces journées portes ouvertes. Le vendredi 9 octobre, la visite de 140 collégiens et lycéens, accompagnés de leurs professeurs, s'est inscrite dans le cadre du « circuit scientifique bordelais » organisé

par le CNRS du lundi 5 au vendredi 9 octobre. Le samedi 10, la visite était ouverte au grand public via trois séances de 2h. Chaque séance était organisée en 4 temps :

- une introduction dans l'amphithéâtre du bâtiment afin de présenter le domaine de l'optique et de la photonique, le principe de fonctionnement et les applications des lasers, et la photonique en Aquitaine ;
- la présentation par un doctorant ou un post-doctorant des travaux menés dans le cadre de son programme de recherche ;
- la visite de 4 expériences dans des laboratoires installés au sein de l'Institut d'optique d'Aquitaine : LP2N, ALPhANOV, université de Bordeaux/PYLA. Cette initiative a permis de montrer des

expériences ludiques et pédagogiques en optique, des applications industrielles des lasers, ainsi que des recherches de pointe ;

- un temps libre dans le hall du bâtiment occupé par différents stands : des ateliers sur la lumière réalisés par des doctorants de l'université de Bordeaux, des stands de présentation des formations en optique et photonique à Bordeaux, des expositions de réalisations de l'Institut d'optique d'Aquitaine, une exposition de kakemonos sur la lumière et ses applications.

Ces deux journées ont été pour la plupart des visiteurs une occasion unique de mieux comprendre les applications actuelles de la photonique, notamment dans leur quotidien, et d'appréhender ce qu'est le travail de recherche mené par les scientifiques. Le souhait des organisateurs – Institut d'optique Graduate School, PYLA, université de Bordeaux, cluster d'excellence LAPHIA, LP2N, ALPhANOV, pôle de compétitivité Route des Lasers – est que la présentation conjointe de la recherche fondamentale, des applications industrielles et des formations suscite de nombreuses vocations !

■ Succès de la « Rencontre Laboratoires-PME »

Photonics Bretagne organisait une nouvelle édition des rencontres entre laboratoires et industriels, le 7 octobre dernier, en matinée, dans les locaux de l'ENSSAT, à Lannion.

Le laboratoire FOTON, le groupe de recherche en chimie de l'IUT de Lannion (ISCR), le Lab-STICC, le département Optique et Photonique de l'IPR, le LPHIA, le LSOL, le CIMAP et l'équipe Verres et Céramiques (ISCR) de l'université de Rennes 1 ont ainsi exposé leurs thèmes

de recherche et les applications de leurs travaux. L'institut Maupertuis et PERFOS ont également présenté leurs offres technologiques respectives.

Après ces présentations flash, la matinée s'est poursuivie par une table-ronde lors de laquelle les chercheurs et les industriels ont pu échanger autour de leurs attentes respectives. Parmi les industriels présents, on comptait notamment IDIL, IxBlue, JMD Thèque, Keopsys, Labinal et Oxsius.

La rencontre s'est achevée autour d'un



cocktail déjeunatoire, lors duquel des perspectives de projets communs ont été dessinées, dans une ambiance conviviale.

■ Mission partenariale en Inde

Photonics Bretagne faisait partie de la délégation française de la mission partenariale dédiée à la photonique, organisée par Business France qui s'est rendue en Inde, du 6 au 11 septembre 2015, à l'occasion du salon Laser World of Photonics India. Cette mission a notamment donné lieu à des rendez-vous individuels ciblés avec des partenaires locaux potentiels, à des rendez-vous collectifs avec les acteurs clés du secteur à



Bombay, New Delhi et Bangalore ainsi qu'à une session de networking porteuse de futures collaborations.

■ Dynamique d'embauche en Bretagne

De nombreuses PME de la filière photonique bretonne connaissent actuellement une phase de forte croissance et embauchent, à l'image de Keopsys, Lea Photonics, Yenista Optics, CAILabs ou encore Ekinops. Photonics Bretagne recrute également actuellement le ou la futur(e) responsable technique de PERFOS.

■ Yenista Optics lance de nouveaux lasers de test aux longueurs d'onde CWDM

Yenista Optics enrichit son catalogue avec une nouvelle série de modules laser DFB pour le test aux longueurs d'onde CWDM, sur la plage 1270-1610 nm. Des modules additionnels à 1625 nm et 1650 nm sont également proposés. Les modules CWDM correspondent à

des longueurs d'onde utilisées pour les émetteurs-récepteurs CLR4 et CWDM4 de 40 Gb/s et 100 Gb/s ainsi que pour les systèmes CWDM conventionnels. Les longueurs d'onde des modules supplémentaires sont adaptées à l'OSC (canal de supervision optique) et à l'OTDR.

■ La photonique bretonne au salon SPIE Photonics West 2016

Photonics Bretagne et PERFOS exposeront sur le Pavillon France au salon Photonics West, qui se tiendra à San Francisco (CA, USA) du 13 au 18 février 2016. Plusieurs membres du

cluster participeront également à ce rendez-vous annuel mondial de photonique, permettant ainsi de mettre en avant l'excellence de la filière photonique bretonne.

■ Retour sur ENOVA Paris 2015

À l'occasion de l'édition 2015 du salon ENOVA Paris, Photonics Bretagne exposait sur un pavillon collectif breton avec les sociétés IDIL Fibres Optiques, iXBlue/Photline, Kerdry, Oxsius et la plateforme PERFOS. Cet événement a permis de souligner le savoir-faire breton dans le domaine de la photonique et a donné lieu à des échanges constructifs entre les exposants et de potentiels clients et partenaires.



AGENDA PRÉLIMINAIRE 2016

Intéressé pour participer à un salon ou une animation ? Contactez-nous ! Certaines offres sont réservées aux adhérents AFOP, d'autres sont ouvertes à tous. N'hésitez pas à nous contacter pour toute information.

21 janvier	Conférence AFOP sur les dispositifs RAPID et ASTRID, Paris
2 février	Cérémonie de clôture 2015 Année de la Lumière en France, Paris
4-5 février	Délégation AFOP - Convention d'affaires Paris Space week, Orly
11 février	Délégation AFOP - Convention d'affaires TechInnov, Orly
10-11 février	Pavillon AFOP - Salon Enova Lyon
26 mai	Assemblée Générale - 120 ans de l'AFOP, Paris
Juin	Délégation AFOP - Convention d'affaires Industries Days, Orly
7-9 juin	Pavillon AFOP - Salon OPTATEC, Francfort (DE)
8-9 juin	Offre AFOP - Salon Enova Angers
26 juin-1 ^{er} juillet	Pavillon AFOP - Salon SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, Edimbourg (UK)
1 ^{er} semestre	Rencontres Recherche & Industrie Aquitaine
1 ^{er} semestre	Rencontres et échanges AFOP avec les services des Douanes
14-15 septembre	Pavillon AFOP - Salon Enova, Paris
27-30 septembre	Pavillon AFOP/CLP/RdL - Salon Micronora, Besançon
Octobre	Pavillon AFOP - Salon Photonex, Coventry (UK)
8-10 novembre	Pavillon AFOP - Salon Vision, Stuttgart (DE)
2 ^e semestre	Rencontre Recherche & Industrie, lieu à définir
2 ^e semestre	Délégation AFOP - Convention d'affaires Aerospace Days
2 ^e semestre	Partenariat Forum LED
2 ^e semestre	Partenariat Les Rendez-vous CARNOT

D'autres partenariats sont susceptibles d'être négociés selon les intérêts remontés par nos Adhérents. Pour cela, manifestez-vous !

Vers la fin des droits de douane

L'accord international sur les technologies de l'information que nous avons déjà évoqué dans ces pages a été signé au mois de juillet. Le résultat de cet accord porte sur la suppression des droits de douane d'environ 200 codes produits qui seront donc à terme libéralisés. La mise en œuvre de l'accord devrait commencer à partir de 2016.

En ce qui concerne l'optique, les codes nouvellement concernés sont :

900120 : Sheets and plates of polarising material, 900190 : Other, 900219 : Other, 900220 : Filters, 900290 : Other.

L'AFOP avait été consulté au début des négociations et avait approuvé les propositions, après consultations auprès de ses adhérents, mis à part pour le code 900290 qui a été réintégré in extremis dans l'accord comme concession diplomatique envers un pays asiatique. En contrepartie, la période de démantèlement pour ce code devrait être la plus longue possible soit 7 ans à compter de la mise en œuvre de l'accord.

Un autre accord sur la libéralisation des droits de douane pour les biens environnementaux est en cours de préparation.

Zoom : le pavillon France/AFOP sur OPTATEC

Participez au salon OPTATEC qui se tiendra du 7 au 9 juin 2016. Ce salon international des technologies, des composants, des systèmes et de la fabrication optique se déroule tous les deux ans au centre des expositions de Francfort en Allemagne. Sur un pavillon de près de 80 m² représentant la photonique

française, vous pourrez exposer vos produits sur 11 stands de 6 ou 9 m² pour une offre tout compris.

Chiffres clés :

- 573 exposants
- 27 pays représentés
- 18 000 m² d'exposition
- 5241 visiteurs de 43 pays

BAROMÈTRE ÉCONOMIQUE

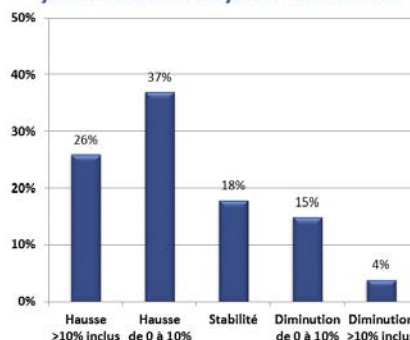
Résultats du 3^e trimestre 2015

L'AFOP vient de réaliser son enquête trimestrielle sur la situation économique française du secteur optique photonique au 3^e trimestre 2015.

Pour découvrir les résultats complets, rendez-vous sur www.afoptique.org et inscrivez-vous pour participer au prochain baromètre début janvier !

Les résultats précédents ainsi que les synthèses annuelles, sont disponibles sur demande.

Évolution du cumul annuel des prises de commandes janvier - octobre 2015 / janvier - octobre 2014



Zoom : conférence AFOP sur les dispositifs RAPID et ASTRID

Les programmes RAPID et ASTRID sont destinés à soutenir des projets qui peuvent intéresser le secteur de la défense. Ces projets à caractère industriel ou expérimental peuvent être financés à 50 % par la Direction Générale de l'Armement et la DGE. Lors de cette conférence, Philippe Adam, responsable du domaine scientifique photonique de la DGA, Ministère de la défense présentera ces dispositifs et leurs fonctionnements, suivi de témoignages d'entreprises et d'échanges.

Contact

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

■ Des canettes à l'unisson pour créer des superlentilles

Souffler dans une canette de soda émet un son presque pur de 420 hertz. En faisant résonner des canettes disposées en nid d'abeilles, des chercheurs de l'Institut Langevin à Paris ont obtenu un métamatériau acoustique capable de réfracter négativement une onde acoustique audible, à la manière d'une superlentille. Ces résultats ont été publiés dans *Nature*.

Dans les milieux naturels, la propagation des ondes est régie par deux paramètres : le type d'atomes constituant un matériau et leur organisation spatiale. Depuis plusieurs années, les physiciens cherchent à reproduire ces interactions des ondes avec la matière à des échelles spatiales plus grandes, la distance interatomique étant de l'ordre de l'angström (10^{-10}), et des fréquences plus basses que le domaine optique. Pour ce faire, ils ont imaginé des matériaux artificiels capables de propager, réfléchir, diffracter ou absorber les ondes à la manière des matériaux naturels. Les travaux menés dans ce sens depuis ces 30 dernières années par la communauté de la physique des ondes ont permis de différencier deux classes de matériaux composites : les cristaux photoniques/phononiques d'une part, basés sur la structuration du milieu de propagation, et les métamatériaux d'autre part, dont les propriétés électromagnétiques découlent de la nature des objets composant le milieu. Jusqu'alors, les propriétés des cristaux photoniques et des métamatériaux avaient toujours été considérées comme opposées. En effet, contrairement aux cristaux photoniques, les métamatériaux s'organisent à une échelle bien plus basse que la longueur d'onde de réponse, si bien que l'on a considéré que leur caractère périodique n'avait aucune influence sur la propagation des ondes. Des chercheurs de l'Institut Langevin (CNRS/ESPCI ParisTech) ont outrepassé

cette idée préconçue et ont démontré que des phénomènes de propagation des ondes normalement propres aux cristaux photoniques pouvaient être obtenus en structurant spatialement des métamatériaux. Ils se sont pour cela intéressés à l'étude de la réfraction négative, qui requiert d'avoir un matériau présentant une permittivité et une perméabilité négatives en électromagnétisme (ou une densité et une compressibilité négatives en acoustique). Il s'agit pour les physiciens d'observer la propagation d'une onde à la frontière entre deux milieux et de constater la déviation du rayon à cette interface. Ce phénomène était généralement observé dans des métamatériaux présentant deux éléments différents résonnants. Ici seul un élément est utilisé mais la périodicité de celui-ci dans l'espace joue un rôle fondamental.

Lors de cette expérience acoustique, l'équipe de recherche de l'Institut Langevin a constitué un réseau de canettes de soda positionnées en nid d'abeilles. Souffler dans une canette de 33 centilitres est une mise en évidence de son caractère acoustiquement résonnant : une onde sonore presque pure de 420 Hz est émise, fréquence pour laquelle la longueur d'onde est de l'ordre du mètre. La canette est donc un objet microscopique (comparé à la longueur d'onde considérée) qui interagit de manière résonante avec le son : **un réseau de canettes est donc un métamatériau acoustique**. L'organisation en nid d'abeille, que l'on retrouve par exemple dans le

graphène, lui confère alors des propriétés inattendues pour un métamatériau, mais déjà observées dans le cas des cristaux phononiques. Une tranche d'espace composée d'un tel milieu est en effet capable de focaliser des ondes acoustiques à la sortie, créant un effet « lentille ». Autrement dit : les chercheurs sont parvenus à réfracter négativement une onde acoustique audible. De plus, la focalisation qu'ils ont obtenue est plus fine que la limite théorique d'une lentille conventionnelle. Il s'agit de la première démonstration en acoustique d'une superlentille, un composant qui permet de focaliser en-dessous de la limite de diffraction et donc de rendre compte de détails plus fins que la longueur d'onde utilisée dans le cas de l'imagerie. Les superlentilles exploitent en effet un indice de réfraction négatif dans les métamatériaux pour s'affranchir de la limite de diffraction. Ces résultats devraient permettre une transition directe à d'autres types d'ondes tout en ouvrant des horizons sur les métamatériaux cristallins.

Référence

Nadège Kaina, Fabrice Lemoult, Mathias Fink, Geoffroy Lerosey, Negative refractive index and acoustic superlens from multiple scattering in single negative metamaterials, *Nature* 525, 77-81, publié le 3 septembre 2015.

Contacts

fabrice.lemoult@espci.fr
geoffroy.lerosey@espci.fr

LASER APOLLON : record mondial de puissance attendu en 2016

Lancé en 2015, Apollon deviendra l'an prochain le laser le plus puissant du monde, atteignant 5 PW (1 Peta = 10^{15}) – soit 1/35^e de la puissance solaire reçue par la Terre. Cette installation, portée par le CNRS en partenariat avec l'École polytechnique, le CEA et d'autres institutions, est conçue pour atteindre 10 PW.

La chaîne laser a été installée dans l'ancien bâtiment de l'accélérateur linéaire de Saclay, au cœur de la nouvelle Université Paris-Saclay. Elle sera complétée par deux salles expérimentales où seront explorées les frontières de la physique. Ouvert à la communauté scientifique nationale et internationale à l'horizon 2018, et intégré

dans le Centre interdisciplinaire lumière extrême (Cilex), Apollon permettra d'explorer des domaines nouveaux, certains jusqu'ici essentiellement théoriques, de la physique relativiste à la physique du vide, en passant par de nouvelles technologies d'accélération des particules et d'analyse de la matière.

ECOC 2015 Faire face aux zettaoctets

Jean-Michel MUR
jm.mur@orange.fr

ECOC 2015 ou la recherche de solutions pour faire face aux demandes toujours croissantes de bande passante réclamée par les applications de l'informatique en nuage, des entrepôts de données, de l'Internet des objets, de la fibre au domicile pour les téléviseurs 4k et les applications vidéo personnelles, etc. synonymes du zettaflux ($1 \text{ zetta} = 10^{21}$).

C'est à Valence (Espagne) que s'est déroulée la 41^e édition d'ECOC (European conference and exhibition on optical communications) couplée avec le 20^e anniversaire de la partie exposition. Comme précédemment, cet événement n'a d'européen que le lieu (cf. *figure 1*). En effet, les conférenciers, exposants et congressistes viennent du monde entier pour participer à cette grand-messe annuelle qui permet de faire le point sur les avancées en recherche et développement dans le domaine des communications optiques et des technologies photoniques associées. Selon ses préoccupations, chacun des 1200 délégués venus de 40 pays différents et des 5500 visiteurs a pu trouver des réponses fournies par plus de 400 conférences et présentations de posters, environ 200 stands avec des annonces de nouveaux produits et trois zones dédiées aux marchés, à l'application FTTx et à la formation.

Conférences

Les conférenciers de cette édition ont consolidé la connaissance et les évolutions des thèmes des années précédentes tels que les divers types de multiplexage (dont le multiplexage par répartition dans l'espace), les nouveaux formats de modulation évoluée, la virtualisation de fonctions de réseaux et la gestion par logiciel, les concepts de super canaux et de grilles flexibles pour faire face aux flux aléatoires de données, les niveaux d'intégration des puces photoniques sur silicium ou phosphore d'indium, la diversité des fibres multi cœurs et des équipements associés, les applications de la radio sur fibre optique avec l'émergence de la 5G et la fibre jusqu'à l'antenne sans oublier la fibre optique vers l'habitat et dans l'habitat.

Parmi toutes ces contributions, un grand nombre a porté sur les centres de données,

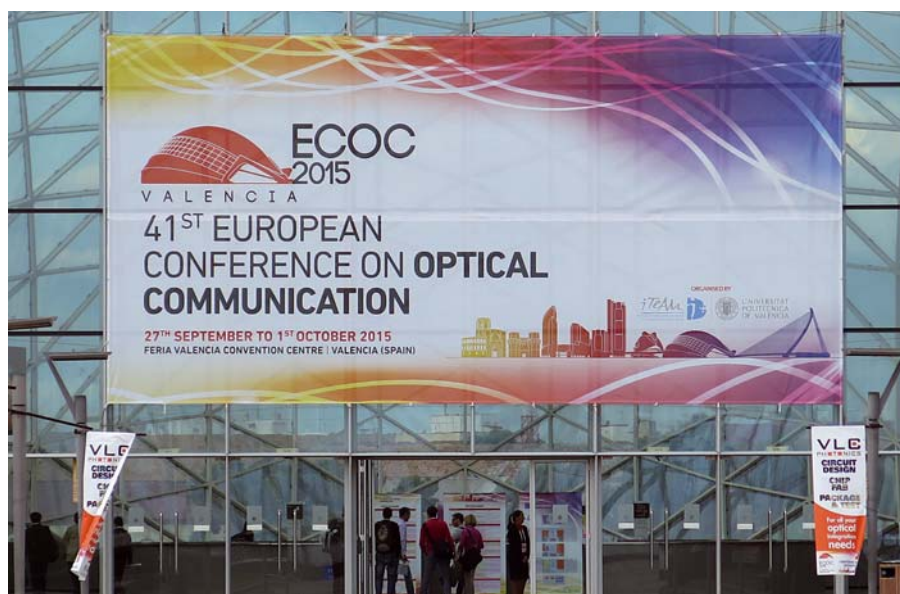


Figure 1. Bienvenue à ECOC 2015.

marché porteur s'il en est, tiré par toutes les applications propres au nuage synonymes de transmission de zettaflux. Trois axes majeurs ont été traités : le domaine des connexions optiques dans le centre lui-même (*intra data center* – IDC), la connexion entre centres de données (*data center interconnection* – DCI) et l'amélioration des débits sur les fibres optiques multimodales afin de préserver l'investissement déjà réalisé tout en montant en capacité. Dans le cas IDC, trois écoles s'opposent : l'arbre, défendu par **l'université de Californie** (cf. *figure 2*) qui s'appuie sur les performances sans cesse améliorées des puces photoniques pour la commutation et le routage ; l'anneau, proposé par le danois **DTU Fotonik** qui peut évoluer en un anneau-maître (attention à la prononciation) reliant d'autres anneaux pour suivre la croissance en nombre de serveurs (cf. *figure 3*) ; et le réseau optique passif avec le multiplexage TWDM de **l'université du Péloponnèse** et du **laboratoire III-V** de Marcoussis (cf. *figure 4*) qui peut être

relié à un nœud principal en topologie bus pour agréger une plus grande quantité de serveurs.

L'application DCI est poussée par les fournisseurs de contenus tels Amazon, Facebook, Google, Yahoo... qui dupliquent leurs données dans de nombreux centres dispersés géographiquement. Les grandes inconnues sont le nombre d'utilisateurs qui se connectent simultanément, la variété des requêtes demandées et l'identification des serveurs sur lesquels se trouvent les réponses, sans parler des solutions alternatives contre les risques de pannes ou de coupures de liaisons. Aussi, pour faire circuler l'information et assurer le secours, l'habitude consiste à relier les centres de données par fibres optiques et multiplexage en longueurs d'onde dont le nombre est fonction du débit nécessaire et des protocoles utilisés. C'est ainsi que **l'université de Lingöpink** (Suède) a proposé une nouvelle stratégie de routage, de mise à jour et de duplication des données en la fondant sur des réseaux de centres de

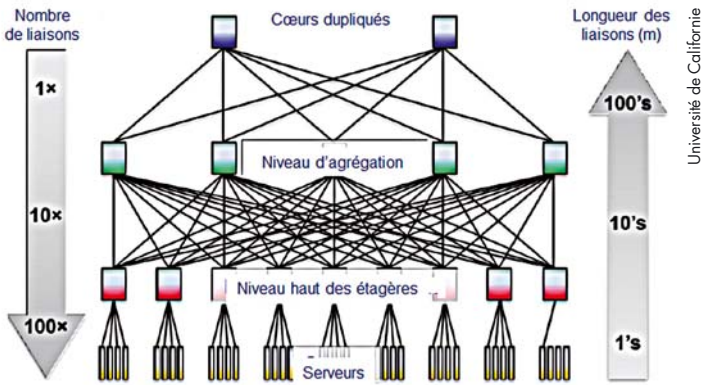


Figure 2. Architecture en arbre d'un centre de données.

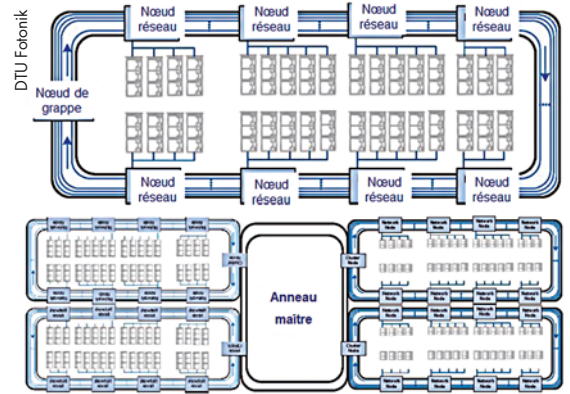


Figure 3. Architecture en anneau d'un centre de données.

données reliés en WDM. L'université de Pékin s'est intéressée au monde des petits centres de données et a développé un schéma d'architecture ouverte reliant par anneau six centres de données. Cette topologie peut être répliquée et les anneaux reliés entre eux si nécessaire. L'adaptation du réseau aux fluctuations du trafic se fait par logiciel (SDN).

L'évolution des possibilités des fibres optiques multimodales a également inspiré les chercheurs. Prysmian Group a conçu et caractérisé des fibres multimodales de 50 µm de cœur qui ont permis de mener à bien les premières expériences concernant le multiplexage par répartition modale avec de multiples entrées et multiples sorties (MIMO MDM) sur ce type de fibres.

Finisar Corp. s'est intéressé au fait que la norme IEEE 100GBASE-SR4 standardise la transmission de 100 Gbit/s sur 4 fibres optiques multimodales OM4 (en parallèle à 4 x 25,8 Gbit/s, sur 100 mètres), d'où la question : peut-on aller plus loin ? Leur démonstration a permis d'atteindre 300 mètres sur une fibre OM4 à bande élargie (WMMF) grâce à la technologie

SWDM4 et en utilisant des lasers VCSEL conventionnels. La jeune pousse CALabs associée au laboratoire Ircica de l'université de Lille a annoncé avoir atteint une transmission de 30 Gbit/s (en fait 3 x 10 Gbit/s) sur une fibre multimodale conventionnelle OM2, en utilisant le multiplexage par groupe de modes avec la modulation OOK (on-off keying) et la détection directe. Cette montée en débit, sur de simples fibres multimodales très classiques, laisse espérer un bon allongement de la durée de vie des centres de données et des réseaux locaux d'entreprises déjà installés. À noter également la démonstration de Huawei Technologies qui a réussi à transporter 112 Gbit/s sur 200 mètres de fibre multimodale OM4 avec des VCSEL émettant à 850 nanomètres et une transmission s'appuyant le format PAM-4.

Tout cela sans oublier la fibre optique plastique qui est le support de transmission préféré du professeur Yasuhiro Koike de l'université de Keio (Japon), évangéliste convaincu depuis des décennies. Le point de départ de sa conférence est double : d'une part, le développement croissant des

ventes des téléviseurs au nouveau format 4k, c'est-à-dire ayant 4000 fois plus de pixels que les téléviseurs haute définition (TV HD) et, d'autre part, l'arrivée annoncée pour 2020, à l'occasion des Jeux Olympiques et Paralympiques de Tokyo, des téléviseurs 8k, soit 8000 fois plus de pixels que la TV HD. D'où la question : comment câbler chez soi ? Il a présenté la comparaison entre des câbles métalliques traditionnels et un câble contenant un ruban de douze fibres optiques en plastique à gradient d'indice (GI-POF) en polymère perfluoré capable de transmettre 120 Gbit/s, à 850 nanomètres, sur 100 mètres. Cette démonstration de transmission du signal non compressé était largement à l'avantage de la fibre en plastique que ce soit en termes d'immunité aux perturbations électromagnétiques, en facilité de connexion ou en volume et poids des câbles (cf. figure 5).

De nouveaux composants

Des annonces de nouveaux composants ont enrichi l'exposition. Quelques exemples... Deux nouveautés en première mondiale pour le développeur de

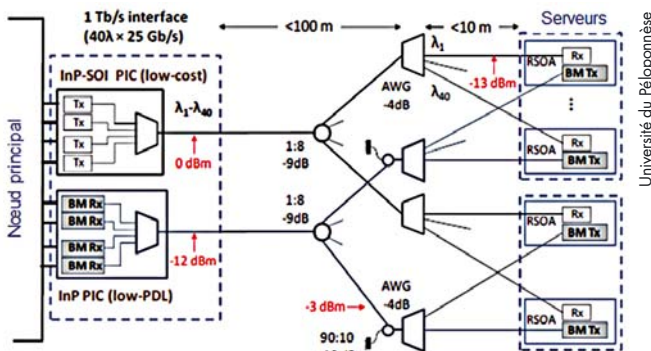


Figure 4. Architecture en réseau optique passif d'un centre de données.

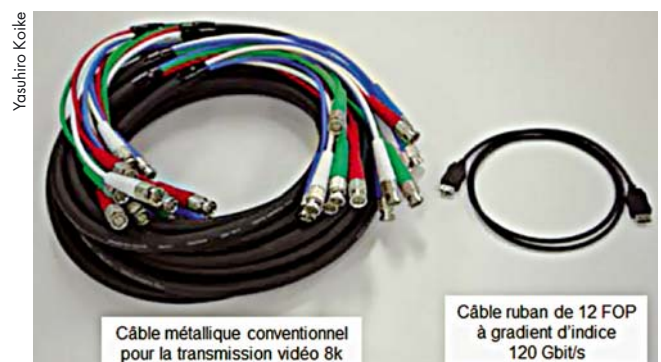


Figure 5. Comparaison câble métallique vs. FOP.

composants et sous-systèmes **Finisar Corp.** : une pour le 100 GbE et une autre pour le 400 GbE. En 100 GbE, son module transmet sur des fibres optiques multimodales standards. Pour le 400 GbE, Finisar a annoncé le premier émetteur-récepteur optique au nouveau format CFP8. Les distances maxima sont de dix kilomètres sur fibre unimodale et jusqu'à 30 ou 40 mètres, respectivement sur fibres multimodales OM3 ou OM4. Dans ce dernier cas, cela facilite la montée en débit, de 100 à 400 Gbit/s, des centres de données équipées par ces fibres. Même choix de marché pour **Mellanox Technologies** qui présente un émetteur-récepteur (composant photonique sur silicium) dédié aux infrastructures pour le 100 GbE basées sur 4 fibres optiques unimodales en parallèle. Le standard PSM4 demande de transmettre les signaux à 1310 nanomètres sur des distances de 500 mètres et Mellanox se targue d'atteindre deux kilomètres.

Le suisse **Huber+Suhner**, désormais propriétaire de Cube Optics, a présenté la nouvelle génération conçue par sa filiale de récepteurs miniaturisés multi longueurs d'onde pour centres de données et réseaux locaux. Ces récepteurs intègrent un multiplexeur-démultiplexeur optique, quatre photodiodes PIN et un amplificateur. Ils peuvent recevoir les signaux transportés par quatre longueurs d'onde en parallèle (à 28,3 Gbit/s par λ) sur une seule fibre optique.

Le canadien **Teraxion** s'est également intéressé à l'accès aux systèmes gigabit ethernet à travers de nouveaux modulateurs IQ au phosphore d'indium. D'après l'entreprise, ces modulateurs ont une faible tension d'attaque minimisant la dissipation de puissance des systèmes où la densité de ports est très élevée. De plus, leur bande passante élevée – jusqu'à 40 GHz – augmente l'efficacité spectrale en permettant la transmission élevée de symboles requise pour les applications à 100 Gbit/s, 200 Gbit/s et 400 Gbit/s. Enfin, leurs dimensions réduites permettent la fabrication de modules émetteurs-récepteurs très compacts. Cette technologie est en concurrence frontale avec les modulateurs traditionnels au niobate de lithium. Il en est de même pour le néo-zélandais **Coherent Solutions** qui lance commercialement un nouveau

modulateur offrant une bande passante de 40 GHz. Doté d'une possibilité de contrôle automatique, gérable à distance et dédié aux nouveaux formats de modulation des signaux, il est annoncé comme pouvant moduler des signaux jusqu'à des débits de 56 Gigabauds afin de transmettre jusqu'à 400 Gbit/s par canal.

Le californien **NeoPhotonics** a annoncé une gamme de composants dédiés aux transmissions à 400 Gbit/s dont des photo-détecteurs InP pour des récepteurs cohérents, des transmissions à hauts débits ainsi que des lasers pour des constellations 16QAM et 64QAM. L'objectif est d'aider les exploitants de réseaux étendus à monter en débits de transmission en évoluant des systèmes au débit classique de 32 Gbauds pour transmettre 100 Gbit/s vers les systèmes à 64 Gbauds pour le 400 Gbit/s. De plus, NeoPhotonics et **Inphi Corp.** ont proposé la première démonstration mondiale d'interopérabilité entre une puce photonique d'Inphi et un module émetteur de NeoPhotonics. Ceci est une étape pour la conception de modules et cartes de liaison dédiés aux plateformes de transmission à huit longueurs d'onde conformes aux caractéristiques 400G LR8 du groupe de travail IEEE 802.3bs.

Autres annonces

Certaines entreprises profitent d'ECOC pour annoncer de nouveaux équipements ou records. Côté amplification des signaux, **Phoenix Photonics** a présenté son dernier-né, un amplificateur à fibre dopée à l'erbium pour les fibres à quelques modes, le FM-EDFA, pour les fibres à six modes du fabricant OFS installées dans les réseaux de télécommunications. Ce produit vient compléter la gamme des composants spécialisés pour le multiplexage par répartition dans l'espace SDM, résultat des travaux de R&D du projet européen MODE-GAP. Pour le domaine des tests de transmission, **OptoTest** a complété sa gamme de testeurs par l'OP940 destiné aux câbles multifibres et aux fibres en ruban. Cet équipement mesure la puissance optique, les pertes d'insertion, les pertes dues à la réflexion, etc. pour des rubans de 4 à 24 fibres unimodales ou multimodales. Les informations sont disponibles de manière très visuelle et le maniement est quasi intuitif. Dans le

même domaine, **Anritsu** a annoncé de nouvelles fonctionnalités pour sa gamme de plateformes d'analyseur de signaux afin qu'elle puisse traiter jusqu'à 64,2 Gbit/s. La démonstration présentait la qualité du diagramme de l'œil ainsi que la rapidité des temps de transition pour des débits allant de 100 Mbit/s à 64,2 Gbit/s. Ceci est effectif pour les techniques de transmission à haut débit du type PAM-4 utilisée dans les liens de communication à 200 et 400 Gbit/s.

Nouveautés également pour **Teledyne LeCroy** qui a précisé que sa gamme d'oscilloscopes LabMaster 10Zi-A était désormais dotée de nouveaux récepteurs IQ à largeurs de bandes très étendues, de 42 GHz et 70 GHz, et d'un logiciel d'analyse intégré, Optical-LinQ, afin de tester les signaux optiques DP-QPSK et DP-16QAM à des débits de 32 Gbauds et jusqu'à 130 Gbauds. Côté record, les sociétés **Xtera Communications**, via sa solution d'amplification Wise Raman, et **Corning**, avec sa fibre optique unimodale Vascade EX2000 à très faible perte, ont annoncé un nouveau record de transmission à 100 Gbit/s par longueur d'onde, sur une distance de 627 kilomètres. Ceci a été obtenu sans répéteur ni équipement actif. Cette démonstration s'est déroulée sur une liaison de l'opérateur chinois State Grid Information & Telecommunication (SGIT).

Partie exposition

Toutes ces nouveautés étaient exposées sur environ 200 stands. On notait, comme les années précédentes, une très forte mobilisation des entreprises chinoises tirées par l'explosion du déploiement à très grande échelle du FTTx sur leur territoire national. D'autres nationalités étaient bien représentées comme les États-Unis, la Corée ou le Japon ainsi que plusieurs pays européens dont l'Allemagne. Celle-ci regroupait ses exposants sur deux stands largement dimensionnés répartis de part et d'autre d'une allée centrale. Les entreprises françaises étaient plus disséminées. On retrouvait Apex Technologies, BKtel Photonics, CAllabs, Data-Pixel, Egide, Light Tec, Yenista Optics, dont le nom s'étalait visiblement sur les porte-badges des participants, et les filiales françaises de Keysight Technologies et Teledyne LeCroy.



Jeff Demain (Intel)

Figure 6. Entrepôt de données de Facebook à Prineville (Oregon).

Cette partie exposition était complétée, comme à l'accoutumée, par trois zones ouvertes à tous et dédiées aux informations sur les marchés (la salle « Market Focus »), aux équipements des applications FTTx et centres de données (le « Village FTTx ») et à la formation et mise en œuvre des fibres optiques (le « CTTS training center »). Le Market Focus consiste en une salle de conférences d'entrée libre dans laquelle, durant trois jours, une trentaine de présentations furent faites. Trois thèmes ont été largement débattus : le développement des puces photoniques dont celles créées par de jeunes pousses sans usine ; l'évolution des réseaux d'opérateurs aussi bien côté équipements que gestion par logiciel type SDN pour absorber la croissance du trafic et le déploiement des applications FTTx ; le changement de taille des centres de données visant l'hypertrophie. À ce sujet, il faut noter les informations fournies par Jeff Demain (Intel) concernant l'entrepôt de données de Facebook situé à Prineville

dans l'État de l'Oregon (USA) dont l'installation a nécessité 6400 kilomètres de fibres optiques (cf. figure 6) ! Le village FTTx est un espace ouvert, de près de 40 exposants (cf. figure 7), offrant aux visiteurs des démonstrations de modes de déploiement de la fibre optique dont la technique de pose par soufflage, de calibration de micro conduites, d'éléments d'un réseau optique passif en gigabit ethernet (GE-PON), de divers équipements pour les opérateurs et les fournisseurs de services Internet et bien plus encore. La zone formation était animée par l'organisme CTTS (Cable telecommunications training services) qui permettait à chacun de s'initier aux techniques de soudure de fibres, de montage de connecteurs, d'emploi d'équipements de tests pour réseaux PON et de mesures associées, etc. Pensez dès maintenant à noter le prochain rendez-vous – ECOC 2016 – qui se tiendra en Allemagne, à Düsseldorf, du 18 au 22 septembre 2016 (www.ecocexhibition.com).



J.-M. Mur

Figure 7. Vue partielle du village FTTx.

Acronymes vus dans l'article

- CFP** – *C form-factor pluggable*, la lettre C est l'écriture romaine du nombre 100.
- CFP8** – dernière évolution du standard CFP qui, dans une taille quasi semblable au CFP2, limité à 100 Gbit/s, est conforme aux recommandations du groupe de travail IEEE P802.3bs sur les interfaces électriques CDAUI du 400 GbE.
- CDAUI-8** – *CD attachment unit interface*, les lettres CD sont l'écriture romaine du nombre 400, et 8 pour la transmission d'un débit de 8 x 50 Gbit/s.
- CDAUI-16** – *CD attachment unit interface*, avec 16 pour la transmission d'un débit de 16 x 25 Gbit/s.
- EDFA** – *erbium doped fiber amplifier*, amplificateur à fibre dopée à l'erbium.
- FTTx** – *fiber to the x*, fibre jusqu'à... avec x = H pour home, B pour building, etc.
- GbE** – gigabit ethernet dont le 100 GbE à 100 Gbit/s et le 400 GbE à 400 Gbit/s.
- IQ modulation** – *in-phase and quadrature modulation*, modulation en phase – I – et à 90° en quadrature – Q.
- MIMO MDM** – *multiple-input multiple-output mode-division-multiplexed*, multiplexage par répartition modale à multiples entrées et multiples sorties.
- OM** – fibre optique multimodale avec les variantes OM1, OM2, OM3 et OM4 : plus le chiffre est élevé, meilleures sont les performances.
- PAM-4** – *pulse amplitude modulation*, type de modulation à quatre niveaux d'amplitude différents, chacun représentant la combinaison de 2 bits : 00, 01, 11 et 10.
- PON** – *passive optical network*, réseau optique passif utilisé dans le déploiement de l'application FTTx.
- PSM4** – *parallel single mode fiber*, transmission en parallèle sur quatre fibres unimodales.
- QAM** – *quadrature amplitude modulation*, modulation d'amplitude en quadrature dont l'ensemble des combinaisons est appelé une constellation, leur nombre est situé avant le sigle comme 16QAM ou après QAM16.
- SDM** – *space division multiplexing*, mode de multiplexage s'appuyant sur des fibres multi cœurs.
- SDN** – *software defined network*, réseau de communications par fibres optiques géré par logiciel.
- SWDM** – *shortwave wavelength division multiplexing*, nouveau mode de multiplexage dédié spécifiquement aux centres de données équipés de fibres multimodales.
- SWDM4** – le chiffre 4 indique le nombre de canaux, d'où en ethernet le débit de 4 x 25 Gbit/s soit 100 GbE.
- TWDM** – *time and wavelenght division multiplexing*, multiplexage par répartition en longueur d'onde et en temps.
- WMMF** – *wideband multimode fiber*, fibre optique multimodale à bande élargie afin de transmettre plus loin.

■ Conférence internationale sur l'héritage d'Ibn al Haytham

Dans le cadre de la célébration de l'Année Internationale de la Lumière et des techniques basées sur la lumière, l'UNESCO a abrité, les 14 et 15 septembre 2015, la première conférence internationale dédiée à l'héritage d'Ibn al Haytham qui est considéré comme l'un des pionniers de l'optique avec son livre fondateur Kitāb al-Manāẓir (Le livre de la vision), publié il y a presque 1000 ans (en 1028). Plus de 200 participants ont été accueillis.

L'ouverture de la conférence a été assurée par la Directrice générale de l'UNESCO Irina Bokova qui a déclaré dans son allocution « *aujourd'hui, en ces moments d'importantes mutations, où l'ignorance et l'extrémisme se répandent, il est essentiel de tout faire afin d'enseigner l'histoire commune de l'humanité et de partager ensemble l'histoire des femmes et des hommes qui avaient tout donné pour transformer notre monde d'aujourd'hui. Ibn al-Haytham se démarque dans ce «panthéon» comme un grand savant et humaniste* ». De son côté, John Dudley, Président du comité de pilotage de l'Année Internationale de la Lumière, a souligné que « *La conférence d'aujourd'hui nous rappelle que l'UNESCO joue un rôle essentiel dans la protection et la préservation de l'héritage des idées* ».

La séance inaugurale a également vu la participation précieuse de Mohamed Amr, Ambassadeur et Délégué permanent de l'Égypte et de la Présidente du Conseil exécutif de l'UNESCO, Ziad Aldrees, Ambassadeur et Délégué permanent du royaume d'Arabie Saoudite auprès de l'UNESCO, et Cheikh Faisal Bin Qasim Al-Thani, Fondateur et président de la



Fondation Al Faisal Sans frontières.

Ces deux journées de conférence, organisées avec la participation du groupe international de travail « Ibn al Haytham », ont permis à de grands noms de l'histoire des sciences tels que les Professeurs Roshdi Rashed et Josef Van Ess, ainsi qu'à des experts internationaux de la recherche et du développement technologique, d'apporter un nouvel éclairage sur les défis actuels de la recherche et de l'éducation dans le monde arabe et musulman. Les thématiques abordées lors de cette conférence ont concerné aussi bien l'histoire de l'optique et l'impact des sciences de la lumière sur la vie des citoyens que la situation actuelle de l'optique-photonique dans le monde arabo-musulman en prenant

comme exemples l'Algérie, la Tunisie, le Liban, l'Arabie Saoudite et la Turquie. Les conférences ont été une occasion pour une meilleure appréhension de l'impact des travaux d'Ibn al Haytham sur le développement des sciences modernes. En marge de cet événement a été organisée une exposition qui a présenté des copies de plusieurs manuscrits de savants de la Civilisation Islamique (produits par la bibliothèque nationale du Qatar).

Parmi les résolutions prises lors de la table ronde organisée à la fin de cette conférence, on peut noter en particulier le lancement d'une société savante internationale « Ibn al Haytham International Working Group » afin de pérenniser les actions entreprises à l'occasion de cette année 2015.

www.iyl2015.org

www.ibnalhaytham-iwg.org

Contacts

Prof. Azzedine Boudrioua, IWG :
boudrioua@univ-paris13.fr

Dr. Jean-Paul Ngome Abiage, UNESCO HQ :

jj.ngome-abiaga@unesco.org

Prof. John Dudley, IYL 2015 :
john.dudley@univ-fcomte.fr

■ PRIX & DISTINCTIONS

Prix d'Instrumentation en Chimie Physique 2015

Le prix d'Instrumentation décerné chaque année par la Division de Chimie Physique récompense la personne ou l'équipe à l'origine d'une instrumentation innovante : cette année, le jury, formé de professionnels de la recherche et de l'industrie, a décidé de récompenser deux projets (voir le site www.divcp.fr), dont l'un s'appuie sur des composants optiques.

Frédéric Kanoufi (ITODYS, UMR 7086, Université Paris Diderot) et Gilles Tessier (Laboratoire de Neurophotonique,

UMR8250, Université Paris Descartes), ont mis au point un dispositif de suivi nanométrique de nanoparticules réactives. Leur instrument propose la lecture d'événements discrets chimiques de nanodomains individuels en combinant (i) une localisation optique 3D, sensible et précise de nanoobjets et (ii) une caractérisation/actuation électrochimique précise d'événements physico-chimiques individuels. L'objectif est de fournir une description complète des réactions/interactions de nanodomains ou nanoparticules

(NPs) individuels avec une interface. Ils utilisent un microscope holographique : le faisceau d'un laser monomode ($\lambda = 532 \text{ nm}$) est séparé en deux voies afin de produire un hologramme sur un capteur CCD (images 512×512 , 1 pixel = $0.08 \mu\text{m}$, cadence = 40 Hz). La figure d'interférence obtenue porte ainsi une information sur l'amplitude et la phase de la lumière diffusée par les particules. La reconstruction numérique de la propagation de l'onde permet d'obtenir une image 3D de l'échantillon.

Résumé du rapport ANSES sur les effets sanitaires potentiels des technologies audiovisuelles stéréoscopiques 3Ds

Émilie COLIN

emilie.colin@quantel-laser.com

Le passage des techniques analogiques aux techniques numériques rend les technologies 3Ds¹ plus abordables. Après la généralisation des films en 3Ds, l'offre de téléviseurs, de consoles de jeux, de tablettes 3Ds ne cesse de croître. Face à un tel engouement, se pose la question de l'impact de ces nouvelles technologies sur la santé en cas d'exposition prolongée, et tout particulièrement pour les enfants et adolescents.

En 2011, L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) s'est saisie de la question afin d'analyser les risques encourus par les différents types de populations. Un rapport de 132 pages a été rendu le 6 juillet 2014. Les conclusions de l'ANSES sont claires : elle recommande que les enfants de moins de 6 ans, dont le système visuel est immature, évitent toute exposition aux technologies audiovisuelles stéréoscopiques 3Ds et que les enfants de moins de 13 ans en fassent un usage modéré.

Positionnement du problème

Afin de mieux comprendre les impacts de ces nouvelles technologies, commençons par définir la perception tridimensionnelle. La perception de l'espace en 3 dimensions fait intervenir différents facteurs dont la vision stéréoscopique, c'est-à-dire la perception de la profondeur et de la distance d'un objet résultant du chevauchement des champs de vision des deux yeux. Chaque œil perçoit l'objet avec un angle de vue différent créant des images rétiniennes différentes. Cette différence est exploitée par le cerveau qui fusionne les deux images pour mieux percevoir l'objet en 3Ds.



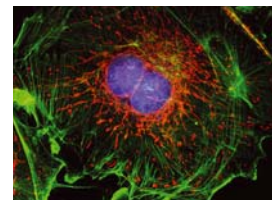
En conditions naturelles, les yeux convergent et accommodent (modification de la courbure du cristallin afin d'obtenir une image nette) à même distance – en l'occurrence à la distance de l'objet observé dans le monde réel. En vision 3Ds, ce principe physiologique n'est pas respecté : la vergence² s'effectue bien

acal | bfi

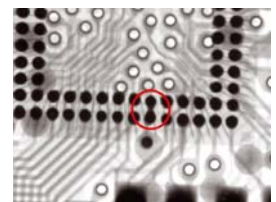


Voir au-delà du visible !

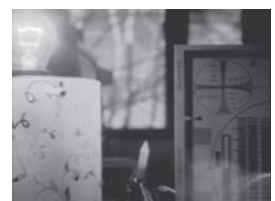
Caméras UV



Caméras rayons-X



Caméras forte dynamique VIS et NIR



Spectroscopie
Fluorescence
Inspection
Contrôle de process

...

Pour plus d'informations
imaging.fr@acalbfi.fr
01 60 79 59 46
www.acalbfi.fr

¹ La terminologie appropriée aux technologies utilisant la vision stéréoscopique est « 3D stéréoscopique » ou en abrégé « 3Ds » - et non « 3D » afin d'éviter la confusion avec la représentation tridimensionnelle monoscopique.

² Vergence : mouvement des deux yeux dans lequel les axes visuels cessent d'être parallèles ; ils peuvent se rapprocher (vergence) ou s'éloigner (divergence) de façon à ajuster l'angle des axes optiques en fonction de la profondeur de l'objet fixé. Il y a vergence pour un objet proche et il y a divergence pour un objet lointain.

à la distance perçue de l'objet virtuel (en avant ou en arrière-plan de l'écran) alors que l'accommodation se fait au niveau de l'écran. Il existe cependant une « zone de confort » limitée pour laquelle le conflit entre accommodation et vergence reste modéré rendant le confort visuel acceptable.

Les effets possibles du conflit accommodation-vergence doivent donc être étudiés en matière de confort visuel et de risques sanitaires potentiels. L'effet identifié le plus important est la fatigue visuelle ; elle se traduit par une fatigue et des douleurs péri-oculaires, la sensation d'œil sec, des troubles de la vision, et des troubles extra oculaires (maux de tête, douleurs au cou, maux de dos et épaules). D'autres effets peuvent potentiellement apparaître, comme ceux liés à l'équilibre postural ou à l'appréciation du réel.

Les risques sanitaires étudiés sont très dépendants des capacités visuelles des observateurs (différences individuelles importantes : âge, capacité visuelle stéréoscopique, présence de pathologie visuelle) ainsi que de la qualité technologique des interfaces audiovisuelles 3Ds et des contenus utilisés. Par ailleurs, il n'existe pas à ce jour de réglementations garantissant l'adéquation des produits et des contenus 3Ds au respect des contraintes physiologiques de l'observateur. Cependant, conscients des difficultés techniques existantes et des effets signalés, les principaux acteurs commerciaux et industriels de la 3Ds travaillent sur l'optimisation des techniques de restitution du relief et sur la création de labels de qualité de films en relief afin de garantir un confort visuel optimal.

Recommandations et législation

Les recommandations des fabricants de dispositifs 3Ds sont à ce jour limitées. Conseiller aux enfants de cesser d'utiliser la console de jeux « s'ils se sentent mal ou malades » semble très illusoire tant ces notions sont subjectives pour un enfant. S'il est possible de limiter le temps d'exposition des sujets à risque (notamment les plus jeunes) dans une salle de cinéma, son contrôle deviendra beaucoup plus difficile avec l'essor programmé des téléviseurs, tablettes et consoles de jeux

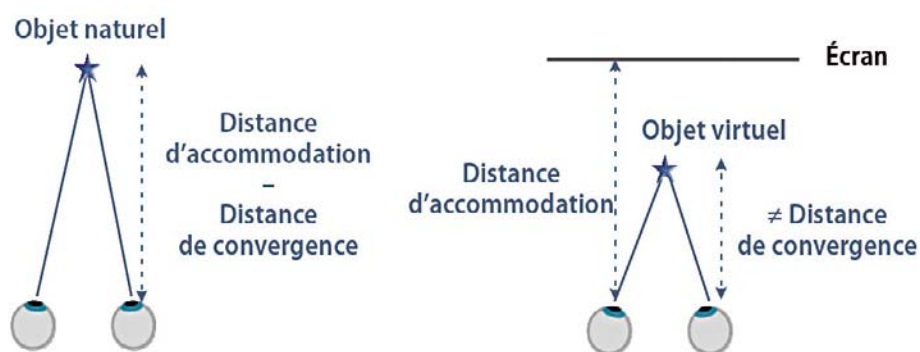


Figure 1. Distances d'accommodation et de vergence en situation naturelle (à gauche) et en situation d'interfaçage 3Ds (à droite).

3Ds. Il deviendra tout aussi compliqué de maîtriser la distance entre l'écran 3Ds et l'observateur. En effet, plus le spectateur est éloigné de l'écran stéréoscopique (cinéma ou télévision), plus faibles sont les disparités rétinienne subies, et moindres sont les contraintes sur son système visuel. L'ANSES incite donc à sensibiliser les professionnels médicaux de la petite enfance, ophtalmologistes sur les mécanismes mis en jeu lors de la visualisation d'interfaces 3Ds afin d'informer au mieux les parents.

Le monde professionnel est également concerné. En effet, les avantages de la 3Ds sont nombreux pour l'observateur : l'effet sensoriel d'immersion, une meilleure perception de la profondeur de l'espace observé, une localisation du sujet dans un environnement virtuel dans lequel il peut interagir à l'échelle 1 par son corps. Son usage pourrait donc se développer dans les applications professionnelles pour la visualisation scientifique comme des systèmes d'imagerie spatiale ou géographique, la CAO pour des revues de projet, le marketing grâce aux effets plus réalistes et spectaculaires, le domaine médical au travers des techniques de réalité augmentée en chirurgie, la télérobotique nécessitant une perception visuelle performante à l'extrémité du robot télécommandé, le domaine militaire, etc. L'ANSES conseille donc d'adapter les temps d'exposition des professionnels à ces technologies 3Ds en fonction des tâches assignées et des sensibilités individuelles. Il est également important de sensibiliser la médecine du travail à son rôle d'information des

salariés afin de détecter les éventuelles pathologies visuelles et d'assurer un suivi des salariés exposés dans la durée. L'ANSES précise qu'il est toutefois possible de limiter la fatigue visuelle en suivant quelques règles simples :

- **Conserv**er ses **corrections optiques** pendant la visualisation de contenus 3Ds.
- **Limiter les temps d'exposition** aux interfaces 3Ds dès les premières apparitions de symptômes et consulter un ophtalmologiste afin de dépister d'éventuelles pathologies.
- **Diminuer l'impression de relief**, par exemple en s'éloignant de l'écran ou en diminuant la quantité de relief sur un téléviseur.

Et, bien sûr, lire les notices des dispositifs 3Ds, et suivre leurs recommandations. Afin d'avoir une approche plus globale sur les effets sanitaires des technologies 3Ds, le groupe de travail de l'ANSES encourage donc fortement les recherches fondamentales et épidémiologiques qui permettront de collecter davantage de données sur le développement des systèmes binoculaires de l'enfant, sur les conséquences à long terme des expositions à la 3Ds à tous les âges de la vie, sur leurs conséquences psychologiques (addiction, perte de concentration), ainsi que sur leurs effets sur l'équilibre, le contrôle postural et la marche.

Référence

« Effets sanitaires potentiels des technologies audiovisuelles en 3D stéréoscopique », Rapport d'expertise collective ANSES, juillet 2014.

■ 4^e Congrès des applications des fibres optiques

La quatrième édition du Congrès francophone des applications des fibres optiques s'est tenue à Paris, dans le cadre du salon ENOVA, les 22, 23 et 24 septembre 2015. Trois journées étaient dédiées aux applications des capteurs et réseaux de capteurs à fibres optiques, aux fibres dans les réseaux de communication d'opérateurs et dans les bâtiments, et aux nouvelles fibres optiques et technologies amont. Comme lors des éditions précédentes, des experts et des utilisateurs ont fait part des avancées et des réalisations concrètes dans chacun de ces domaines. Exemples clés...

« **E**n 10 ans, la Chine est devenue le premier pays en nombre de brevets déposés dans le domaine des capteurs et réseaux de capteurs », c'est ainsi que Pierre Ferdinand (CEA) a lancé la journée concernant les applications des capteurs à fibres optiques. Fort heureusement pour notre moral – et pour notre économie – d'autres intervenants ont démontré que la France a du savoir-faire en ce domaine. Citons IDIL fibres optiques dont le directeur R&D, Lionel Quetel, a développé les utilisations des réseaux de Bragg dans les capteurs ou celles de sources de fluorescence pour des mesures de concentration en CO₂. HBM a présenté l'utilisation des capteurs à réseaux de Bragg en l'air, dans les satellites de télécommunications, et sous terre, pour la surveillance structurale de tunnels. Toujours sous terre, Cementys a expliqué comment fournir un profil de température d'un câble électrique de forte puissance enterré et, comment détecter des fuites sur des digues de manière autonome

grâce aux capteurs et aux panneaux photovoltaïques. FT mesures a traité de la surveillance de structures en béton et a élargi à un domaine très particulier, celui de la mesure de pression absolue dans un champ magnétique à une température de -150 °C. Le conférencier de Safran a expliqué le choix de l'instrumentation par fibres de matériaux composites pour les carters de réacteurs d'avions. Enfin, venu du Canada, le directeur commercial d'Opsens, Charles Leduc, nous a emmenés dans le domaine maritime avec l'application de capteurs étanches pour les conduites forcées sous-marines.

« **Il est nécessaire de multiplier par deux le rythme actuel de déploiement du FTTH (fiber to the home) pour pouvoir respecter l'objectif gouvernemental de 2022** », ce fut l'injonction de Jean-Pierre Bonicel (Objectif fibre et Sycabel) pour ouvrir la journée sur les réseaux de communication en fibres optiques. Il a été soutenu par les autres conférenciers, à commencer par Didier Cazes (Orange) qui a évoqué

l'extinction, à terme, de la boucle locale en cuivre. Le directeur de TKF France, Gérard de Tollenaere, a insisté sur le fait que de nouvelles solutions existent pour faciliter le travail des équipes sur le terrain et, ainsi, réduire les coûts d'investissement et d'exploitation. De même, Laurent Gasca (Prysmian) a présenté l'ensemble des règles de l'art qui peuvent être mises en œuvre pour l'installation des réseaux, y compris en installations aériennes. En appui, Vincent Féru, chargé de mission numérique, a détaillé la démarche du projet Bretagne Très Haut Débit qui traduit la volonté des collectivités bretonnes d'apporter le THD à tous ses habitants.

Pour les réseaux en fibres optiques dans les bâtiments, le ministère de l'Intérieur a offert un retour d'expérience sur l'installation de divers réseaux informatiques basée sur l'application de la fibre jusqu'au bureau (*fiber to the office* – FTTO). Quant à l'habitat, il fut traité par Catherine Lepers (Télécom Sud Paris), à travers l'application du réseau local domestique optique (RLDO), confortée

— 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

par IDIL fibres optiques via la réduction de consommation des équipements d'un réseau personnel. Enfin, quelle que soit la taille d'un réseau en fibres optiques, il y a des points communs. Ainsi, Laurent Colomer (Photon Lines) a insisté sur les meilleures méthodes permettant le bon nettoyage des embouts des fibres optiques car une simple poussière est à l'origine de 80 % des pannes de réseaux ! Sa présentation a été complétée par celle d'E2M concernant la propreté lors de l'emploi de réflectomètres optiques. Anil Akerkar (Itochu France) a dévoilé l'évolution des technologies de soudeuse pour les nouvelles topologies de réseaux. Enfin, grâce à Script&Go, la tablette numérique s'invite dans les outils d'aide aux déploiements horizontal et vertical via des logiciels spécifiques.

« **L'année 2006, a vu naître la première fibre optique en chalcogénure guidant la lumière.** S'en suivirent des inventions et applications comme en 2009, première détection d'une espèce chimique, le gaz CO_2 ; en 2010, première fibre à cœur creux avec des pertes inférieures à 1 dB/m ; en 2011, première fibre à cœur creux guidant la lumière... », c'est ainsi que David Méchin (Perfos) nous emmena visiter le domaine des fibres micro structurées et leurs très nombreuses applications. Ceci fut complété par d'autres conférenciers du laboratoire Xlim, tel Philippe Roy avec les fibres optiques actives pour lasers de



forte puissance et Vincent Coudert avec des fibres optiques à structure asymétrique pour faire de la microscopie non linéaire ; ou d'entreprises comme Ifsttar avec un capteur à fibre optique polarimétrique peu sensible à la température, Le Verre Fluoré qui a développé des capteurs de température pour la mission spatiale Exomars, et Schott dont la grande diversité de fibres optiques fait qu'elles sont présentes dans de nombreux équipements médicaux et chirurgicaux.

Ensuite, parmi les nouveautés dans les applications de réseaux, l'invention de la jeune pousse CALLabs permet l'augmentation du débit des fibres multimodales par multiplexage par groupe de modes, graal pour les anciens réseaux locaux d'entreprise tournant avec ethernet sur fibres multimodales OM1 ou OM2 qui, ainsi, retrouvent une seconde jeunesse en acceptant le 10 Gbit/s. Le directeur

d'Infractive, Mathieu Husson, propose l'emploi de fibres noires inutilisées pour assurer les tests d'interconnexion de centres de données (data center). La téléphonie mobile ou, plus précisément l'installation des antennes et stations de base des futurs réseaux 4G+ et 5G, sera facilitée grâce aux nouveaux systèmes d'interconnexion FTTA (*fiber to the antenna*) de Radiall, commercialisés début octobre 2015. Et ce fut la dernière conférence de ce congrès : le point sur les recherches des nouvelles architectures de réseaux passifs (*passive optical network* – PON) qui doivent répondre au défi du déploiement du FTTH pour des centaines de millions d'abonnés.

Rendez-vous à la cinquième édition du congrès qui se déroulera sur deux jours seulement, les 14 et 15 septembre 2016.

Jean-Michel MUR
Jm.mur@orange.fr

Vous souhaitez suivre de près l'actualité de votre revue Photoniques ?

Inscrivez-vous à l'e-news

Tous les 15 jours, une **e-news** relaie les dernières informations

Faites votre inscription sur :
www.photoniques.com



@Photoniques_edp



Mesures et procédés photoniques pour l'industrie

La photonique présente des caractéristiques avantageuses pour l'industrie, comme le contrôle rapide et non intrusif, la possibilité d'utilisation en milieu hostile, la variété des fonctions accessibles, la précision intrinsèque de la technique (à l'échelle de la longueur d'onde optique !). Pourtant, jusqu'au début des années 2000, sa complexité de mise en œuvre et l'encombrement des outils photoniques ont freiné sa démocratisation dans les lignes de production. Depuis une dizaine d'années, ce n'est plus le cas : les ingénieurs et industriels ont opéré une petite révolution en termes de compacité, de fiabilité, d'ergonomie et de coût, qui a imposé les mesures et procédés photoniques dans de nombreux secteurs industriels.

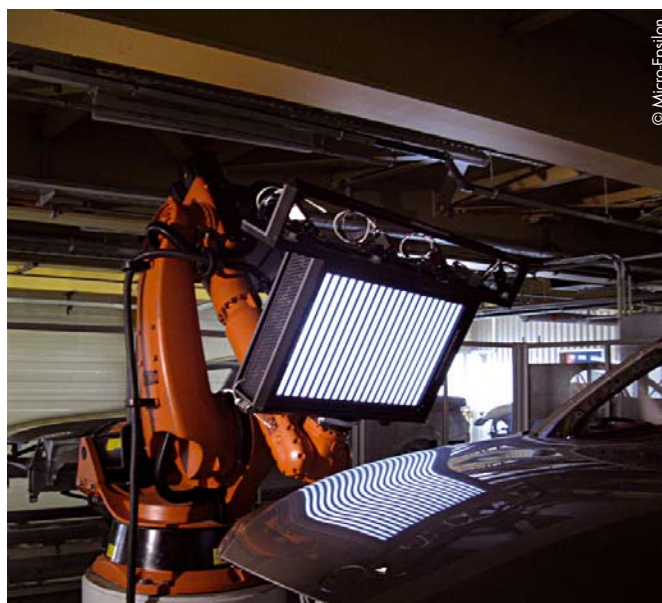
Désormais, qu'elle soit laser ou non, la lumière est omniprésente dans l'industrie. Si les applications classiques concernent encore les techniques de production (ce que l'on appelle l'« usinage photonique »), son utilisation diffuse désormais dans le contrôle et l'instrumentation (alignement, comptage, analyse de matériaux, caractérisation de surface) grâce à des techniques variées, comme la spectroscopie, l'analyse d'image, la déflectométrie... Elle est aussi indispensable dans le domaine du semi-conducteur, et donc des objets du numérique, avec la photolithographie, la recristallisation de surface ou la photopolymérisation.

Dans les pages qui suivent, nous vous proposons un zoom sur trois grandes familles de procédés photoniques pour l'industrie : l'usinage, la vision et la métrologie.

L'usinage par la lumière

Cette activité est historiquement reliée aux lasers : le choix en longueurs d'onde et en durées d'impulsion, ainsi que la possibilité d'une focalisation à l'échelle de la longueur d'onde permettent d'optimiser les interactions matière-lumière, afin de cibler une fonction particulière. Les premiers lasers à CO₂ (années 60) ont été utilisés dans l'industrie pour l'usinage du métal : découpe, soudure, perçage. Les lasers à solide (Nd:YAG) et à excimère ont permis une plus grande variété d'applications, grâce à d'autres longueurs d'onde et à des modes d'émission impulsions, permettant le contrôle des phénomènes thermiques.

Après une course à la puissance pendant les années 90, il y eut la révolution des diodes : les efforts d'innovation technologique très importants portés par le marché des télécommunications ont permis de produire des diodes lasers fibrées à très faible prix et avec une très longue durée de vie. Associées aux fibres dopées, aux nouveaux composants fibrés (isolateurs, modulateurs), elles ont permis la mise sur le marché de nouvelles générations de lasers industriels. D'un faible coût, dotés d'un haut rendement à la prise, compacts et adaptables sur des robots multi-axes, ils ont vite rencontré le succès. La fiabilité de ces nouvelles sources, leur finesse d'intervention et leur compatibilité avec de très nombreux



Contrôle qualité industriel des surfaces réfléchissantes par déflectométrie.

Témoignage

Le micro-usinage laser

« Les procédés de micro-usinage laser que nous développons pour nos clients et partenaires industriels s'appuient sur une recherche appliquée que nous menons au meilleur niveau international. Nos travaux sont salués dans les principales conférences d'une communauté très dynamique. Les enjeux industriels sont importants avec l'élargissement de l'utilisation des lasers à impulsions courtes et ultra courtes : microélectronique et micromécanique, usinage des matériaux transparents, mais aussi fonctionnalisation de surface en alternative aux procédés chimiques, avec de très grands champs d'application. Notre organisation et notre démarche qualité nous permettent de satisfaire aux exigences de nos clients et partenaires en termes de maîtrise et de performance de nos solutions pour les procédés industriels ou les équipements médicaux. »

Benoît Appert-Collin, directeur d'ALPhANOV



matériaux ont permis le développement d'une nouvelle classe d'applications de haute précision : le micro-usinage, le marquage ou la structuration de surface avec des débouchés notamment pour le luxe, la pharmacie ou le textile, en plus des traditionnels secteurs de l'aéronautique et de l'automobile.

Le secteur émergent et en plein essor de l'impression 3D repose également sur les progrès du laser. L'impression tridimensionnelle désigne les procédés de fabrication additive. Initialement développés pour le prototypage rapide, ils ont considérablement gagné en précision d'usinage depuis quelques années, et leur utilisation s'étend désormais à la fabrication de pièces fonctionnelles. Parmi les techniques les plus développées, notons le frittage sélectif par laser (FSL en français, ou SLS pour *selective laser sintering* en anglais). Le FSL est utilisé pour créer des objets 3D, strate par strate, à partir de poudres qui sont frittées ou fusionnées avec un laser de forte puissance, comme un laser CO₂. Grâce à la variété des matériaux pouvant être utilisés par ce procédé, une large gamme d'applications est possible. De l'aéronautique à l'électronique en passant par l'automobile, de nombreuses entreprises utilisent la FLS pour accélérer la conception, le développement et l'introduction sur le marché de nouveaux produits.

La vision industrielle

La vision industrielle, qui intègre directement des systèmes d'analyse d'image et d'analyse spectroscopique dans les process de fabrication et de production, peut constituer un puissant levier de productivité. Ce secteur bénéficie aujourd'hui du boom des imageurs bas coût et du développement de systèmes photoniques capables de suivre la cadence des chaînes de production, et parvient à proposer des systèmes « clés en main » de contrôle par vision. Leurs performances pointues (comme la capacité à lire des codes de plus en plus fins), leur diversification (contrôle de forme et de déformation, ou analyse de couleur avec des gammes spectrales allant du visible à l'infrarouge lointain) et leur fiabilité leur ouvrent des marchés novateurs et extrêmement variés : citons le contrôle qualité sur une chaîne de production (contrôle et inspection de pièces manufacturées par vision) ; le contrôle de maturité de fruits ou de légumes pour l'industrie agro-alimentaire ; ou encore le contrôle sécuritaire de l'environnement industriel (analyse des déchets et effluents).

La vision industrielle s'invite dans des secteurs extrêmement variés.

Elle permet notamment d'optimiser l'injection de carburant dans les moteurs thermiques, essentiellement pour diminuer la consommation et réduire l'impact environnemental. Un élément-clé est en effet la géométrie du jet ainsi que son évolution au cours du cycle d'injection : il faut apporter la juste quantité de carburant, avec la meilleure granulométrie, au bon endroit de la chambre de combustion et au moment optimal. Il est également possible d'ajouter la mesure de la température en chaque point du jet par fluorescence différentielle.

Une application en plein essor est celle de l'imagerie 3D. Plusieurs techniques permettent d'imprimer des images pouvant donner une impression de profondeur. Il y a l'image stéréoscopique nécessitant le port de lunettes spécifiques, bicolores ou polarisantes, permettant

au cerveau de reconstituer une vision stéréoscopique. Il y a aussi l'holographie, où le support est un film transparent pour une image en transmission ou un film argenté pour une image en réflexion, contenant une figure d'interférence obtenue avec un laser ; la diffraction sur cette figure, à l'instar d'un réseau de diffraction, crée une image volumique visible à l'œil nu. L'holographie 3D trouve de multiples applications pour la lutte contre les contrefaçons (hologramme de sécurité de nos cartes bancaires) ou le stockage d'informations (mémoire optique), mais également pour le contrôle et la mesure dans les process industriels : le positionnement tridimensionnel de petits objets (de l'ordre de 10 à 100 fois la longueur d'onde), par exemple pour la localisation de traceur dans un jet en mécanique des fluides ; ou, en étudiant l'hologramme d'un objet au cours du temps, la mesure des défauts de structures ou d'endurance ; ou encore l'étude de liquides transparents, en y cartographiant les évolutions de température ou de concentration via les changements d'indice de réfraction du liquide...

La métrologie photonique

La photonique propose des solutions alternatives aux procédés traditionnels pour l'ensemble des métrologies avec, souvent, des performances supérieures et, systématiquement, les avantages du « sans contact ». Outre les désormais classiques profilomètres photoniques 2D/3D qui remplacent les profilomètres tactiles, il y a de nombreuses techniques en plein essor : la spectrométrie LIBS (*laser induced breakdown spectroscopy*), les capteurs à fibres, ou la déflectométrie...

La **spectrométrie LIBS** est une méthode analytique des matériaux, basée sur l'utilisation d'un laser de haute énergie et d'une détection optique. Elle présente de nombreux avantages (rapidité de mesure, possibilité d'analyse de gaz, de liquides et de solides), qui accélèrent aujourd'hui son utilisation dans les systèmes d'analyse. Les applications vont de l'analyse d'échantillons (toxicité, pureté) pour l'industrie chimique, jusqu'à la caractérisation d'échantillons archéologiques.

Les **capteurs à fibres optiques** se démocratisent partout où il s'agit de mesurer des déformations et des niveaux de température, grâce à la forte sensibilité des fibres à la température et à l'élongation.

La **défectométrie** permet une mesure de la qualité de surface, ce qui est un point important pour les objets manufacturés, soit pour des raisons d'esthétique (qualité perçue par le client), soit pour des raisons fonctionnelles. La déflectométrie est une technique robuste, non interférométrique, sans contact qui permet de mesurer le champ de pentes et de courbures sur une surface réfléchissante ou partiellement réfléchissante. Elle est particulièrement performante pour détecter les défauts locaux, et permet de mesurer la qualité d'aspect des surfaces.

Pour en savoir plus

- La lumière et ses applications, fascicule édité par la SFP et la SFO (2015)
- Site du club « CMOI », www.club-cmoi.com
- Site du club « Lasers et procédés », www.laserenligne.fr

ALPhA NOV

Centre Technologique Optique et Lasers

Vos procédés de micro-usinage laser sur mesure

Grâce à son expertise en micro-usinage laser, ALPhANOV, le centre technologique du pôle de compétitivité Route des Lasers, vous accompagne dans le développement de vos procédés laser sur mesure.

De l'idée à l'industrialisation

Nous maîtrisons l'usinage de matériaux aussi différents que les métaux, les polymères, les verres et cristaux, le silicium, les céramiques ou les matériaux composites. Nous pouvons adapter nos procédés de découpe, marquage, gravure ou texturation de surface à vos contraintes particulières : vitesse de réalisation, production en continu, taille et accessibilité des pièces à usiner, coût objectif. Nous vous accompagnons tout au long du processus de développement de l'étude de faisabilité à la définition et la réalisation de systèmes de production sur mesure.



Parmi nos dernières réalisations, la découpe du verre sans conicité.

Un parc matériel unique en Europe

Nous nous appuyons sur un parc matériel unique en Europe, nous permettant de maîtriser le procédé lui-même mais aussi sa caractérisation. Nos sources laser couvrent tous les régimes de fonctionnement, du femtoseconde au continu, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Nos systèmes de mise en forme et d'analyse du faisceau incluent notamment un module de focalisation dynamique et un scanner polygonal. Notre gamme de machines et postes d'usinage 3D s'appuient sur plusieurs têtes de découpe, une tête de trépanation et un robot 6 axes. Le contrôle du résultat des usinages est réalisé grâce à des systèmes de mesure de surface 3D, un microscope électronique à balayage, un microscope confocal à balayage et plusieurs microscopes optiques de haute précision.

Contact
ALPhANOV
 Wilfried VOGEL
 Tél. : + 33 524 545 200
info@alphanov.com

KERDRY

THIN FILM TECHNOLOGIES FOR OPTICAL COMPONENTS

Du nouveau chez Kerdry



Dès le début 2016, KERDRY sera doté d'un aligneur de masque SUSSMicroTec MA8. Cet équipement, dernière génération, permettra de répondre aux spécificités demandées par les différents marchés.

Sur le plan dimensionnel, des wafers de 2 pouces à 8 pouces pourront être traités avec des résolutions de l'ordre du micron.

Au niveau des traitements optiques, les efforts de R&D ont permis un élargissement du spectre optique dans l'infrarouge entre 3 et 14 microns. Ainsi l'offre KERDRY, au niveau optique, se concrétise par des filtres de tous types sur la gamme spectrale allant de 0,35 micron à 14 microns.

Pour le domaine des lasers « picosecondes », KERDRY propose des traitements AR se caractérisant par une tenue au flux de 30 j/cm² mesurée

Le monde des capteurs se miniaturise. De nombreux projets ou applications font appel à l'association de motifs de métallisations complexes avec des filtres optiques sur des surfaces de plus en plus petites tant en dimension qu'en épaisseur, ceci avec des résolutions de positionnement de l'ordre de quelques microns entre les différents traitements qui y sont appliqués.

Fort de ces constations, KERDRY s'implique de plus en plus dans sa recherche et développement pour élargir et solidifier ses compétences et son expertise dans les trois technologies majeures de son cœur de métier que sont : les dépôts métalliques, les traitements optiques, la maîtrise technologique de la photolithographie.

Dans le cadre des dépôts métalliques, l'axe de progression est de perfectionner les couches de protection afin de permettre à nos empilements métalliques de résister efficacement aux nombreux tests climatiques. À titre d'exemple, les résultats plus que probants sur nos miroirs argent protégé sont là pour en témoigner.

KERDRY est toujours en constante amélioration pour satisfaire, avec le plus grand soin et la plus grande réactivité, vos demandes de traitements couches minces

Contact
KERDRY
 Jean-Claude KEROMNES
 Tél. : 02 96 48 84 77 / 06 74 46 38 87
contact@kerdry.com www.kerdry.com



Principales dates

23 juillet 1775 – Naissance à Paris (France)	
1798	Membre de l'Institut d'Égypte
1808	Travaux sur la polarisation, et découverte de la Loi de Malus
1810	Prix de l'Académie des Sciences
1810	Membre de l'Académie des Sciences
1810	Médaille Rumford de la Société Royale de Londres
23 février 1812 – Décès à Paris (France)	

Dessiné d'après la peinture originale communiquée par M. Arago, et gravé par Ambroise Tardieu.

Étienne Louis Malus de Mitry

Riad Haidar, haidar@onera.fr

Ingénieur, physicien et mathématicien français, Étienne Louis Malus participe à l'expédition d'Égypte et fait partie de la première promotion de l'Institut d'Égypte formé par Napoléon. Il est surtout connu pour ses travaux sur la polarisation de la lumière et la Loi de Malus (qui donne l'intensité d'un faisceau lumineux polarisé après transmission par un polariseur), ainsi que pour le théorème selon lequel les surfaces d'onde émises par une source ponctuelle sont orthogonales aux rayons lumineux issus de cette source.

Étienne Louis Malus (de son nom complet, Malus de Mitry) naît à Paris, dans une famille aisée, le 23 juillet 1775, sous le règne de Louis XVI. Il est le fils unique de Louise Desboves et d'Anne Louis Malus de Mitry, Trésorier de France. Étienne est d'abord éduqué à la maison, où ses précepteurs lui donnent de solides bases en littérature et mathématiques. En 1793, avec d'excellents résultats aux examens d'entrée, il intègre la prestigieuse École Royale du Génie, à Mézières, où se forment les ingénieurs militaires. Il suit notamment l'enseignement de Monge, qui détecte vite son grand potentiel pour les mathématiques. Mais presque aussitôt, sa famille tombe sous le coup de la tristement célèbre Loi des Suspects votée sous la Terreur, et il est exclu de l'École. Sans se décourager, Malus s'engage comme soldat au 15^e bataillon de Paris. Il est muté dans le Nord où ses connaissances spéciales le font employer aux fortifications de Dunkerque. De nouveau, il se fait remarquer pour ses dons hors normes : l'ingénieur Lepère, en charge des ponts et chaussées, obtient qu'il soit autorisé à concourir pour la nouvelle École centrale des travaux publics (premier nom de l'École polytechnique). Il réussit brillamment, et est choisi pour exercer, comme chef de brigade, les fonctions de moniteur. Il fait partie des meilleurs étudiants de Fourier, et Monge lui demande même de dispenser, pendant l'une de ses absences, son cours de géométrie analytique.

En 1796, il est nommé sous-lieutenant du Génie, et professe les Mathématiques à Metz. Ses états de service sont tels que le commandant de l'École demande en sa faveur, au bout de quelques mois, une nomination de capitaine : le voici réintégré dans la situation perdue en 1793, lors de son exclusion de l'École du Génie à Mézières. Il confirme puissamment cette nomination en réussissant, en 1798, un nouvel examen passé à l'armée de Sambre-et-Meuse.

Campagne d'Égypte

En 1797, il participe aux manœuvres militaires sur le Rhin. En 1798, il est enrôlé dans l'armée d'Orient qui doit accompagner Napoléon en Égypte. Cette mission, à laquelle il ne peut se soustraire, étant ingénieur militaire, tombe mal : il est alors stationné à Giessen, en Allemagne, et il est sur le point d'épouser la fille du chancelier de l'université. Peu importe : comme à son habitude, Malus surpasse ce coup du sort et, au titre de chef du Génie, se distingue dans plusieurs batailles, tantôt en Syrie, tantôt en Égypte. Avec Fourier et Monge, il fait partie de la première promotion de l'Institut d'Égypte, section mathématiques, que Napoléon fonde au Caire. Mais la campagne militaire est éprouvante : Malus est par deux fois atteint de la peste et doit

interrompre son service actif... Malade, alité, il commence à réfléchir à la théorie de la lumière, s'intéressant notamment au trajet des rayons lumineux réfléchis ou réfractés par une surface de courbure quelconque. À peine rétabli, il reprend son service. Nommé chef de bataillon en 1799 par Kléber, il est confirmé dans ce grade par un décret du Premier Consul.

Après son retour en France, en 1801, Malus sert comme sous-directeur du Génie à Anvers et Strasbourg. Il a alors 26 ans. Quelques années plus tard, il est chargé des fortifications de Kehl, en Allemagne. Pour autant, il n'abandonne pas ses activités scientifiques : à partir de 1805, il est en charge des examens de sortie en géométrie descriptive et en Physique à l'École polytechnique. C'est aussi de cette époque que datent ses premiers travaux originaux, notamment sur la physique de la lumière.

Travaux en optique

Il se familiarise d'abord avec les théories de Huygens sur la nature de la lumière, qu'il publie sous une forme mathématique dans son *Traité d'optique analytique* en 1807. Ce traité, présenté à l'Académie des Sciences, est inséré dans le *Recueil des Savants Étrangers*. Malus rédige également un mémoire sur le pouvoir réfringent des corps opaques.

Sa grande contribution porte sur la polarisation de la lumière. L'histoire est belle : en 1808, des fenêtres de sa maison située sur l'ancienne rue d'Enfer (dont une partie suit le tracé de l'actuelle avenue Denfert-Rochereau à Paris), il observe l'image du soleil réfléchi par les vitres du palais du Luxembourg. Il sait déjà qu'en regardant à travers un cristal de spath d'Islande, il devait percevoir deux images – mais, selon l'angle de réflexion de la lumière sur les vitres et l'axe de révolution du cristal, il parvient à faire évoluer le contraste entre les deux images, et parfois même il n'en voit qu'une. Étant rompu aux travaux de Huygens, il a vite fait de comprendre que, dans son expérience, la réflexion de la lumière sur le verre induit des effets proches de ceux que produirait la traversée d'un premier cristal de spath. Pour expliquer ce phénomène inattendu, il imagine que les particules de lumière (qui ne sont pas encore nos « photons ») possèdent un axe des pôles, susceptible d'une orientation déterminée ; et que cet axe peut s'orienter sous l'influence d'une réflexion sur le verre ou de la réfraction à travers un cristal. **Il donne à ce phénomène le nom de polarisation, une image si intuitive qu'elle survit encore à toutes les interprétations théoriques.** Prolongeant sa découverte, Malus détermine l'angle de cette polarisation par réflexion sur le verre et sur l'eau, qu'elle soit extérieure ou intérieure, puis il étudie la double réfraction, imaginant des appareils ingénieux... Pendant longtemps, les lois qu'il établit resteront enseignées sous le nom de « Lois de Malus ». On lui doit également le théorème (dit de Malus) qui stipule que les surfaces d'onde émises par une source ponctuelle sont orthogonales aux rayons lumineux issus de cette source.

Très vite, c'est la consécration. En 1810, l'Académie des Sciences lance un concours sur « la question des modifications apportées aux rayons lumineux par la traversée des cristaux ». Sans attendre

l'expiration du délai assigné, elle décerne le prix à Malus. Mieux encore : dès le 15 août 1810, Malus, devenu lieutenant-colonel, est élu académicien, et hérite du fauteuil de Montgolfier. La même année, la Société Royale de Londres lui décerne la médaille fondée par Rumford, un fait d'autant plus remarquable qu'on est alors en plein blocus continental. Sa notoriété est telle qu'il fait partie d'un comité composé de Lagrange, Legendre, Laplace et Haüy, nommé par l'Académie des Sciences afin d'évaluer les travaux sur la propagation de la chaleur dans les corps : c'est ce comité qui récompense Fourier en 1811. En 1812, l'École polytechnique nomme Malus directeur des études. Par ses faits de guerre et par ses contributions scientifiques, Malus est fait chevalier de l'Empire, et membre de la Légion d'Honneur...

Mais sa santé, déjà fragilisée à de nombreuses reprises au cours de sa carrière militaire, flanche brusquement. Il décède d'une maladie de poitrine (probablement la tuberculose) à Paris, le 23 février 1812, âgé de seulement trente-six ans. Il repose avec son épouse, née Wihelmine Louise Koch, dans une concession achetée par Gay-Lussac, membre de l'Institut, dans la 10^e division du cimetière du Père-Lachaise.

Pour en savoir plus

[1] J.J. O'Connor, E.F. Robertson, *MacTutor History of Mathematics* (1997)

[2] A. de Lapparent, *Biographie de Malus*, in *Livre du centenaire de l'École polytechnique* (Paris, Gauthier-Villars, 1895)

AGENDA Photoniques



- Formations,
- Salons et conférences,
- Appels à contributions

Retrouvez notre agenda en ligne sur : www.photoniques.com



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

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

www.spectros.ch



Aiguille fibrée pour l'aide au diagnostic du cancer du sein par fluorescence endogène

René FARCY¹, C. BENOIT², R. MOUSTIE², T. EYRIGNOUX², P. BEAUMEL², A. TOULLEC², M.P. FONTAINE-AUPART³

¹ Laboratoire Aimé Cotton, Université Paris-Sud, ENS Cachan, CNRS, Université Paris-Saclay, 91405 Orsay Cedex, France

² Nodéa Médical, 1 mail du professeur Georges Mathé, 94800 Villejuif, France

³ Institut des Sciences Moléculaires d'Orsay (ISMO), Université Paris-Sud, CNRS, Université Paris-Saclay, 91405 Orsay Cedex, France

rene.farcy@u-psud.fr

Les premières étapes dans le diagnostic du cancer du sein sont la mammographie et l'échographie. Nous avons développé une aiguille fibrée biseautée pour effectuer pendant l'échographie une mesure de la fluorescence naturelle à l'intérieur du nodule suspect.

La fluorescence est la propriété de certaines molécules d'émettre des radiations de longueur d'onde plus longue que la lumière ayant servi à les éclairer. Par exemple un tissu en coton éclairé par de la lumière ultraviolette émet de la lumière blanche.

De nombreuses molécules ayant des propriétés de fluorescence naturelle (dite fluorescence endogène) sont présentes dans l'organisme. On citera par exemple le NADH coenzyme d'oxydoréduction présent dans toutes les cellules vivantes, les riboflavines (vitamine B2) ou les flavoprotéines qui ont la propriété d'émettre du vert et du rouge lorsqu'elles sont éclairées par de la lumière bleue, ou encore au niveau tissulaire le collagène et l'élastine, etc. [1].

Analyser la fluorescence d'un tissu biologique revient à analyser la concentration de ses molécules fluorescentes. Ces dernières ayant un rôle fonctionnel dans le métabolisme du tissu, leur concentration donne des indications sur l'état du tissu. Ce paramètre physicochimique est une source d'informations au même titre que la densité du tissu aux rayons X (mammographie), la réponse ultrasonore (échographie), l'élasticité du tissu (élastographie), ou encore la réponse magnétique (IRM).

On sait depuis plusieurs décennies qu'une croissance tumorale modifie les propriétés de fluorescence des tissus.

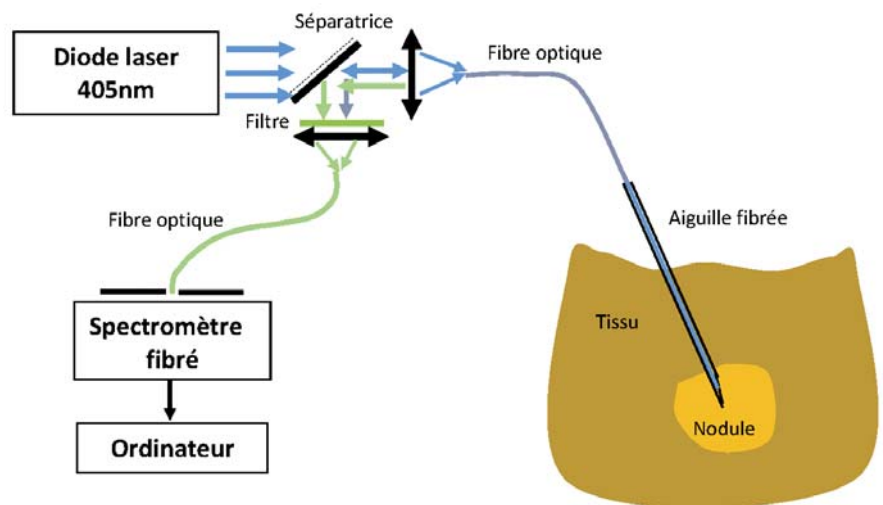


Figure 1. Schéma de principe.

Plusieurs dispositifs permettant de mesurer la fluorescence des organes creux ou les tissus pendant une opération chirurgicale ont été développés : endoscopes spéciaux ayant un éclairage d'excitation bleu et un filtre sur la caméra, systèmes fibrés placés dans le canal opérateur de l'endoscope [2-4].

Nous développons un dispositif constitué d'une aiguille fine biseautée « minimale invasive¹ » pour mesurer la fluorescence des nodules à l'intérieur des tissus. Les questions à résoudre sont :

- Comment prélever les signaux de fluorescence endogène qui sont généralement très faibles au travers d'une aiguille biseautée de faible diamètre ?
- Comment surmonter les contraintes d'un dispositif in vivo ?
- Comment contribuer à l'amélioration du diagnostic du nodule suspect ?

Principe et choix technologiques

Le schéma de principe est exposé à la figure 1. Il repose sur le principe le plus élémentaire de spectroscopie de

¹ « Minimal invasif » est un terme utilisé surtout en chirurgie pour les actes permettant de réduire au maximum les conséquences traumatiques sur le patient.

fluorescence. La lumière émise par la diode laser est injectée dans une fibre optique unique, collée à l'intérieur de l'aiguille et polie en bout d'aiguille pour épouser le biseau de l'aiguille. La lumière renvoyée par le nodule est récupérée dans la même fibre et renvoyée par la séparatrice sur un filtre qui élimine la lumière d'excitation. Elle est ensuite réinjectée dans une fibre qui la conduit à un spectromètre. L'information collectée est constituée de l'intensité et du spectre de la fluorescence renvoyée par le tissu biologique analysé [5].

L'acte médical consiste à faire parvenir la pointe de l'aiguille dans le nodule grâce à un guidage échographique, et à relever le signal de fluorescence en différents points du nodule. La *figure 2* est une image échographique de l'aiguille à l'intérieur du nodule au moment de la prise de mesure.

Une première question est le choix de la lumière d'excitation. Excitation continue ? Excitation par pulses picoseconde pour faire de la spectroscopie résolue dans le temps ? Excitation multi longueur d'onde, mono longueur d'onde etc. ? Quelle(s) longueur(s) d'onde choisir ? Le véritable problème est la méconnaissance du comportement des substances fluorescentes in vivo à l'intérieur des nodules cancéreux et bénins. Les petits avantages bien connus d'une approche par rapport à l'autre ont peu d'importance, par rapport au besoin de collecter de nombreux cas cliniques, condition incontournable pour avoir les moyens de faire le lien entre le comportement de la fluorescence intra tissulaire et la grande diversité des pathologies bénignes et malignes.

La longueur d'onde d'excitation inoffensive qui génère un signal conséquent de fluorescence est le bleu ou le proche UV (supérieur à 360 nm). Il s'agira donc d'une excitation continue à 405 nm, grâce à la facilité de se procurer ce rayonnement à bas coût, et le peu de différences observées avec les longueurs d'ondes voisines.

Un second problème est le biseau très affuté de 15° des aiguilles hypodermiques. Le risque d'éclatement de la pointe de l'aiguille pendant l'acte médical a été résolu en scellant la fibre dans une colle époxy biocompatible ayant les bonnes propriétés. Nos aiguilles conçues pour l'usage

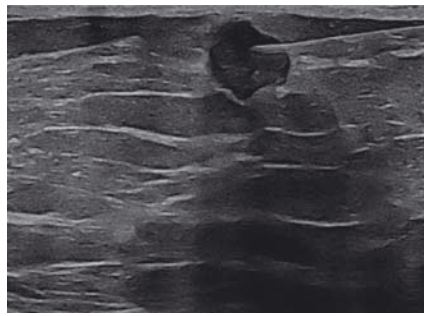


Figure 2. Image échographique de l'aiguille dans le nodule.

unique résistent à plus d'une centaine d'entrées dans des nodules durs, la pointe d'inox s'é moussent totalement bien avant le détachement d'une partie du bout de la fibre. Le biseau de 15° pose également un problème optique, la lumière d'excitation se réfléchit totalement sur le biseau de la fibre (fonction de l'indice de fibre utilisé voisin de 1,5, et celui des tissus voisin de 1,35, la réflexion totale devient importante pour les angles de biseau inférieurs à 25°). Cette lumière réfléchie ne fait plus partie des rayons guidés de la fibre à cause de son angle trop élevé par rapport à l'axe, elle traverse donc la gaine optique et va diffuser dans la colle (*figure 3*). L'excitation se fait par le couplage entre l'onde évanescente générée par la réflexion totale sur le biseau et le milieu biologique. La surface de la fibre biseautée avec un angle de 15° présente l'avantage d'être 15 fois plus grande que celle de la fibre perpendiculaire, le couplage pour le signal retour entre la fibre et la fluorescence générée à la surface de la fibre est efficace. Ceci a permis d'obtenir du flux avec un faible diamètre de fibre compatible avec les aiguilles d'injection intradermique 25G (type vaccin) de 0,3 mm de diamètre intérieur et 0,5 mm de diamètre extérieur. Cela laisse la place à une fibre de cœur de 200 µm, et à un joint de colle d'épaisseur 50 µm. Par contre de la lumière d'excitation bleue entre dans la colle et malheureusement les colles aux bonnes propriétés mécaniques fluorescentes, et se photoblanchissent de manière réversible. Ceci a posé des difficultés dans le processus de calibration des aiguilles. Pour parvenir à un étalonnage des propriétés des aiguilles avant examen médical, il s'est avéré utile de ne pas faire un polissage

Analyseur de spectre **OSA20**



Rapide et précis

Plage spectrale
1250-1700 nm

Vitesse maximale
2000 nm/s

Résolution spectrale
20 pm

Nouvelles fonctions disponibles !

- **OSNR** pour les signaux multiplexés en polarisation
- **Grille CWDM**
- **Contrôle à distance** de l'affichage à l'écran

Découvrez toutes les autres fonctionnalités sur
www.yenista.com/osa20

Yenista
OPTICS

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

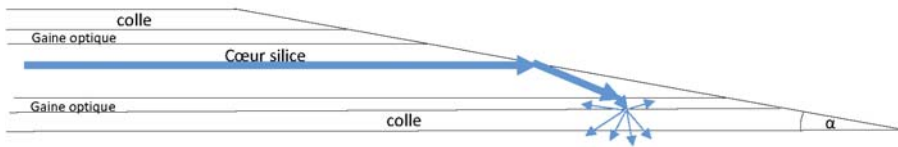


Figure 3. Réflexion totale sur le biseau de la fibre.



Figure 4. Comparaison des dimensions de l'aiguille à celle d'une aiguille de micro biopsie.

parfait de la surface. Un polissage suivant les configurations entre 1 et 15 μm avec un bon sens des stries a permis d'avoir une sortie contrôlée de lumière diffuse en plus de l'onde évanescente permettant un étalonnage simple et fiable de l'aiguille juste avant son utilisation.

Quant au dispositif optique, l'adaptation des multiplexeurs conçus pour les télécoms au domaine du visible ont permis d'avoir un montage totalement fibré, ce qui a permis non seulement un gain de poids, de robustesse des réglages, de coût, mais aussi de flux collecté.

Contraintes d'un dispositif in vivo

La figure 4 montre une photo de notre aiguille (25G) comparée à une aiguille de micro-biopsie (14G) utilisée pour prélever des échantillons de nodule. Même si nous qualifions le dispositif de minimal invasif, il n'en reste pas moins soumis à l'ensemble des contraintes d'un dispositif destiné à pénétrer dans le corps humain.

Une aiguille fine biseautée ne peut pas être utilisée autrement qu'en usage unique. En effet l'extrémité de la pointe en inox est peu robuste et perd son tranchant au bout de quelques usages. Pour pouvoir faire des premiers essais cliniques in vivo chez l'homme, il a fallu plusieurs années pour que l'ensemble du dispositif puisse répondre à toutes les normes. Nous avons fini la première partie de l'étude clinique avec 60 patients, et suite aux résultats encourageants, nous effectuons la seconde partie de 250 cas.

Concernant l'effet atténuateur de l'hémoglobine sur le signal in vivo, nous avons confirmé les effets observés sur le petit animal. L'aiguille en pénétrant dans le tissu produit une micro-hémorragie. Par contre le sang met quelques secondes à arriver au niveau de la pointe de l'aiguille, il y a un délai de 3 ou 4 secondes pour prendre la mesure (à condition de ne pas être dans un vaisseau). Si on avance un peu plus profondément l'aiguille, on peut reprendre une mesure sans l'effet hémorragique. Par contre si le médecin fait un geste de retrait partiel de l'aiguille avant ou pendant la mesure, le signal de fluorescence sera largement sous-évalué à cause des liquides hémorragiques et du mauvais contact de la fibre avec les bords du tissu.

Améliorer la prise en charge du patient dans le cas du cancer du sein (98 % de femmes et 2 % d'hommes)

La capacité de ce dispositif à mesurer la fluorescence à l'intérieur des tissus in vivo n'aurait absolument aucun intérêt s'il ne répondait pas à un problème médical. Nous travaillons aussi sur le cancer du foie et du poumon. Chaque cancer ayant sa propre problématique, nous exposons uniquement de manière très simplifiée celle du sein.

La croissance d'amas cellulaires non fonctionnels est à l'origine de nodules se formant dans la masse tissulaire. Certains nodules, même de taille très importante, n'auront aucune conséquence sur la santé de la personne, ce sont les nodules bénins. D'autres vont de manière plus ou moins rapide se propager à des organes vitaux et leur faire perdre leur fonctionnalité avec des effets très graves, ce sont les nodules cancéreux. Dans le sein, on dit qu'il y a un continuum qui va du bénin au pathologique, certaines tumeurs bénignes ayant une certaine probabilité de devenir plus tard malignes. Il n'y pas de critère de signalisation universel du caractère cancéreux du nodule, beaucoup de cancers se détectent uniquement grâce à des effets secondaires bénins, des microcalcifications visibles à la radio par exemple, qui pourtant souvent ne cachent pas de cancer. De nombreuses tumeurs malignes sont étoilées, peu élastiques, hypo-échogènes, mais il en existe d'autres très sphériques, élastiques et hyper-échogènes etc. L'examen radiologique détecte les nodules par leur densité, le caractère étoilé est un mauvais signe. Mais ce n'est pas suffisant pour prendre une décision [6]. La suite de l'examen est l'échographie, qui attribue des propriétés supplémentaires au nodule : hypo ou hyper-échogène, délimitation des contours, ombre acoustique, état de la vascularisation etc. À ce stade le radiologue va émettre un pronostic selon le classement ACR. Le classement ACR3 signifie que la probabilité de malignité est inférieure à 2 % et que la surveillance est renforcée, ACR4 signifie une probabilité de malignité entre 2 % et 95 % et ACR 5 plus de 95 %. Dans le cas des ACR4 et 5 on effectue une micro-biopsie,

Le saviez-vous ?

Le développement de nouveaux systèmes optiques d'imagerie intra-vitale est en plein essor. Ainsi, M. Gora et ses collaborateurs de la Harvard Medecine School, à Boston aux USA, ont mis au point une petite capsule contenant un OCT miniaturisé (tomographe par cohérence optique) et attachée à un cathéter très fin. Ce dispositif est simplement avalé par le patient, ce qui permet d'imager l'œsophage avec une résolution d'environ 10 μm sans aucune anesthésie (référence : M. Gora *et al.*, Nat. Medecine 19 (2013)).

c'est-à-dire le prélèvement d'une carotte de tissu de typiquement 3 mm de diamètre et 10 mm de long qui sera observé sous microscope pour analyser la forme des cellules, la taille du noyau, les types d'amas etc. La décision chirurgicale se fera à l'issue de la biopsie. Des échantillons de la pièce opératoire seront ensuite analysés avec un procédé voisin de celui de la carotte de biopsie. Chaque examen augmente la probabilité de diagnostic correct sans être infaillible. En effet, la biopsie a pu être faite dans une partie du nodule qui n'est pas cancéreux [7], la structure des amas cellulaires observés au microscope peut être douteuse, d'autres facteurs entrent en compte comme l'âge du patient, les antécédents familiaux, la présence de certains gènes etc. Notre examen se situe entre l'échographie et la biopsie, l'objectif étant d'éviter les biopsies inutiles, d'avoir une confirmation supplémentaire du caractère bénin du nodule quand la biopsie ne se justifie pas, ou encore d'émettre des alertes sur des cas apparemment peu suspects. Pour cela nous travaillons sur deux axes : les critères de fluorescence suspects ou rassurants, et l'analyse différentielle de pathologies bénignes ou malignes qui peuvent se confondre à l'imagerie. À titre d'exemple des adénoses ou fibroadénomes bénins (que l'on retrouve d'ailleurs très fréquemment dans les ACR4) sont connus pour souvent ressembler au carcinome canalaire infiltrant malin. Par contre sur la signature de fluorescence in vivo il y a des caractéristiques les distinguant clairement (figure 5) du moins sur l'ensemble des cas que nous avons observés. Il ne faut pas oublier non plus que la physiologie des pathologies évolue dans le temps, les vieux fibroadénomes se calcifient fréquemment, le centre des carcinomes se nécrose avec le temps et peut perdre en intensité de fluorescence. Il faut donc toujours rester prudent et modeste

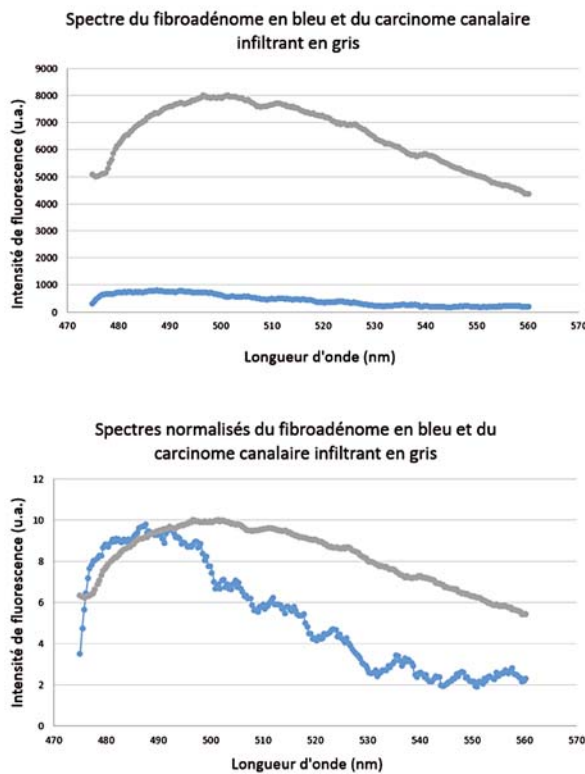


Figure 5. Exemples typiques de spectres.

dans ce domaine, la diversité des formes que peuvent prendre les pathologies tant bénignes que malignes est telle, que ce n'est qu'avec le temps et de très nombreux cas que l'on arrivera à définir l'apport durable de ce type d'information dans la prise en charge du patient.

Références

- [1] G.A. Wagnieres, W.M. Star, B.C. Wilson, Photochem. Photobiol. 68(5), 603-632 (1998)
- [2] R.R. Alfano, D.B. Tata, J. Cordero, P. Tomashefsky, F.W. Longo, M.A. Alfano, IEEE J. Quant. Elec. 20, 1507 (1984)
- [3] S. Villette, S. Pigaglio-Deshayes, C. Vever-Bizet, P. Validire, G. Bourg-Heckly, Photochem. Photobiol. Sci. 5, 483-492 (2006)
- [4] D.A. Peyrot et al., Biomed. Opt. Express 3(5), 840-853 (2012)
- [5] L. Alchab, G. Dupuis, C. Balleyguier, M.-C. Mathieu, M.-P. Fontaine-Aupart, R. Farcy, J. Biophoton. 1-12 (2009)
- [6] J.R. Harris, M.E. Lippman, M. Morrow, C.K. Osborne, Diseases of the Breast, 2nd edn. (Lippicott & Wilkins, Philadelphia, 2000)
- [7] A. Zajdela, N.A. Ghossein, J.-P. Pilleron, A. Ennuyer, Cancer 35(2), 499-506 (1974)



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

La micro-imagerie infrarouge appliquée au diagnostic des cancers cutanés

Elodie LY-MORIN, Olivier PIOT, Michel MANFAIT
Équipe MéDIAN « Biophotonique Technologies pour la Santé »
UMR CNRS 7369 MEDyC
Université de Reims Champagne Ardenne
olivier.piot@univ-reims.fr

Parmi les cancers de la peau, les deux types de carcinomes cutanés (basocellulaires et spinocellulaires) sont difficilement distinguables lors de l'examen clinique. Or, il est crucial de les différencier car les seconds nécessitent un traitement et une surveillance spécifiques. Pour réduire au minimum l'intervention humaine, forcément subjective, la micro-imagerie infrarouge présente un potentiel certain lors du diagnostic... à condition de savoir traiter les images des tissus inclus en paraffine qui ont été prélevés. Ce défi a été relevé et est en passe de devenir la prochaine méthode de diagnostic totalement objective et prédictive.

Imagerie spectrale infrarouge

Principe

La spectroscopie vibrationnelle d'absorption infrarouge (IR) repose sur l'interaction non destructive entre un rayonnement électromagnétique et la matière. Lorsque le faisceau lumineux qui traverse l'échantillon a une énergie (typiquement de 2,5 à 25 μm en longueur d'onde) correspondant à l'énergie entre deux niveaux de vibration de l'échantillon (c'est-à-dire à l'énergie de vibration d'une liaison moléculaire), une absorption des photons de la fréquence correspondante peut avoir lieu.

Un spectre infrarouge représente l'absorbance (A) ou la transmittance (T) en fonction du nombre d'onde (σ) qui correspond à l'inverse de la longueur d'onde et est proportionnel à l'énergie du rayonnement, définie par la loi de Bouguer-Beer Lambert :

$$A(\sigma \text{ ou } \lambda) = -\log(T) = \log\left(\frac{I_0}{I}\right) = \varepsilon(\sigma \text{ ou } \lambda) cd$$

où I_0 et I sont les intensités du rayonnement incident et transmis, ε est le coefficient d'extinction molaire, c la concentration de la substance absorbante et d l'épaisseur de l'échantillon.

Informations obtenues

L'absorbance étant proportionnelle à la concentration, il est donc possible

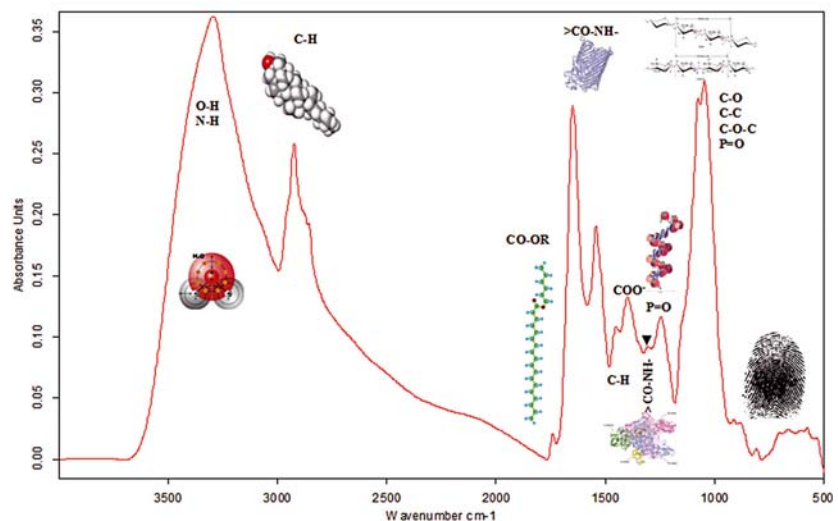


Figure 1. Exemple d'un spectre IR de tissu biologique, à partir duquel des informations concernant les lipides, les protéines et les sucres peuvent être extraites.

d'utiliser la spectroscopie d'absorption IR comme méthode d'analyse quantitative.

Cette technique permet d'obtenir des signaux, très spécifiques, sur la base de la composition biomoléculaire intrinsèque d'un échantillon. Un spectre IR (figure 1) est donc une véritable « empreinte moléculaire » permettant d'identifier et de caractériser un échantillon.

Le couplage d'un spectromètre IR et d'un système d'imagerie permet de réaliser une cartographie chimique d'un échantillon

avec une résolution spatiale de l'ordre de 10 microns : les images spectrales peuvent contenir plusieurs dizaines de milliers de spectres, attribuables individuellement à un pixel de l'image spectrale.

Ces images à haut contenu d'information permettent donc d'accéder à des données spatiales et moléculaires/spectrales pour caractériser un tissu complexe, en apportant des informations moléculaires, non accessibles par des analyses histologiques conventionnelles (coloration

hématoxyline-éosine HE, immuno-marquage), sans marquage ni préparation particulière des coupes tissulaires. Un traitement statistique multivarié des données est donc nécessaire afin de pouvoir mettre en évidence des différences spectrales très subtiles associées à l'état physiopathologique du tissu.

Diagnostic des cancers de la peau

Parmi les cancers de la peau, on distingue principalement les mélanomes et les carcinomes (les plus fréquents), les carcinomes basocellulaires (BCC) et les carcinomes spinocellulaires (SCC), ont une origine cellulaire commune et sont difficilement distinguables lors de l'examen clinique. Or, il est crucial de les différencier car, contrairement aux BCC, les SCC présentent des risques d'évolution en métastases et nécessitent donc un traitement et une surveillance spécifiques.

Le diagnostic du cancer de la peau s'effectue en deux étapes. Lors du diagnostic clinique, le dermatologue examine la lésion et l'enlève chirurgicalement en cas de suspicion (exérèse). Le prélèvement est ensuite fixé dans le formol, inclus en paraffine, sectionné puis coloré (coloration HE) lors du diagnostic histologique. La morphologie du tissu est analysée sous microscope optique par un spécialiste (anatomopathologiste) pour identifier la présence ou non de cancer et déterminer si la lésion a été enlevée dans son intégralité. Le cas échéant, une nouvelle chirurgie doit être programmée, ce qui engendre alors un nouveau coût et un second traumatisme pour le patient.

Ce processus, qui est actuellement la méthode de référence pour la prise en charge des cancers de la peau, repose cependant sur l'expertise des cliniciens et n'est donc pas objectif.

L'objectif de nos travaux est d'évaluer le potentiel de la micro-imagerie infrarouge pour l'aide au diagnostic des cancers de

la peau, en particulier pour le diagnostic différentiel BCC/SCC/maladie de Bowen (lésion correspondant à un SCC *in situ* peu différencié).

Analyse des tissus paraffinés : chimométrie

La fixation dans le formol puis l'inclusion dans la paraffine constitue la méthode de conservation des tissus tumoraux la plus utilisée. Ces tissus inclus en paraffine représentent une source considérable d'échantillons ; ils offrent l'opportunité de mener des études rétrospectives permettant de caractériser une pathologie et d'étudier son évolution en suivant le devenir du patient pour identifier des marqueurs spectroscopiques à visée diagnostique et pronostique. Cependant, la paraffine possède un signal IR qui masque en partie le signal du tissu, augmentant ainsi la complexité de l'analyse. Dans ce cas, un déparaffinage chimique à l'aide de

IDS : USB 2.0, USB 3.0 ou GigE ? Obtenez tout-en-un !

Évolution probable de la vision industrielle dans le futur

Des interfaces distinctes comportent des avantages différents : USB 2.0 est très répandue, USB 3.0 permet des taux de transfert de données élevés et GigE est adaptée aux applications comportant de grandes longueurs de câbles. Encore mieux : IDS Imaging Development Systems, leader sur le marché mondial des caméras USB, a combiné le meilleur de ces interfaces.

A lors qu'USB 3.0 trouve sa place dans la plupart des appareils grand public, qu'elle devienne une norme dans les applications industrielles et l'imagerie professionnelle n'est plus qu'une question de temps. USB 3.0 est l'interface-caméra idéale pour transmettre, à très grande vitesse et en temps réel, des images détaillées sans perte de données. La bande passante disponible est de près de 400 mégaoctets par seconde, soit environ 10 fois celle de USB 2.0 et 4 fois celle de GigE.

Pour garantir la fonctionnalité et la vitesse d'USB 3.0, les caméras professionnelles IDS sont équipées des tout derniers capteurs CMOS, et elles proposent une foule de fonctions supplémentaires. Avec une gamme de boîtiers et des variantes de caméras-carte, à choisir, elles sont parfaites pour toutes sortes d'applications.

Auparavant, les interfaces GigE étaient l'option privilégiée pour « couvrir » les longues distances entre PC et caméra. Désormais, IDS propose des longueurs de câble USB 3.0 pouvant atteindre 50 mètres. « Le câble à fibres optiques est résistant aux interférences électromagnétiques, et un rayon de courbure de 20 mm est possible », précise Dominik Schillinger, chef de produits chez IDS ; « ce câble actif est compatible avec les caméras USB 2.0, ce qui est rare sur le marché ». Alors pourquoi choisir entre USB 2.0, USB 3.0 ou GigE ? Passez au tout-en-un ! Choisissez USB 3.0 !



Contact

IDS Imaging Development Systems
Téléphone : +33 1 42 21 47 04
www.ids-imaging.fr

PUBLIRÉDACTIONNEL • PHOTONIQUES 79

Photoniques 79

solvants agressifs est généralement réalisé préalablement à l'analyse spectrale, au risque d'altérer la composition biochimique et la structure des tissus.

Le déparaffinage numérique d'une image spectrale

Nous avons développé une méthode chimiométrique de traitement de données permettant de déparaffiner « numériquement » les images spectrales IR en adaptant la technique d'EMSC (*extended multiplicative signal correction*) dont le principe repose sur une minimisation des interférences spectrales (principalement de la paraffine) de façon à ne retenir que la variabilité propre au tissu biologique.

Le point clé de cette correction réside en une modélisation adéquate de la paraffine car son signal n'est pas uniforme à l'échelle d'une coupe tissulaire. Pour modéliser ce signal en tenant compte de sa variabilité, nous avons réalisé une ACP (analyse en composantes principales) sur une coupe de paraffine brute, obtenue selon les conditions standard d'inclusion.

La figure 2 illustre le résultat obtenu à partir d'un échantillon de lésion cutanée paraffinée.

Mise en évidence de zones tissulaires d'intérêt par génération d'images pseudo-couleurs

Après correction chimiométrique, les données sont traitées par analyse statistique multivariée, par classification selon les k-means. Cette technique présente trois avantages : elle repose sur un algorithme de calcul rapide, ne requiert aucune connaissance préalable sur les données et ne nécessite aucune intervention de l'opérateur dans la classification (il fixe uniquement le nombre de classes ou clusters).

Les spectres sont regroupés en clusters selon un critère de ressemblance basé sur le calcul des distances (généralement de type euclidien) entre les spectres pris deux à deux ; à chaque cluster est ensuite attribuée une couleur. Cette classification permet de reconstruire des images pseudo-couleurs de contraste élevé.

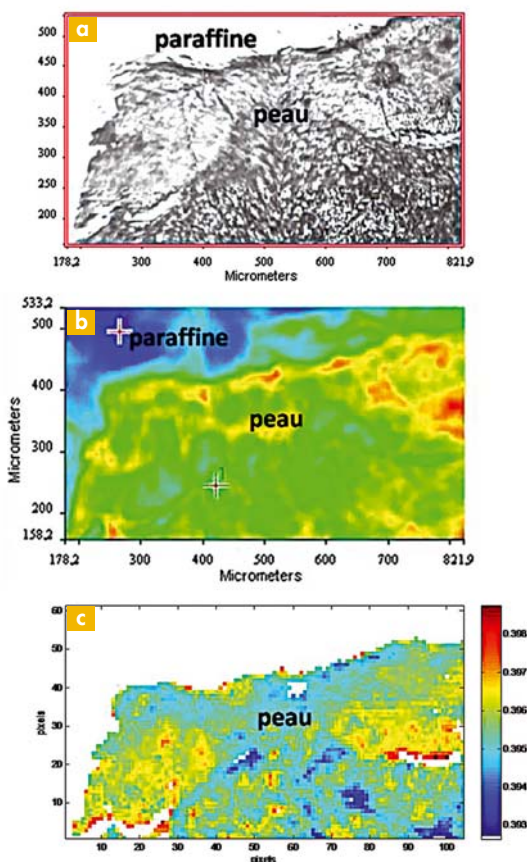


Figure 2. a. Coupe de lésion cutanée paraffinée non colorée HE, incluse en paraffine (image en lumière blanche). b. Image spectrale correspondante. c. Image spectrale après déparaffinage numérique. Les pixels en blanc correspondent aux spectres de paraffine seule (sans contribution du tissu) ; ils sont automatiquement retirés par l'algorithme.

Cette analyse, « purement descriptive » dans le sens où elle permet de décrire et de mettre en évidence différentes structures au sein d'un tissu en y associant une signature moléculaire/spectrale, requiert ensuite l'expertise d'un anatomopathologiste pour identifier les structures complexes en comparant les images IR pseudo-couleurs avec les coupes histologiques colorées HE correspondantes. La figure 3 représente un exemple d'images k-means obtenues sur chacun des trois types de lésion (BCC, SCC, maladie de Bowen) ; chaque échantillon étant traité indépendamment des autres, il n'y a pas de correspondance entre les couleurs d'une image à l'autre. Ces représentations mettent en évidence les différentes structures histologiques des échantillons. Elles permettent non seulement de localiser très précisément les zones tumorales, mais

également de révéler une hétérogénéité marquée au sein de la tumeur. De telles informations ne sont pas détectables au niveau des analyses histologiques standard (coloration HE), utilisées en routine pour le diagnostic histologique.

De plus, l'analyse de la signature spectrale associée à un cluster permet également d'accéder à des informations sur la composition moléculaire de la structure tissulaire correspondante. Cette démarche permet de construire une banque de marqueurs spectroscopiques spécifiques des différentes structures tissulaires normales, bénignes et/ou malignes présentes au sein des échantillons considérés.

Vers un diagnostic différentiel automatique

Après l'étape d'attribution cluster/structure histologique correspondante, le développement d'un modèle de prédiction par LDA (analyse discriminante linéaire) par construction, validation puis test de l'algorithme permet d'analyser en aveugle de nouveaux échantillons dont le diagnostic histologique est inconnu.

L'optimisation des algorithmes a permis d'opter pour un modèle à huit classes, décrivant l'ensemble des structures histologiques présentes au niveau des carcinomes cutanés : épiderme sain, épiderme réactionnel, stratum corneum, stroma, stroma inflammatoire, carcinome basocellulaire, carcinome spino-cellulaire, maladie de Bowen.

Un code couleurs simplifié a été adopté : trois couleurs pour les trois types tumeur, une quatrième couleur pour le tissu normal et une dernière pour mettre en évidence les pixels/spectres qui n'ont pas été classés avec certitude (probabilité d'appartenance à la classe inférieure à un seuil de 0,75).

La figure 4 représente la classification LDA ainsi obtenue sur un échantillon analysé en aveugle correspondant à un BCC de type nodulaire. En comparaison avec la coupe colorée HE, les zones tumorales sont bien délimitées et correctement identifiées comme BCC (couleur noire).

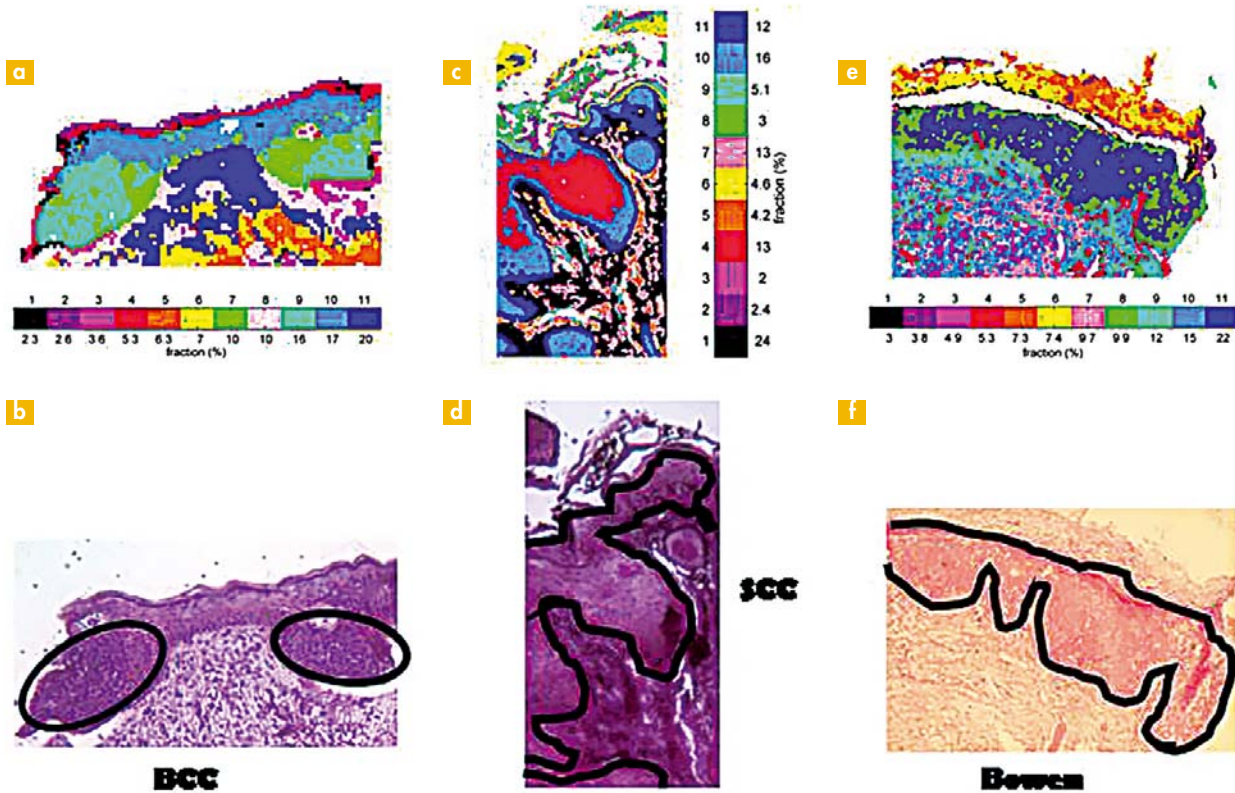


Figure 3. Images pseudo-couleurs obtenues à partir de trois types de lésion (a : BCC, c : SCC et e : maladie de Bowen) et coupes colorées HE adjacentes correspondantes (b, d et f, respectivement). Les zones tumorales sont entourées. Échelle : 200 µm.

De plus, le modèle indique une bonne spécificité car aucun pixel/spectre de l'image n'est attribué à un SCC ni à la maladie de Bowen. L'histogramme indique que les spectres mal identifiés (12% des pixels de l'image, classe 5) apparaissent au niveau des zones proches de la tumeur, appelée zones péri-tumorales (couleur bleue), ce qui suggère une composition biomoléculaire particulière au niveau de cette interface.

Une fois la banque de marqueurs spectroscopiques constituée, l'analyse par LDA d'une image spectrale d'environ 35 000 spectres (soit une zone d'environ 1800x700 µm²) dure moins de dix secondes. Ce processus est automatique et donne un diagnostic totalement objectif. Avec les imageurs infrarouge de nouvelle génération, il est maintenant tout à fait envisageable d'implémenter l'imagerie infrarouge au sein des laboratoires

d'anatomopathologie. L'efficacité de cette approche repose sur la pertinence de la banque de données spectrales utilisée pour l'apprentissage du modèle de prédiction. Actuellement, un modèle plus performant est en cours de construction en incluant les annexes cutanées (poils, glandes sébacées...) qui correspondent à des zones de forte prolifération cellulaire. L'algorithme devra distinguer ces annexes de la prolifération tumorale.

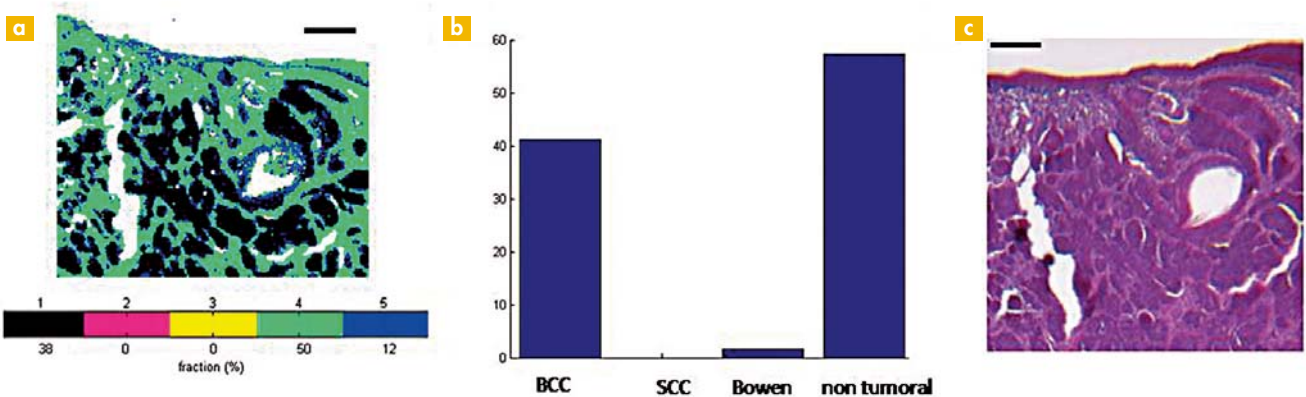


Figure 4. Prédiction LDA. a. Image LDA obtenue sur un échantillon analysé en aveugle (classe 1 : BCC, classe 2 : SCC, classe 3 : maladie de Bowen, classe 4 : non tumoral, classe 5 : non classé). b. Distribution relative des pixels non identifiés (classe 5) parmi les quatre autres classes LDA. c. Coupe HE correspondante. Échelle : 200 µm.

L'imagerie rétinienne à haute résolution spatiale par **optique adaptative et tomographie par cohérence optique plein champ**

Marie GLANC et Marie BLAVIER

LESIA, Observatoire de Paris, PSL Research University, CNRS, Sorbonne Universités, UPMC Univ. Paris 06, Univ. Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, 5 place Jules Janssen, 92195 Meudon, France

Trois pathologies sont responsables à elles seules de 50 % des cas de cécité dans le monde : la dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA), le glaucome et la rétinopathie diabétique. Le nombre de personnes atteintes augmente drastiquement du fait du vieillissement de la population. Comme pour le cancer, le dépistage précoce est le plus sûr moyen d'enrayer cette progression et de réduire le coût humain et social de ces pathologies.

Pour diagnostiquer ces pathologies, les ophtalmologistes pratiquent des examens du fond de l'œil, c'est-à-dire de la rétine (figure 1). Aujourd'hui, ils repèrent seulement les anomalies étendues, indiquant que la pathologie a déjà atteint un stade avancé, car la résolution des appareils d'imagerie de fond d'œil (les ophtalmoscopes) est insuffisante pour détecter les défauts dès leur apparition.

La détection précoce de pathologies rétinienne, leur suivi et le développement de molécules thérapeutiques réclament une exploration *in situ* et *in vivo* du tissu rétinien à l'échelle cellulaire, de l'ordre du micron pour les plus petites cellules rétinienne, si possible dans les 3 dimensions. Du fait de l'existence d'aberrations optiques dans notre œil (paragraphe 2), une telle résolution d'imagerie n'est pas accessible sans un système spécifique. Par exemple, les médecins utilisent régulièrement les ophtalmoscopes laser à balayage (SLO) : ceux-ci permettent d'obtenir une image globale d'un grand champ rétinien (jusqu'à 20 mm de diamètre) mais leur résolution latérale est de l'ordre de 10 à 30 microns, ce qui ne permet pas d'isoler les petits photorécepteurs de notre rétine qui dégénèrent en cas de DMLA.

La résolution latérale recherchée, 10 fois supérieure, est en théorie accessible à condition que l'œil soit dilaté. Le diamètre de la pupille augmentant, la largeur de la

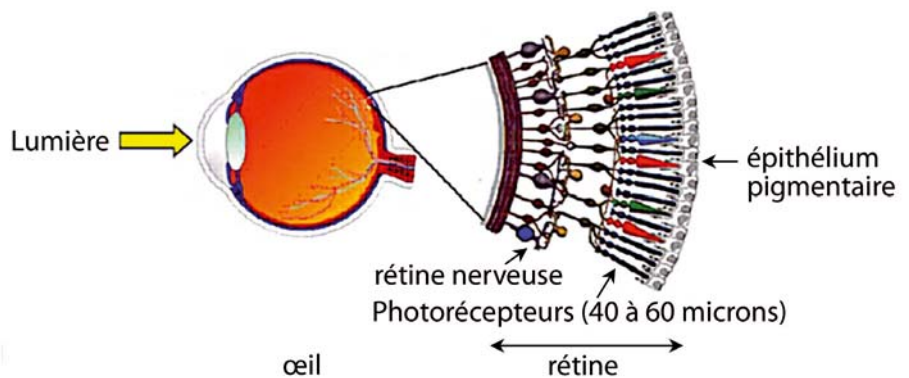


Figure 1. La rétine, un objet tridimensionnel de 300 à 500 μm d'épaisseur. (Source : webvision.med.utah.edu)

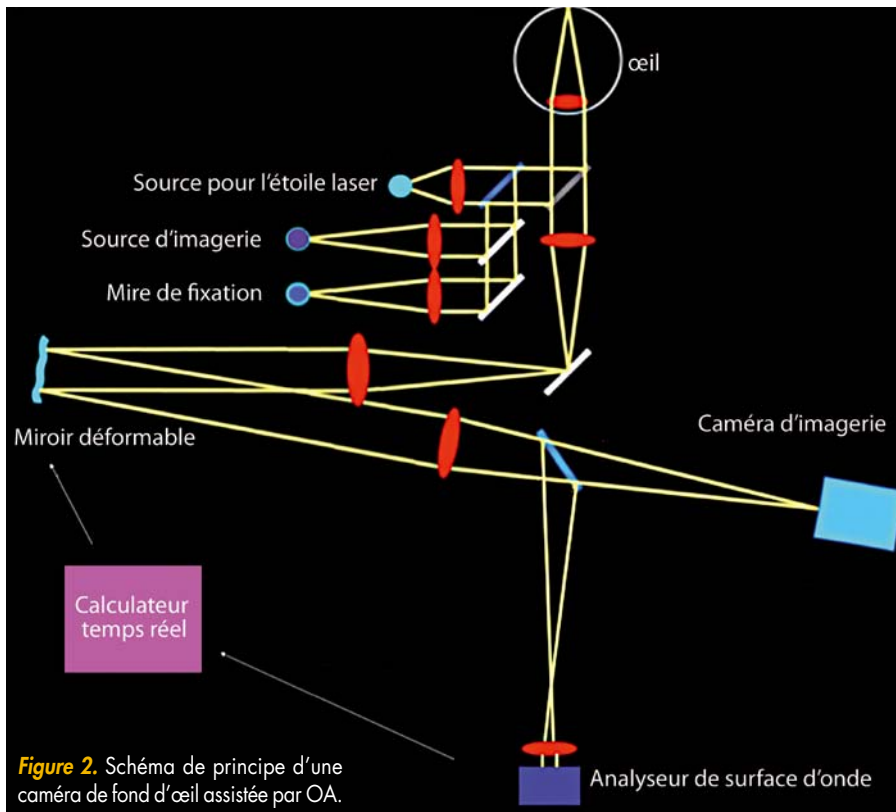
fonction d'étalement du point (FEP) formée sur la rétine par le faisceau d'imagerie diminue. À la longueur d'onde de 550 nm pour une pupille d'œil dilatée de 7 mm, la résolution latérale atteindrait théoriquement l'ordre du micron. C'est pourquoi il est intéressant de dilater l'œil lors des examens de fond d'œil. Malheureusement, quand la pupille est très dilatée, les aberrations de notre œil augmentent, élargissant la FEP et donc dégradant la résolution accessible. Il faut alors disposer d'un moyen de les corriger pour restaurer une bonne qualité d'image.

De plus, les ophtalmoscopes ont une résolution limitée en profondeur. Ils ne permettent d'acquérir qu'une image moyennée sur toute l'épaisseur de la rétine. Seuls les systèmes de tomographie par cohérence optique (OCT), que l'on

trouve en clinique, donnent des images de coupe en profondeur de la rétine ; mais leur résolution latérale reste dégradée par les aberrations de l'œil, comme pour les autres instruments commerciaux.

Les aberrations de l'œil et le principe de l'optique adaptative

La cause de la limitation en résolution latérale des images de fond d'œil est la présence dans notre système optique d'aberrations, majoritairement dues aux optiques oculaires (cornée, cristallin). Elles sont perçues lors de l'examen comme fluctuant temporellement pour diverses raisons (mouvement de la tête, battements cardiaques, évolution du film lacrymal,



etc.). Leur réduction peut être obtenue par l'emploi d'une technique « temps réel ». Les astronomes ont été confrontés à des besoins comparables avant l'avènement de l'optique adaptative (OA) sur les télescopes au sol : l'image d'un corps céleste est déformée par les aberrations induites par la turbulence atmosphérique. Mais la réduction des aberrations oculaires présente ses propres contraintes : amplitudes importantes, surtout en cas de dilatation de la pupille ; déplacement de la pupille d'œil par rapport à celle de l'instrument ; très faible réflectivité de la rétine mais sécurité oculaire à respecter empêchant l'usage de forts flux d'illumination ; nécessité d'obtenir des images grand champ (risque d'anisoplanétisme) ; chromaticité des aberrations.

Le principe de la boucle d'OA ophtalmologique [1,2] est similaire à celui de l'astronomie [3] (figure 2). La rétine est largement illuminée par une source appropriée ; la lumière rétrodiffusée par la rétine est collectée par l'instrument pour former une image sur une caméra dédiée. On vient en plus

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.

CVI Laser Optics

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

former une « étoile laser » (i.e. une source secondaire quasi ponctuelle) dans la rétine du sujet. La lumière issue de cette source est rétrodiffusée jusqu'à l'analyseur de surface d'onde. Dans l'instrument, un miroir déformable est conjugué de la pupille d'œil et réfléchit tous les fronts d'ondes issus des points de la rétine illuminés en les corrigeant par sa déformation. L'analyseur, souvent de type Shack-Hartmann composé d'une matrice de microlentilles conjuguée de la pupille et d'une caméra, mesure les aberrations oculaires sur les fronts d'ondes issus de l'étoile laser. Il est relié en boucle fermée au miroir déformable par l'intermédiaire d'un calculateur temps réel qui établit les corrections à appliquer pour réduire l'amplitude des aberrations à très haute cadence. Une fois les défauts oculaires réduits sous une limite acceptable (typiquement de l'ordre de $\lambda/8$ à $\lambda/10$) et maintenus à ce niveau, on lance la prise d'image à l'aide de la source et de la caméra d'imagerie pour procurer aux ophtalmologistes des données à interpréter (figure 3).

Nécessité d'une technique complémentaire

Malheureusement, l'OA seule utilisée au sein d'une caméra de fond d'œil (imagerie « en face », plein champ, sans balayage) ne suffit pas pour isoler une couche de cellules de la rétine en profondeur. Ainsi, sur

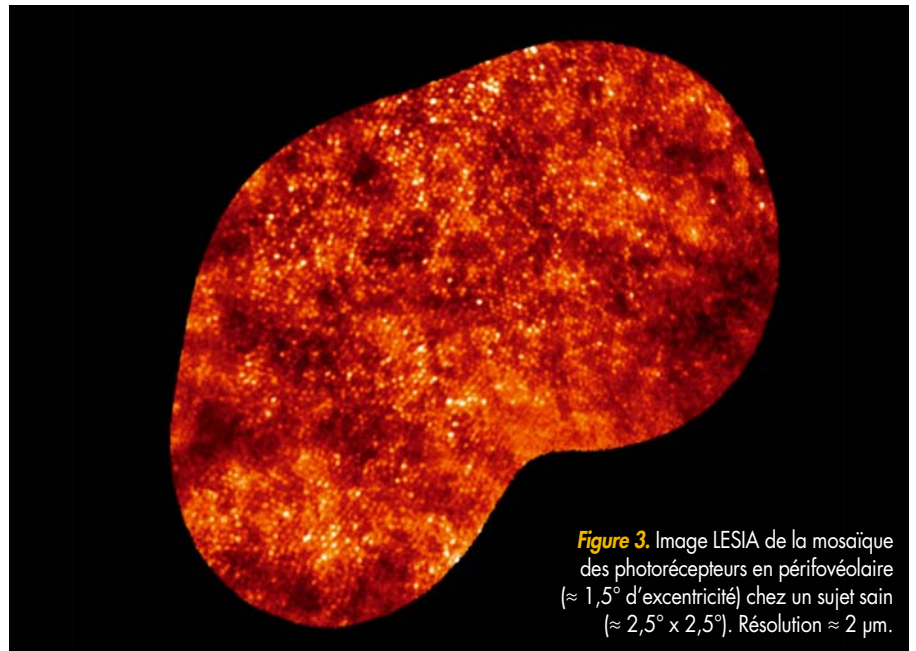


Figure 3. Image LESIA de la mosaïque des photorécepteurs en périfovolaire ($\approx 1,5^\circ$ d'excentricité) chez un sujet sain ($\approx 2,5^\circ \times 2,5^\circ$). Résolution $\approx 2 \mu\text{m}$.

les images d'une couche de vaisseaux, on retrouve la contribution défocalisée des photorécepteurs situés en aval. L'ajout d'une technique interférométrique par exemple peut permettre de pallier ce manque. Dans ce cadre, la tomographie par cohérence optique plein champ, technique développée à l'ESPCI [4], semble bien adaptée. C'est une méthode d'imagerie interférométrique à faible longueur de cohérence. L'échantillon à imager est placé dans l'un des deux bras d'un interféromètre de Michelson, tandis qu'un miroir de référence est mis dans le second bras

(figure 4, gauche). Des interférences sont observées à la sortie de l'interféromètre entre la lumière réfléchie par la référence et celle rétrodiffusée par une couche de l'échantillon située à une profondeur précise, déterminée par l'égalité optique des longueurs des bras de l'interféromètre (à la demi-longueur de cohérence de la source près). La résolution axiale théorique Δz devient fonction du spectre de la source : $\Delta z \propto \lambda^2 / \Delta \lambda$ où λ est la longueur d'onde centrale et $\Delta \lambda$ la largeur spectrale de la source. Ainsi plus le spectre est large, plus les interférences sont localisées dans

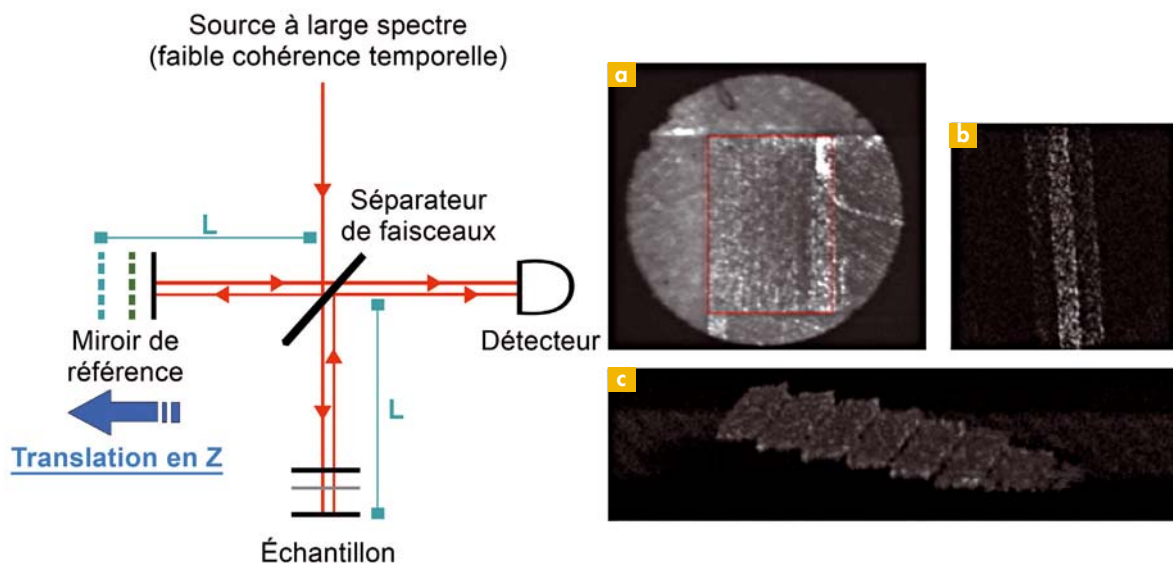


Figure 4. À gauche : schéma de principe de l'OCT. À droite : (a) un interférogramme ; (b) coupe tomographique à une profondeur donnée ; (c) reconstruction en 3D de l'escalier à partir d'une pile de 40 coupes tomographiques acquises tous les microns. La hauteur des marches est de 5 microns.

la profondeur, meilleure est la résolution axiale. En détectant ces interférences, une image en coupe est directement obtenue dans l'échantillon. La sélection par la cohérence des photons réfléchis à une profondeur donnée permet d'enlever le fond diffusé qui provient de l'ensemble de l'échantillon.

Généralement, les imageurs OCT classiques en ophtalmologie reconstruisent des coupes bidimensionnelles (2D) par acquisition point par point et balayage. L'OCT plein champ consiste au contraire à acquérir les images interférométriques directement en 2D avec une caméra CCD ; les balayages transversaux en X et en Y sont donc éliminés. Cela permet une vitesse d'acquisition rapide, ce qui est fondamental dans un échantillon vivant tel que l'œil. En balayant en profondeur par translation en Z de la référence, une pile d'images en coupes à différentes profondeurs est acquise et la structure tridimensionnelle de l'échantillon est reconstruite. Pour reconstruire une coupe 2D d'échantillon en OCT plein champ, quatre interférogrammes déphasés de $\pi/2$ sont souvent enregistrés (figure 4, droite).

Dans cette configuration, la boucle d'OA, située dans le bras échantillon de l'interféromètre, sert non seulement à obtenir la résolution latérale sur les images de rétine à une profondeur donnée, mais aussi à disposer d'un bon contraste des franges d'interférences formées lors de la recombinaison des fronts d'ondes issus des deux bras.

Les travaux actuellement menés à l'Observatoire de Paris en collaboration avec l'hôpital des Quinze-Vingts ont pour but de démontrer les capacités et les performances de l'OCT plein champ combinée à l'OA pour l'imagerie en profondeur à haute résolution de la rétine in vivo.

Conclusion

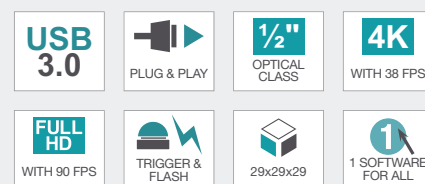
Depuis plusieurs années, différentes équipes dans le monde développent et exploitent des méthodes de visualisation du fond de l'œil reposant sur la technique astronomique d'optique adaptative, utilisée pour les observations célestes sur les télescopes au sol. Une caméra de fond d'œil basée sur l'OA a d'ailleurs été développée par la société Imagine Eyes et est utilisée notamment à l'hôpital des Quinze-Vingts sur des patients. Dans le futur, le couplage de l'OA avec d'autres techniques permettra d'ouvrir des perspectives sans précédent pour l'étude du fonctionnement de l'œil et surtout pour le diagnostic précoce de pathologies.

References

- [1] Glanc M., Gendron E., Lacombe F., Lafaille D., Le Gargasson J.-F., Léna P. Towards wide-field retinal imaging with adaptive optics, *Optics Communications* (2004), 225-238
- [2] Miller D.T., Williams D.R., Morris G.M., Liang J. Images of cone photoreceptors of the human eye, *Vision Res.* 36 (1996), 1067-1079
- [3] Roddier F. *Adaptive Optics in Astronomy*, Edited by François Roddier (1999), Cambridge University Press
- [4] Beaulieu E., Boccardi A.C., Lebec M., Blanchot L., Saint-Jalmes H. Full-field optical coherence microscopy, *Optics Letters* 23 (1998), 244-246

DES DÉTAILS INCROYABLES !

La USB 3 uEye CP avec capteur couleur 18 MP AR1820HS de Aptina



En savoir plus sur la caméra haute-résolution USB 3 uEye CP : www.ids-imaging.fr/usb3

IDS
www.ids-imaging.fr

L'Optique Arabe de la période médiévale

L'exemple d'Ibn al Haytham

Azzedine BOUDRIOUA

LPL, CNRS UMR 7538, Institut Galilée, Université Paris 13

boudrioua@univ-paris13.fr

Le succès des sciences de la lumière est avant tout le succès du savoir universel et de la connaissance humaine qui se sont construits à travers les siècles ; de nombreuses civilisations et cultures ont apporté leur pierre à l'édifice.

Dans l'antiquité, la lumière était considérée comme un « Feu »

Dans l'antiquité, la lumière était considérée comme un « Feu » et ce qui intéressait les Grecs n'était pas la lumière mais la vision – d'où le mot optique, du grec *optikos* qui signifie « relatif à la vue ». Deux théories s'affrontaient : la théorie du « feu visuel » ou extramission, et la théorie du « feu externe » ou intromission [1,2]. Dans la théorie d'extramission, on considérait que la vision était assurée par un rayon lumineux émis par l'œil. La théorie de l'intromission quant à elle considérait que les formes physiques ou « simulacres » pénétraient dans l'œil en provenance des objets. Plus tard, les

premiers travaux de l'École d'Alexandrie, et plus précisément ceux d'Euclide (325–265 avant JC), imposent la théorie de l'extramission comme modèle pour l'étude de l'optique. Euclide établit la loi de la réflexion, mais son œuvre est surtout celle d'un géomètre : il se base principalement sur la propagation rectiligne et sur la notion de rayon visuel (à ne pas confondre avec le rayon lumineux tel que nous le comprenons aujourd'hui : « ... le rayon visuel n'est en rien l'équivalent d'un rayon lumineux inversé », écrit G. Simon dans « Archéologie de l'optique » [2]. Trois siècles plus tard, Claude Ptolémée (100-170), un des derniers phares de la science Grecs et dont l'œuvre dans le domaine de l'optique représente une somme de ce qu'on savait de son

temps, considère que la réflexion et la réfraction ont pour conséquence de briser le rayon visuel... Quand le regard se brise sur un obstacle au lieu de poursuivre son trajet en ligne droite, il subit un accident qui le trompe. En somme, la vision peut devenir fautive à cause de la réflexion ou la réfraction.

Ainsi, ce qui intéressait les Grecs n'était pas la lumière mais la vision. L'œil produit la lumière et le rayon visuel est une sorte de prolongement quasi matériel de l'âme pour palper le monde visible, comme le toucher. TeL était l'héritage grec à la veille du moyen-âge qui s'installe en occident. Dans cette longue et tumultueuse période, deux événements majeurs vont bouleverser l'ordre établi : la chute de Rome en 476 et l'avènement de l'Islam (570–632).

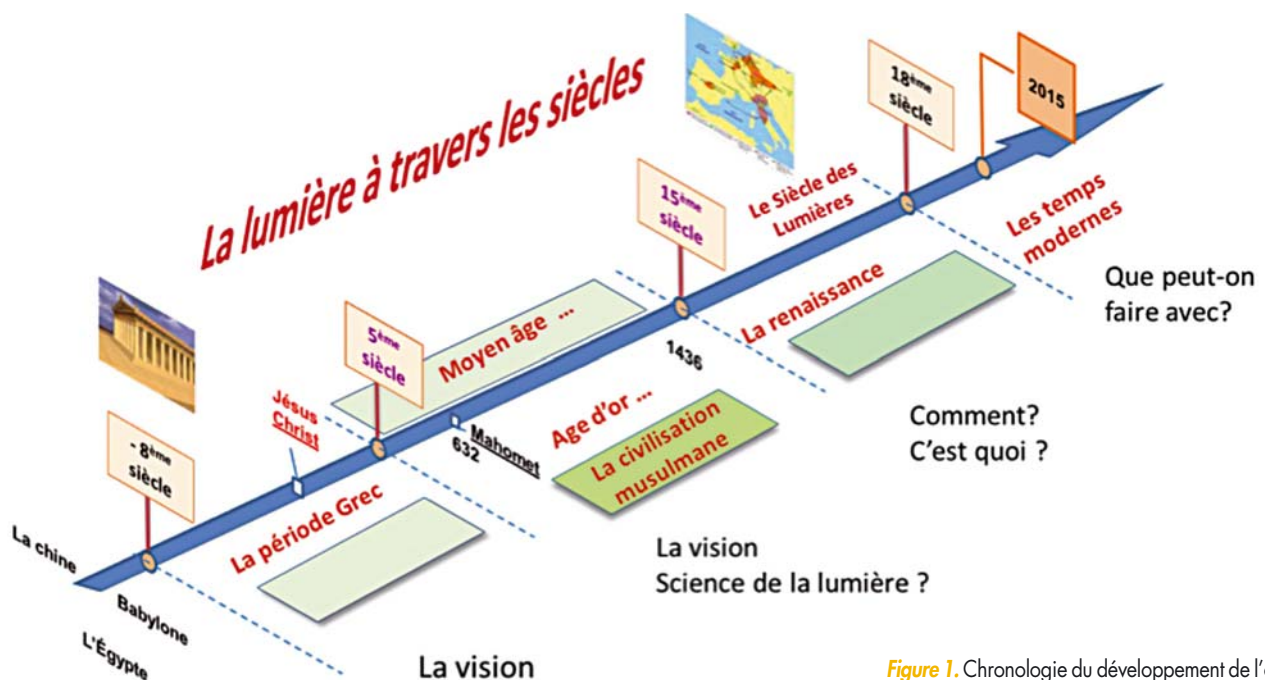


Figure 1. Chronologie du développement de l'optique.

Qui a découvert la loi de la réfraction ?

Il est établi que la loi de la réfraction était connue par un physicien anglais, un certain Thomas Harriot en 1602, décédé avant de la publier. Le hollandais Willebrord Snell redécouvre cette loi en 1621, mais il ne l'a pas publiée avant sa mort en 1626. René Descartes publie cette loi dans son *Discours sur la Méthode* en 1637. Le physicien français François Arago, fervent patriote, défend que Descartes soit le découvreur de cette loi en se référant aux travaux de Ptolémée. Il écrit ainsi : « ... Quant à la loi mathématique de ces écarts, que l'arabe Alhazen, le polonais Vitellio, Kepler et d'autres physiciens ont cherché en vain, elle est due à Descartes. Je dis Descartes, et Descartes seul ; car, si les revendications tardives de Huygens en faveur de son compatriote Snellius étaient acceptées, il faudrait renoncer à jamais à l'écriture de l'histoire des sciences. » Rebondissement au 20^e siècle : les travaux de R. Rashed établissent sans équivoque qu'Ibn Sahl a démontré cette loi en 984 [4-6].

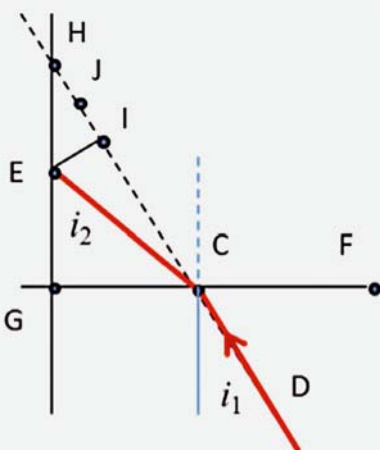


Figure E1. Loi de la réfraction démontrée par Ibn Sahl (984).

$$\frac{CE}{CH} = \frac{CE}{CG} \cdot \frac{CG}{CH} = \frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{1}{n}$$

$$\frac{CE}{CH} < 1$$

Ibn Sahl et la loi de la réfraction

Le problème d'Ibn Sahl peut se résumer de la manière suivante : comment focaliser la lumière d'une source par réfraction pour obtenir un point ardent ? Avec une démonstration magistrale se basant sur le rapport entre les rayons lumineux incident et réfracté, il établit que ce rapport est toujours constant (ce rapport est équivalent à l'indice de réfraction du milieu).

La civilisation arabo-musulmane

Après la mort du prophète de l'Islam en 632, les affaires de la Oumma (nation) ont d'abord été prises en charge par les quatre successeurs (Abou Bakr (632-634), Omar (634-644), Othman (644-656) et Ali (656-661)) considérés par la tradition musulmane comme des saints éclairés. Après eux, la dynastie des Omeyyades s'empare du pouvoir et établit Damas (Syrie actuelle) en capitale de l'empire. De 661 à 750, priorité est donnée aux conquêtes. Profitant de l'affaiblissement de la famille des Omeyyades, sa rivale de toujours, la famille des Banou Abbas, s'empare à son tour du pouvoir califal pour donner naissance à la dynastie des Abbassides dont le règne s'étendra de 750 à 1250 avec comme capitale Bagdad (Iraq actuelle). Avec cette dynastie, c'est l'avènement de ce que l'on peut qualifier de « lumières arabes ».

C'est en l'an 786 que Haroun Al Rashid (littéralement Haroun le clairvoyant) prend les rênes de la nation musulmane et devient calife à Bagdad. Ce fut probablement un de ces grands hommes d'état dont les nations et les sociétés humaines ont besoin pour dépasser les contingences et s'élever à des vérités universelles. Mais c'est à son fils Al Mamun (813) que l'on doit la création de ce qui deviendra l'Université – à savoir la première Bait-el-Hikmat (maison de la sagesse) à Bagdad. Dans un énorme mouvement qui a duré deux siècles environ, les savants musulmans ont d'abord traduit et étudié tous les travaux des penseurs grecs (Aristote, Platon, Archimède, Euclide, Ptolémée), perses ou indiens...

Dans un climat de tolérance et de respect mutuels, savants musulmans, chrétiens et juifs s'attèlent ensemble à bâtir une civilisation éclairée qui s'installe pendant plus de cinq siècles. Hunayn Ibn Ishaq (Isaac) (808-873), chrétien nestorien, savant trilingue (Arabe, Syriaque et Grec), est le parfait exemple de cette dynamique nouvelle. Grand érudit, autorité incontestée pour la traduction des travaux grecs en Arabe avec le Syriaque comme langue intermédiaire, il est aussi l'auteur de 10 traités sur l'œil : il y affirme notamment que l'organe sensible de l'œil est le cristallin localisé au centre du globe oculaire.



Vous pouvez compter sur nos ASSEMBLAGES DE FIBRES OPTIQUES



- Fibres Optiques pour $\lambda = 190 - 2000 \text{ nm}$
- Diamètre de Coeur: 50 - 2000 μm
- Assemblages de Fibres
- Assemblages de Fibres Médicales
- Assemblages de Fibres Fortes Puissances
- Avec Traitements AR

www.lasercomponents.fr

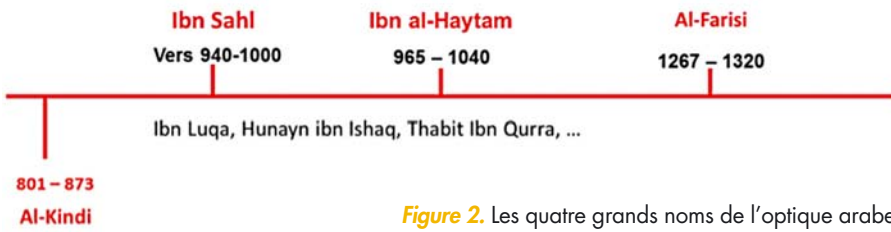


Figure 2. Les quatre grands noms de l'optique arabe.

L'optique arabe

Quatre noms vont jouer un rôle déterminant : Al Kindi (801–873), Ibn Sahl (940–1000), Ibn al Haytham (965–1040) et Al Farisi (1267–1320) [1]. Vraisemblablement, l'intérêt porté par les savants arabes aux instruments ardents est capital dans le développement de l'optique. La légende selon laquelle Archimède aurait incendié la flotte romaine du Général Marcellus, pour défendre sa cité Syracuse en 212 avant JC, en construisant un miroir pour concentrer la lumière du soleil, était connue de tous. Reproduire cette arme sophistiquée constituait un des objectifs de la recherche sur la catoptrique et l'anaclastique. À noter que l'appellation « optique arabe » se réfère à la langue arabe qui était la langue des sciences de cette époque.

Yaqub Ibn Ishaq Ibn Sabah Al-Kindi (801–873), connu comme le « Philosophe

des Arabes » de la période médiévale et partisan de la théorie euclidienne de l'ex-tramission, propose néanmoins quelques corrections à la notion de rayon visuel [3]. Il écarte une conception purement géométrique de ce rayon : pour lui, ce ne sont pas des droites géométriques mais des impressions produites par des corps à trois dimensions.

Abu Sad Al Alla Ibn Sahl (940–1000), auteur d'un traité sur les instruments ardents vers 984, mathématicien associé à la cour de Bagdad, explique comment les lentilles et les instruments coniques dévient et focalisent la lumière [1,4]. On lui doit deux manuscrits découverts par Roshdi Rashed à Damas (Syrie) et à Téhéran (Iran). Ces livres sont à la fois théoriques et expérimentaux : on y trouve notamment les procédés mécaniques pour le tracé continu des coniques. Pour la première fois, Ibn Sahl étudie les instruments

ardents non seulement par réflexion mais aussi par réfraction. Outre les miroirs ardents parabolique et ellipsoïdal, il étudie les lentilles plan-convexes et hyperboliques biconvexes. Surtout, il caractérise le processus de réfraction par un rapport constant propre aux milieux en présence, ce qui constitue la première divulgation connue de la loi de la réfraction établie cinq siècles plus tard par Descartes.

Abu Ali al-Hasan ibn al-Hasan ibn al-Haytham

Connu en Europe sous son nom latinisé Alhazen. Les premières études modernes et son identification sont dues notamment à Eilhard E.G. Wiedemann (1852–1928), un orientaliste allemand, physicien et historien des sciences [7]. Mustafa Nazif [8] était l'un des pionniers à se focaliser sur les travaux d'Ibn al Haytham. Roshdi Rashed a également très largement contribué à la mise en valeur et à la diffusion de ses travaux [1-4]. Abdelhamid I. Sabra a réalisé une première édition critique des 3 premiers livres d'Ibn al Haytham, ainsi que la traduction de ces livres en anglais [9].

Ibn al Haytham entreprend la réforme de l'optique à l'image d'un bâtisseur qui réalise un chef-d'œuvre pour la postérité.

L'apport d'Ibn Al-Haytham

Qu'était l'optique au temps de Ptolémée ?	Que devient l'optique avec Ibn al Haytham ?
<ul style="list-style-type: none"> • L'optique, science de la vision. • L'optique, science de géomètres. • L'objet de l'optique d'Euclide et de Ptolémée : c'est la vision, et non la lumière. • La lumière est nécessaire à la vision mais elle n'est pas l'entité physique spécifique à laquelle l'organe visuel est sensible. 	<p>L'optique devient la science de la lumière, avec deux parties :</p> <ul style="list-style-type: none"> • la théorie de la vision : la physiologie de l'œil et la perception psychologique associées ; • la théorie de la lumière avec l'optique géométrique et l'optique physique. L'optique se base sur le modèle du mouvement de billes solides jetées contre un obstacle, associé à une approche géométrique. <p>L'œil devient un instrument optique, et la lumière une entité physique indépendante de la sensation visuelle.</p>

Ibn al-Haytham est considéré comme le premier à avoir introduit la « méthode scientifique », très similaire à la méthode scientifique moderne et comportant les étapes suivantes :

- observation,
- définition du problème,
- formulation d'une hypothèse,
- vérification de l'hypothèse au moyen de l'expérimentation,
- analyse du résultat des expériences,
- interprétation des données et formulation des conclusions,
- publication des résultats.

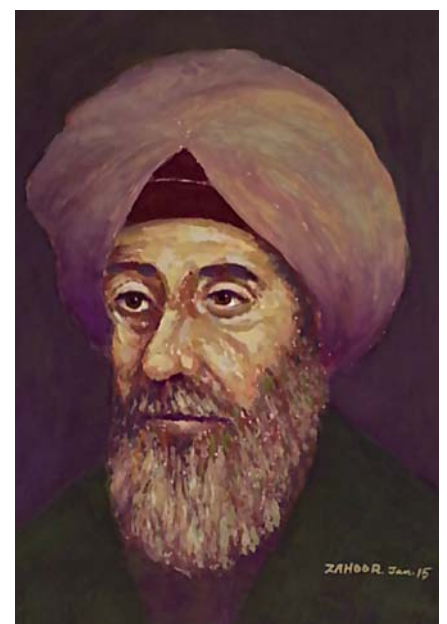


Figure 3. Ibn al Haytham (965– 1040). Peinture par Prof. Zargar Zahoor, Ex-Dean and Head, Faculty of Fine Arts, Jamia Millia Islamia University (India).



Figure 4. Selenographia, description of the moon de Johannes Hevelius (1647). Le frontispice présente les deux scientifiques Ibn al Haytham (Alhazen, à gauche) et Galilée (à droite) comme les deux explorateurs de la nature par le biais de la pensée rationnelle (noter le schéma géométrique dans la main d'Ibn al-Haytham) et par l'observation (illustrée en par le télescope dans la main de Galilée).

Il fait partie de ces génies que l'humanité peut avoir à des siècles d'intervalle. Son raisonnement est clair : il rejette les théories grecques, propose un nouveau paradigme et explique la réflexion et la réfraction [1,2]. Pour lui, la lumière est matérielle et se propage avec une vitesse très grande et finie selon des rayons rectilignes. La modification de cette vitesse par les corps rencontrés cause la réfraction : en passant d'un milieu à un autre, la vitesse se réduit si le second milieu est plus dilué, elle augmente s'il est plus dense. Le choc de la lumière et des corps crée la réflexion. Il prend en compte deux éléments dans le mouvement de la lumière : l'un vertical, perpendiculaire à la surface qui sépare les deux milieux et doté d'une vitesse constante ; l'autre, horizontal, parallèle à cette surface et doté d'une vitesse variable. Cette théorie est de conception très moderne... Ibn Al-Haytham a également posé les bases de l'optique moderne

avec son approche expérimentale de la propagation de la lumière.

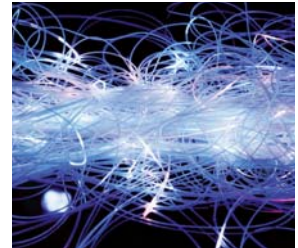
En somme, avec Ibn al Haytham, l'optique n'a plus le sens qu'elle revêtait naguère : une géométrie de la perception. Elle comprend désormais deux parties : une théorie de la vision, à laquelle sont associées une physiologie de l'œil et une psychologie de la perception ; et une théorie de la lumière, à laquelle sont liées une optique géométrique et une optique physique. La lumière existe indépendamment de la vision, elle se meut avec une très grande vitesse finie. Son mouvement ressemble à celui de corpuscules.

L'héritage d'Ibn al Haytham nous a été transmis à travers son œuvre majeure *Kitab al-Manazir* (Le livre de la vision, en sept volumes) qui a été rédigée entre 1010 et 1028. On doit sa première traduction latine sous le titre de *Perspectiva (De aspectibus)* à Gérard de Crémone (1114–1187), un écrivain et traducteur italien de Crémone (Lombardie, en Italie). Sur 14 exemplaires recensés en Europe de la traduction latine, deux se trouvent à Cambridge, un à Édimbourg, trois à Londres, et un à Oxford [10]. Sept en tout – c'est-à-dire la moitié des manuscrits disponibles – sont en Angleterre. Ceci n'est pas étonnant quand on sait que l'anglais John Pecham¹ (1277–1273) en a fait un manuel d'optique pour l'enseignement, dont l'usage s'est prolongé jusqu'à la fin du 16^e siècle. Il était la référence à l'université de Paris en 1296, disponible à la bibliothèque de la Sorbonne vers 1306 et utilisé comme manuel à Oxford, Cambridge, Canterbury et Merton College vers le 14^e siècle (Holbrook, 1998).

Cette œuvre, qui s'est transmise en Occident au début du 13^e siècle, a grandement influencé les travaux sur l'optique de la plupart des savants de la Renaissance [11]. L'un des premiers à avoir étudié et diffusé les travaux d'Ibn al-Haytham est Roger Bacon (1214–1292), qui fut aussi l'un des premiers à prendre conscience de l'importance de l'héritage arabe dans les domaines de la science et de la philosophie. Ainsi également de l'éminent polonais Vitellio (1230–1275)...

¹ « Le texte de Pecham se revendique explicitement de l'optique d'Alhacen qu'il cite nommément et plagie très largement en de nombreux endroits » - Anne Valérie Dulac [10].

IDIL SPÉCIALISTE DES TECHNOLOGIES FIBRES OPTIQUES ET LASER



BESOIN D'UNE SOLUTION POUR ORGANISER VOS FIBRES OPTIQUES ?

IDIL

SOLUTIONS STANDARDS OU À FAÇON, AU CHOIX.

L'équipe **IDIL** met à votre disposition de nombreuses compétences techniques. Bénéficiez d'un service innovant, efficace et minutieux !



BUNDLE - MATRICE - VGROOVE FIBRES LENTILLÉES POLISSAGE D'EXTRÉMITÉ DE FIBRE CONNECTORISATION...

20 IDIL **YEARS OLD** FIBRES OPTIQUES
System & components for science & industry

02 96 05 40 20
22300 LANNION
www.idil.fr

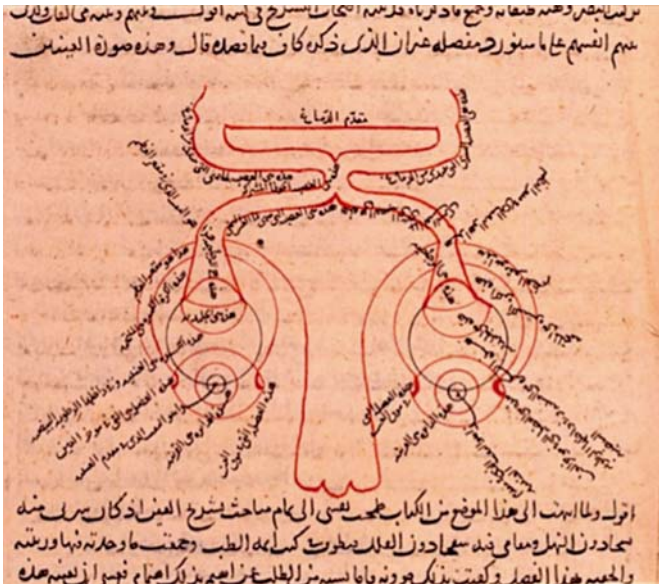


Figure 5. Diagramme du systeme nerveux et la vision de Kamal al Din al Farisi de son livre Kitab Tanqih al-Manazir li-dhawi al-absar wa-l-basa'ir in qu'il a édité à partir du livre Kitab al Manazir d'Ibn al Haytham. Source : Tanqih al-Manazir, Istanbul, Topkapi Palace Museum Library, Ahmed III, MS 3340, folio 16a.

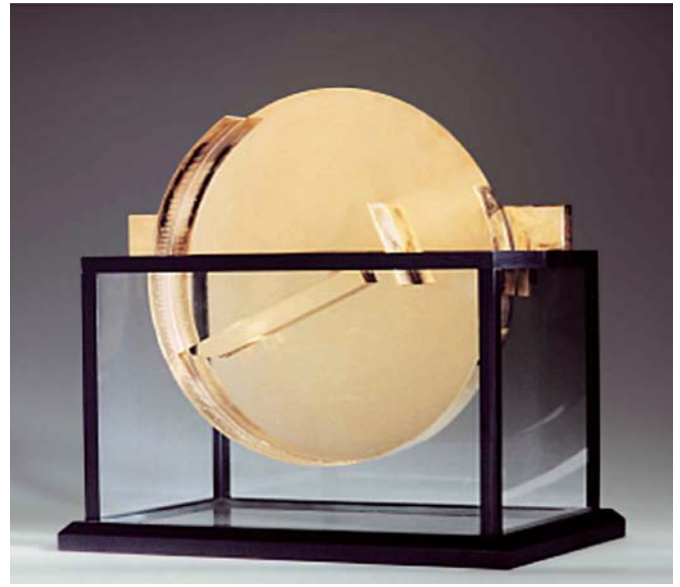


Figure 6. Instrument de mesure de la réfraction de la lumière d'après la description d'Ibn al Haytham (1041). Herausgegeben von Fuat Sezgin, *Wissenschaft und Technik im Islam*, Institut für Geschichte der Arabisch-Islamischen Wissenschaften an der Johann Wolfgang Goethe-Universität, Frankfurt am Main (2003).

L'impact de cette optique nouvelle dépasse largement la seule discipline qui vient de naître. Le *Kitab Al Manazir* est imprimé pour la première fois à Bâle en 1572 par Frédéric Risner sous le titre *Opticae Thesaurus*. Jusqu'au 17^e siècle, Alhazen reste une des références qui inspirent la culture, l'art, la peinture à travers tout le continent européen [12].

Cependant, comme toute théorie nouvelle, celle d'Ibn al Haytham est imparfaite et évidemment incomplète. Un jeune élève du grand astronome et mathématicien Qutb al-Din al-Shirazi, lui-même élève de l'astronome A-Tusi, va entreprendre l'une des missions les plus ardues : la révision du traité de l'optique du Maître Ibn al Haytham [1]. Dans son œuvre *Tanqih Kitab al-Manazir* (la révision du traité d'optique d'Ibn al-Haytham), Kamal Al-Din Al-Farisi (1260–1320), reprend l'étude de la sphère ardente et se focalise sur l'étude de l'arc-en-ciel qui fascinait les opticiens et les érudits de l'époque. Il réalise plusieurs expériences avec une sphère remplie d'eau comme modèle de la goutte d'eau qui lui permettent de donner la première explication correcte de l'apparition des couleurs de l'arc-en-ciel qui sont, pour lui, une fonction de la combinaison de la réflexion et de la réfraction, ou dans ses propres termes : « *Les couleurs de*

l'arc-en-ciel sont différentes, rapprochées, entre le bleu, le vert, le jaune noirâtre, et proviennent de l'image d'une source lumineuse forte parvenant à l'œil par réflexion et réfraction, ou une composition des deux ».

Les travaux de ces illustres savants de la période médiévale ont alimenté ceux de leurs successeurs plusieurs siècles plus tard. Descartes (1595–1650), Kepler (1600), Snell (1625), Fermat (1664), Grimaldi (1665), Huygens (1678) et même le grand Newton (1704) ont d'abord étudié l'optique arabe et particulièrement l'optique d'Ibn al Haytham [11].

En conclusion, le savoir universel est le fruit d'une œuvre collective, l'œuvre d'hommes et de femmes à travers les siècles, partout où ils ont eu la curiosité et l'envie de comprendre leur monde. Ce savoir est composé de briques et de strates construites l'une sur l'autre et parfois imbriquées à ne plus se démêler. Connaître cette histoire et redécouvrir les expériences oubliées est un enjeu primordial, et peut donner de l'inspiration et une meilleure compréhension des enjeux du monde présent.

Remerciements

L'auteur exprime sa gratitude au Prof. Roshdi Rashed pour avoir pris le temps de lire et corriger cet article.

Références

[1] R. Rashed, *Histoire des sciences arabes*, Tome 2, Ed. du Seuil (1997)
 [2] G. Simon, *Archéologie de la vision : l'optique, le corps, la peinture*, Ed. du Seuil (2003)
 [3] R. Rashed, *L'optique et la cataoptrique*, Volume 1, Ed. E.J. Brill (1997)
 [4] R. Rashed, A Pioneer in Anaclastics—Ibn Sahl on Burning Mirrors and Lenses, *ISIS* 81, 464-491 (1990)
 [5] A. Kwan, J. Dudley, E. Lantz, Who really discovered Snell's law?, *Physics World* L (2002)
 [6] J. Al Khalili, Advances in optics in the medieval Islamic world, *Contemporary Physics* 56(2), 109–122 (2015)
 [7] E.G. Wiedemann, https://en.wikipedia.org/wiki/Eilhard_Wiedemann
 [8] M. Nazif, *Al-Hasan ibn al-Haytham, his optical researchs and discoveries* (2 vols.) (Cairo, 1942-1943)
 [9] A.I. Sabra, *The optics of ibn al-Haytham* (2 vols.) (London, 1989)
 [10] A.-V. Dulac, Shakespeare et l'optique arabe, *Actes des congrès de la Société française Shakespeare* (Shakespeare et l'Orient) 27 (2009)
 [11] D.C. Lindberg, Medieval Islamic Achievement in Optics, *Optics and Photonics News*, 31-35 (2003)
 [12] C.M. Falco, A.L. Weintz Allen, Ibn al-Haytham's Contributions to Optics, Art, and Visual Literacy, *Painted Optics Symposi*, Florence, September 7-9, 2008

Comment fonctionnent les capteurs CCD et CMOS ?

Thomas ESTRUCH
Ingénieur études et applications, Photon Lines
th-estruich@photonlines.com

Les capteurs numériques d'image sont omniprésents dans notre vie de tous les jours. Téléphones portables, appareils photographiques, caméras scientifiques haute sensibilité, caméras rapides, le marché des capteurs a littéralement explosé ces dernières années. Face aux applications toujours plus poussées et à la grande diversité de produits sur le marché, il est important de revenir à l'essentiel et d'identifier les questions à se poser pour choisir la technologie et donc le capteur adapté au besoin de chacun. Cet article a donc pour vocation de rappeler le fonctionnement et les caractéristiques propres des deux grandes familles de capteurs : CCD et CMOS.

Fonctionnement d'un capteur à capacité MOS

La technologie de base sur laquelle reposent les capteurs CCD et CMOS est la capacité MOS. Il s'agit en fait d'un sandwich de couches minces composé de trois types de matériaux : un métal (appelé porte ou grille), un isolant (en l'occurrence un oxyde) et un semiconducteur (dopé généralement P, avec deux inclusions dopées N appelées source et drain) comme visible en figure 1.

Lorsqu'un photon d'énergie supérieure au gap est absorbé dans le semiconducteur, une paire électron/trou est créée. Il s'agit en fait d'un atome du réseau du semiconducteur qui va libérer un électron (promotion de la bande de valence à la bande de conduction) et laisser à sa place une charge positive appelée trou. Sous l'effet du champ appliqué au niveau de la grille (zone de déplétion), l'électron va migrer à l'interface entre le semiconducteur et l'oxyde et rester piégé dans un puits de potentiel tandis que le trou va migrer vers l'électrode de terre. Le nombre d'électrons qui peuvent ainsi être collectés dépend de

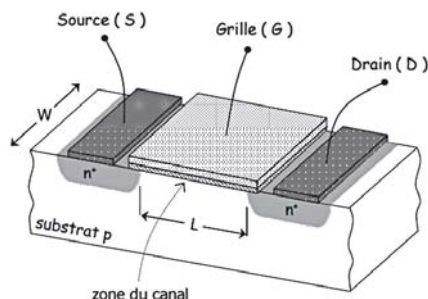


Figure 1. Schéma d'une capacité MOS. La grille (G) représente la zone photosensible tandis que les électrodes de source (S) et de drain (D) permettent de piéger les électrons dans le puits de potentiel situé sous chaque grille.

la contenance du puits qui est une fonction de la surface et de la tension appliquée à la grille ainsi que de l'épaisseur de la couche d'oxyde.

Si le principe de génération et de stockage d'une charge à partir de l'absorption d'un photon leur est commun, les capteurs CCD et CMOS présentent toutefois des différences fortes, dont la principale tient à la manière dont vont être transférées les charges piégées dans les puits de chaque pixel vers la partie électronique de façon à obtenir l'image de la scène.

ScienTec
La SoluTion à vos mesures

Analyseur d'écran Luminance, couleur et Température de couleur CA-310



Chromaticité, balance des blancs, gamma, contraste



KONICA MINOLTA

- Évaluation des faibles et fortes luminances
- Analyse des couleurs
- Respect des courbes de sensibilité CIE 1931
- Précision et rapidité



- Écrans LCD, plasma, OLED, rétroprojecteurs...
- Panneaux d'affichage à matrice active LCD, moniteurs LCD et TV LCD...

ScienTec c'est aussi...

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



info@scientec.fr / www.scientec.fr
01.64.53.27.00

Les capteurs CCD

Le CCD (*charge coupled device*) consiste en une juxtaposition matricielle de capacités MOS. Pour obtenir l'image de la scène, il faut compter le nombre d'électrons piégés dans chaque puits, qui est proportionnel au nombre de photons incidents sur chaque pixel. Pour ce faire, on commande séquentiellement la tension des grilles de chaque capacité MOS au rythme d'une horloge, ce qui va permettre de transférer les électrons d'une capacité vers sa voisine : on parle de registre à décalage. Après n transferts, les charges sont converties en tension dans un condensateur puis amplifiées. Elles sont ensuite codées numériquement à l'aide d'un convertisseur analogique/numérique à l'extérieur de la matrice CCD.

Il existe plusieurs architectures pour les capteurs CCD qui dépendent directement du type d'applications visées. Les systèmes à transferts de bloc complet (*full frame transfer* visible en *figure 2a*) ou partiel (*frame transfer* en *figure 2b*) sont surtout utilisés dans le milieu scientifique. Les systèmes à transferts interligne (*interline transfer* en *figure 2c*) sont utilisés dans les caméras pour le grand public et les systèmes de télévision professionnels.

Les CCD full frame transfer : cette architecture *full frame* est la plus simple. Les photons sont collectés sur l'ensemble de la surface du capteur qui est photosensible. Le capteur est ensuite lu verticalement ligne par ligne à l'aide du registre à décalage. Chaque ligne une fois transférée au registre de lecture est lue horizontalement pour obtenir la valeur de chaque pixel. Cette lecture progressive est lente mais les capteurs CCD *full frame* sont les plus sensibles du marché et peuvent fonctionner dans de nombreuses configurations d'illumination.

Les CCD frame transfer : l'architecture à transfert de bloc (*frame transfer*) est basée sur la division de la zone photosensible du capteur en deux parties symétriques et de mêmes dimensions (cf. *figure 2b*). La première partie collecte les photons de manière classique. Ils sont ensuite rapidement transférés (en quelques millisecondes) vers la deuxième partie du capteur qui est protégée de la lumière incidente et

sert au stockage des électrons pour la lecture de l'image. Ainsi on peut faire l'acquisition de l'image $n+1$ sur la partie exposée du capteur pendant que l'image n est lue sur la partie du capteur masquée. On augmente donc considérablement la cadence par rapport à l'architecture *full frame*. Ces capteurs *frame transfer* ont un facteur de remplissage équivalent au *full frame* mais sont plus chers car la taille du capteur doit être doublée pour être équivalente à un capteur *full frame*.

Les CCD interline transfer : l'architecture interligne incorpore, au niveau de chaque pixel, un canal de transfert de charges (registre vertical recouvert d'un blindage optique métallique) directement adjacent à une photodiode de manière à ce que les charges accumulées puissent rapidement (de l'ordre de la microseconde) être transférées une fois que l'acquisition est terminée. On peut ainsi atteindre des temps d'exposition très courts ce qui permet d'éviter de saturer les pixels et ce, sans avoir recours à une obturation mécanique du CCD. En revanche, le blindage des registres verticaux agit comme un store vénitien et réduit la zone photosensible du capteur par rapport aux architectures *full frame*. Pour compenser cet effet indésirable et réaugmenter le facteur de remplissage, on peut utiliser des matrices de microlentilles pour focaliser la lumière incidente sur les photodiodes mais, dans le cas où l'objectif est très ouvert (illumination grand angle), la sensibilité reste faible.

De par leur architecture, les capteurs CCD offrent l'avantage d'un facteur de remplissage proche de l'unité ($> 98\%$). Cela signifie que la zone photosensible est quasiment égale à la dimension du

capteur. La dynamique d'un capteur est liée au rapport entre la capacité quantique de chaque photosite (proportionnelle à la taille de la zone photosensible) et la somme des bruits d'obscurité (faible pour les CCD) et des bruits de lecture. Les CCD ont ainsi une grande dynamique :

$$\text{Dynamique} = 20 \log (\text{capacité} / (\text{obscurité} + \text{lecture}))$$

De plus, si la sensibilité est définie comme la capacité d'un pixel à atteindre sa saturation rapidement, les capteurs CCD sont très sensibles car continuellement exposés.

Les principaux défauts que l'on retrouve sur des images provenant de capteurs CCD sont liés au fait que le capteur est exposé en continu et les charges accumulées dans les puits quantiques doivent être transférées à la fin de l'acquisition. Ainsi lorsqu'un pixel reçoit une quantité trop importante de photons (qui dépasse sa capacité), il sature et déborde sur ses voisins un peu à la manière d'un seau trop rempli. Ce phénomène porte le nom de *blooming* (cf. *figure 3*). De même lorsqu'un pixel est saturé, il va lors de sa lecture par le registre à décalage saturer toute la colonne qui lui est associée. On parle alors de colonnage ou *smearing* (cf. *figure 3*). Il est donc parfois nécessaire d'ajouter un système d'obturation mécanique pour éviter que le capteur ne soit exposé pendant la lecture de l'image. Enfin, malgré l'évolution des architectures des capteurs CCD pour augmenter la cadence de lecture, il est impossible d'adresser la valeur d'un pixel individuel en sélectionnant une région d'intérêt ce qui limite les cadences atteignables par cette technologie (aujourd'hui la limite supérieure est de quelques dizaines de kHz).

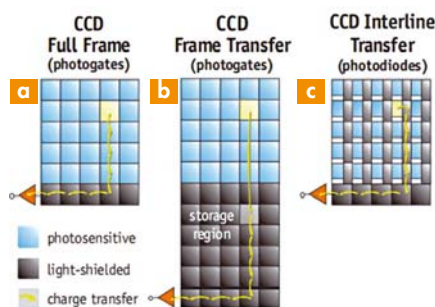


Figure 2. Schéma des différents types d'architecture de capteurs.



Figure 3. Exemple de *smearing* et de *blooming* sur une image prise par un capteur CCD. Le *smearing* donne lieu à une ligne verticale saturée. Le *blooming* donne lieu à une saturation des pixels les plus proches.

Les capteurs CMOS

Technologie plus récente apparue dans les années 90, les capteurs CMOS (*complementary metal oxide semiconductor*) sont néanmoins basés sur le même principe d'absorption de photons et de génération de courant proportionnel au flux incident sur chaque pixel. La différence provient de la façon dont les charges sont lues.

Contrairement aux capteurs CCD, les charges sont cette fois directement converties au niveau du photosite de génération par le biais d'un amplificateur sur chaque pixel (*figure 4*). Cette particularité permet de supprimer un grand nombre de transferts comme dans le cas des registres à décalage du CCD et donc d'augmenter la cadence de lecture. La taille des capteurs est voisine de celle des CCD mais la résolution spatiale est moindre, du fait de la présence des amplificateurs associés à chaque pixel (un peu comme dans le cas des CCD interlignes). On peut là encore adjoindre une matrice de microlentilles pour compenser en partie cet effet.

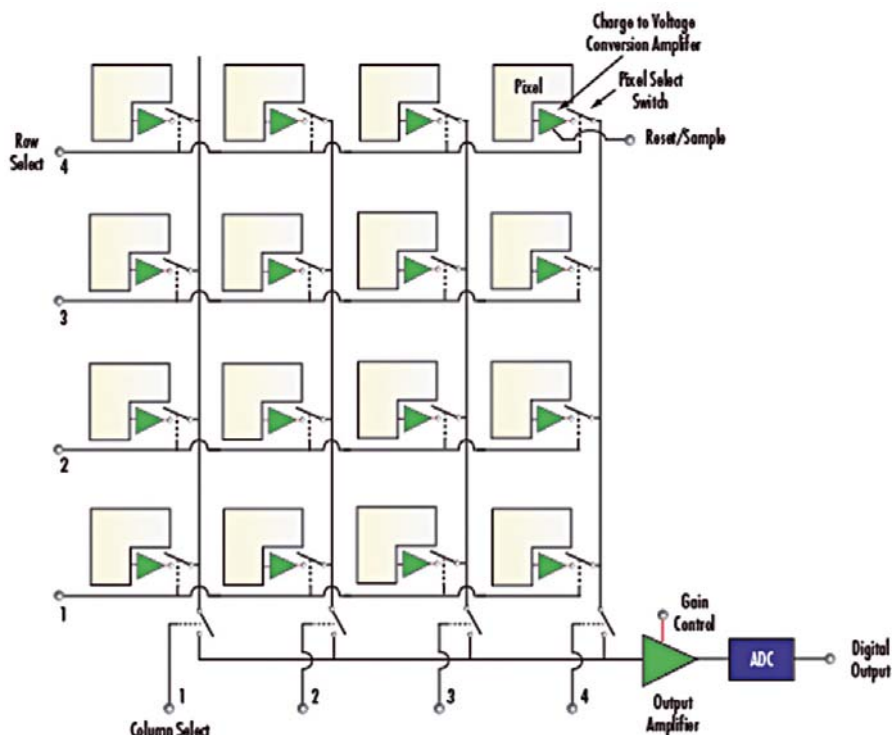


Figure 4. Schéma de l'architecture d'un capteur CMOS. Chaque photosite dispose de son propre amplificateur. Chaque pixel peut donc être adressé individuellement et possède une réponse propre indépendante de ses voisins.

OPTOÉLECTRONIQUE

La Flexibilité et l'Expertise au service de l'Innovation

- **Emetteurs UV-VIS-IR**
 - LEDs et Power LEDs
 - Solutions "Chip on Board"
 - Sources lumineuses à LED ou Xénon
 - Diodes lasers
 - Lampes flash Xénon
 - Corps noirs miniatures
- **Détecteurs UV-VIS-IR**
 - Pyrodétecteurs
 - Thermopiles
 - Photodiodes
 - Phototransistors
 - Photorésistances
 - SPCM, Compteurs de photons
 - Modules SiPM Lynx
 - Photodiodes PIN et APD

HTDS

Hi-Tech Detection Systems

APPLICATIONS

- > Industrielles
- > Grand public
- > Médicales
- > Biomédicales
- > Aéronautiques
- > Scientifiques
- > Défense
- > Automobile

Des solutions et un service sur mesure

Petites à très grandes séries - Programmes spécifiques - Qualifications - Tests

HTDS (Hi-Tech Detection Systems) - 3 Rue du Saule Trapu - BP 246 - 91 882 Massy Cedex - Tel : 01 64 86 28 28 - info@htds.fr - www.htds.fr

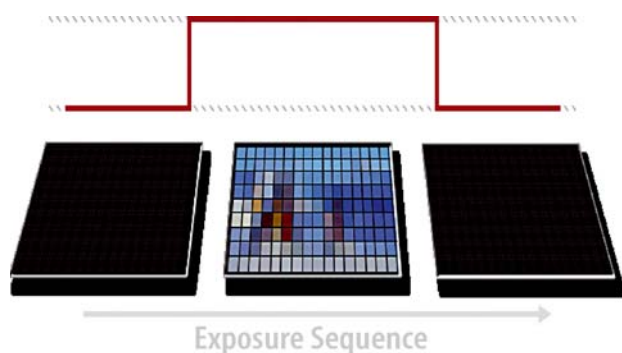


Figure 5. Fonctionnement du capteur CCD en *global shutter*. Le capteur est entièrement exposé puis obturé le temps de la lecture de l'image.

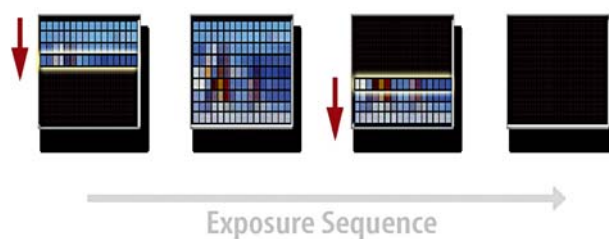


Figure 6. Fonctionnement en *rolling shutter* d'un capteur CMOS. Le capteur est lu séquentiellement ce qui peut induire des défauts de représentation si le phénomène se déplace trop rapidement.

Une autre différence fondamentale est la façon dont est acquise l'image. Dans les architectures CCD, à un instant donné, l'ensemble du capteur et donc des pixels est exposé simultanément. L'instant d'après les photosites sont obturés le temps du comptage des électrons générés de manière à obtenir une image. On parle de fonctionnement en *global shutter* (cf. figure 5). Dans le cas du capteur CMOS, chaque photosite ou pixel va être exposé pendant un temps identique mais ne collecte pas la lumière au même instant. Cette acquisition séquentielle ligne par ligne en partant de la partie supérieure du capteur porte le nom de *rolling shutter* (cf. figure 6).

Grâce à son système de lecture qui permet d'adresser chaque pixel individuellement contrairement au cas du capteur CCD, il est possible de ne lire qu'une partie de la matrice du capteur CMOS. Cette sélection d'une zone d'intérêt sur l'image permet de diminuer le temps de lecture

pour chaque image et donc d'atteindre des cadences supérieures à ce qu'il est possible d'atteindre avec un capteur CCD interligne par exemple. Il est également possible de corriger la valeur de chaque pixel en lui appliquant une fonction choisie ce qui permet de corriger la non-linéarité de certains phénomènes, ou tout simplement de s'affranchir du bruit FPN (bruit *fixed pattern noise* lié à la réponse non uniforme de chaque pixel de la matrice du capteur à une même illumination ou en l'absence d'illumination). De plus, la fabrication de cette technologie de capteur a l'avantage d'être compatible avec les installations de fabrication de masse des circuits intégrés et son coût en est largement diminué.

En contrepartie, la zone photosensible associée à chaque pixel étant réduite par la présence des amplificateurs, le facteur de remplissage (sans utilisation de matrice de microlentilles) est beaucoup plus faible que pour un capteur CCD (< 30 %) ce qui

impacte grandement la sensibilité. De plus, ce type de capteur est très sensible aux sources de bruits (bruits de lecture et de numérisation) qui vont dégrader le rapport signal à bruit sur une image. Enfin, le fonctionnement en *global shutter* des capteurs CMOS peut avoir des conséquences sur la qualité de l'image dans le cas d'un mouvement d'objet trop rapide par rapport à la cadence de la caméra. Si l'objet se déplace horizontalement, il est possible que son image apparaisse avec un angle lié à la lecture séquentielle de chaque ligne du capteur. Pour les mêmes raisons, dans le cas d'un éclairage fluctuant, l'intensité de l'image ne sera pas uniforme sur la matrice.

En conclusion, les capteurs CCD et CMOS sont deux technologies performantes qui sont complémentaires. Il est donc important d'identifier les facteurs clés qui vont permettre de réaliser une image exploitable sur la scène considérée pour choisir son type de capteur. Si la sensibilité et la dynamique sont prépondérantes par rapport à la cadence, on optera plutôt pour un capteur CCD *full frame*. Si la cadence et le temps d'exposition de la scène (risque de saturation) sont les éléments déterminants, alors il faudra s'orienter vers des capteurs CMOS.

Tableau comparatif des CCD et CMOS.

	CCD	CMOS
Facteur de remplissage	50 à 98 %	30 à 50 %
Sensibilité à la lumière	Élevée (0,1 lux)	Plus faible (10 lux)
Sensibilité aux UV et IR	Étendue	Étroite
Réponse	Moyenne	Très rapide (10 à 100x plus)
Consommation d'énergie	Élevée (2 à 4x plus que CMOS)	Faible
Dynamique	Élevée	Moyenne
Uniformité du capteur	Élevée (1 à 2 % de FPN*)	Faible à modérée (5 à 20 % de FPN*)
Bruit électronique	Faible	Moyen à élevé (10x plus que CCD)
Courant d'obscurité	Faible	Moyen
Sélection d'une région d'intérêt	Très limité	Élevé
Anti blooming	Absent (sauf solution custom)	Présent par défaut
Shuttering	Assez rapide	Faible
Biasing et clocking	Multiple, tension élevée	Unique, basse tension

*FPN : *fixed pattern noise*

Références

http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M05_C06/co/OPI_fr_M05_C06_web.html
<http://www.astrosurf.com/luxorion/photo-numerique3.htm>
https://www.tedpella.com/cameras_html/ccd_cmos.htm
<http://www.red.com/learn/red-101/global-rolling-shutter>
http://genelaix.free.fr/IMG/pdf/MOS_Diaporama.pdf

Acheter une caméra CCD / CMOS industrielle ou scientifique

Julien ROMANN

Ingénieur Etudes, Applications et Formation - Photon Lines

ju-romann@photonlines.com

L'achat d'un détecteur optique peut aujourd'hui relever du casse-tête étant donné le nombre de types de capteurs présents sur le marché. L'époque où le choix d'un capteur optique se limitait à la simple binarité CCD/CMOS est en effet révolue. Certes, ces deux grandes technologies constituent toujours le socle du marché actuel, mais ces dernières ont chacune progressivement donné naissance à des sous-technologies spécifiques engendrant des capteurs plus spécialisés.

Reposant toutes deux sur l'effet photoélectrique permettant de convertir les photons incidents en charges électriques, les technologies CCD (*charged coupled device*) et CMOS (*complementary metal oxide semiconductor*) ne se différencient que par la manière dont les charges ainsi générées sont ensuite converties en signal de sortie exploitable. Les principes qui régissent ces deux technologies sont décrits en détails dans l'article *Comprendre* de ce numéro.

Les capteurs CCD

Le CCD a dominé le marché des capteurs optiques durant des décennies en raison

de la haute qualité des images qu'il procurait compte tenu de la technologie disponible durant cette période. La surface du capteur étant constituée d'une matrice de capacités MOS (*metal oxide semiconductor*), chaque pixel de la matrice génère un puit de potentiel permettant de stocker les photoélectrons issus du rayonnement incident. Ces photoélectrons sont ensuite transférés de pixel à pixel de façon séquentielle sous l'effet de la tension de grille contrôlée par une horloge. Globalement, les capteurs CCD offrent une haute sensibilité, un bas niveau de bruit, une capacité quantique importante, donnant ainsi lieu à une dynamique (rapport entre le niveau de saturation et le seuil de détection) importante.

Les CCD intensifiés (ICCD et EMCCD)

La nécessité de satisfaire aux besoins d'imagerie à très bas niveau de lumière a donné lieu au capteur ICCD, dispositif couplant un CCD et un intensificateur. L'intensificateur, monté en entrée du CCD, est la juxtaposition d'une photocathode (convertit les photons incidents en photoélectrons), d'une galette de micro-canaux (*micro-channel plate* ou MCP, multiplie les électrons incidents par émissions secondaires), et d'un écran phosphore (convertit les électrons issus de la MCP en photons). De multiples photons arrivent ainsi au CCD pour chaque photon incident en entrée de l'intensificateur. Une tension de contrôle est appliquée entre la



info@photonlines.com

+33 (0)1 30 08 99 00

www.photonlines.fr

Caméras CCD et CMOS

- A haute cadence
- A bas niveau de lumière
- A haute résolution
- Embarquées
- Refroidies
- Avec traitement d'images



photocathode et la MCP afin d'accélérer les photoélectrons vers cette dernière. Cette tension constitue un obturateur (*shutter*), puisque sa modification peut interdire le transfert des photoélectrons vers la MCP, et donc l'arrivée de photons vers le CCD. On parle ainsi de *gating*, caractéristique inhérente aux capteurs ICCD. D'un très haut niveau de sensibilité, l'ICCD bénéficie donc d'un *gating* rapide, le tout conféré par un intensificateur rendant toutefois ce capteur relativement onéreux.

L'EMCCD (*electron-multiplication CCD*) est également destiné aux bas niveaux de lumière, mais il ne comporte pas d'intensificateur en amont du capteur. L'intensification s'effectue ici par génération d'électrons secondaires en cascade au sein d'une unité de multiplication d'électrons située en sortie de capteur CCD. Un tel système permet, à la différence de l'ICCD, de bénéficier directement de la résolution procurée par la matrice CCD. L'intensification en sortie de détecteur procure également un faible niveau de bruit devant le gain obtenu par multiplication d'électrons. En revanche, un système de refroidissement est souvent nécessaire au fonctionnement de l'EMCCD, qui ne bénéficie par ailleurs pas de *shutter* en entrée de capteur. L'EMCCD atteint des performances rivalisant aujourd'hui avec l'ICCD pour un coût inférieur, offrant ainsi souvent une meilleure solution pour de bas niveaux de lumière dans les applications ne nécessitant pas de *gating* rapide.

Les capteurs CMOS

Les capteurs CMOS ont connu un développement plus tardif que celui des capteurs CCD mais néanmoins significatif ces dernières décennies en raison de leur consommation plus faible en énergie, de leur coût de fabrication inférieur et des meilleures possibilités d'intégration qu'ils offrent au sein de dispositifs compacts. Ainsi, la prédominance de la technologie CMOS dans la production de masse lui a permis de surpasser la technologie CCD dans certaines applications.

La technologie CMOS ne parvient pas à ce jour à égaler la technologie CCD en

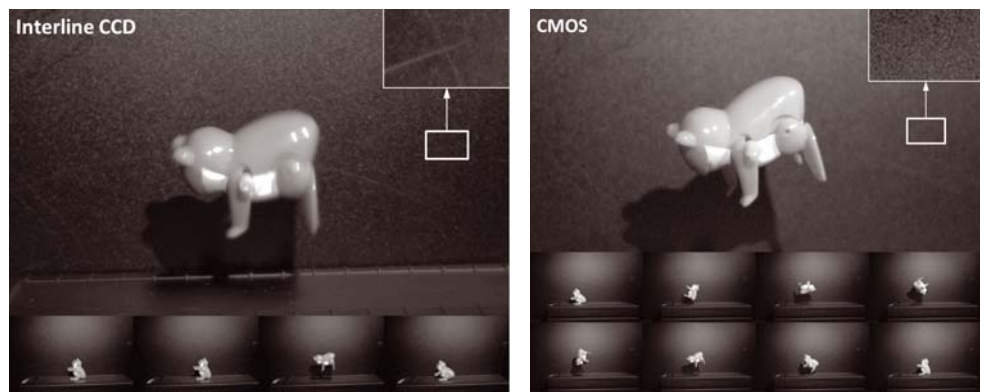


Figure 1. Clichés d'un objet en mouvement filmé avec une caméra comportant un capteur : interline CCD (à gauche), CMOS (à droite).

termes d'uniformité, de dynamique ou de niveau de bruit. Néanmoins, les capteurs CMOS ont un net avantage concernant la cadence maximale de fonctionnement, la capacité d'acquisition sur des régions d'intérêt du capteur (ROI), la fiabilité (la majorité des fonctions du capteur se trouvent sur le même circuit intégré) et le coût.

Le CMOS scientifique (sCMOS)

Introduits en 2009, les capteurs sCMOS représentent une avancée surmontant les inconvénients de la technologie CMOS. Fondée sur les principes de cette dernière, l'architecture des capteurs sCMOS leur donne sur de nombreux aspects l'avantage à la fois sur les capteurs CMOS et sur les capteurs CCD. De manière générale, les capteurs CCD bénéficient d'une haute sensibilité au prix d'une vitesse d'échantillonnage relativement faible, alors que les capteurs CMOS se distinguent aussi bien par des cadences élevées que par une dynamique limitée. Face aux compromis inhérents à ces deux familles, les capteurs sCMOS rassemblent une grande dynamique, des cadences élevées, un faible bruit, de hautes résolutions et un large champ. Bien que les caractéristiques précises de ces capteurs restent assez confidentielles, certaines de leurs spécificités ont été révélées dans un *white paper* commun d'Andor Technology, Fairchild Imaging et PCO Imaging en 2009. Leur faible niveau de bruit ainsi que leur dynamique étendue résultent de la combinaison d'un système de bi-amplification en parallèle et de convertisseurs analogiques/numériques pour chaque rangée de pixels.

De plus, la lecture du capteur est réalisée de manière indépendante sur ses moitiés haute et basse. Enfin, ces capteurs offrent la possibilité de sélectionner le mode de *shutter* à utiliser (*global shutter* ou *rolling shutter*).

Les capteurs sCMOS atteignent aujourd'hui des performances pouvant surpasser celles de capteurs CCD en termes de dynamique et de cadence, tout en gardant un niveau de bruit comparable à celui des CCD. Seuls les EMCCD parviennent encore à surpasser les capteurs sCMOS concernant l'efficacité quantique (QE), c'est-à-dire le ratio entre les photoélectrons générés et les photons incidents captés.

À chaque capteur sa spécialité

Les différences entre technologies induisent des performances distinctes mais définissent surtout des domaines de prédilection pour chaque type de capteur. En effet, les divers cas pratiques impliquant une solution d'imagerie nécessitent d'un capteur des performances de natures différentes.

Les exemples visuels sont souvent très utiles afin de mieux se rendre compte de l'impact d'une technologie de capteur sur le résultat obtenu. La *figure 1* illustre d'abord la cadence d'acquisition plus élevée du capteur CMOS que celle du capteur CCD, expliquant pour le CMOS le plus grand nombre d'images disponibles pour décrire le mouvement du sujet. En revanche, une observation des images

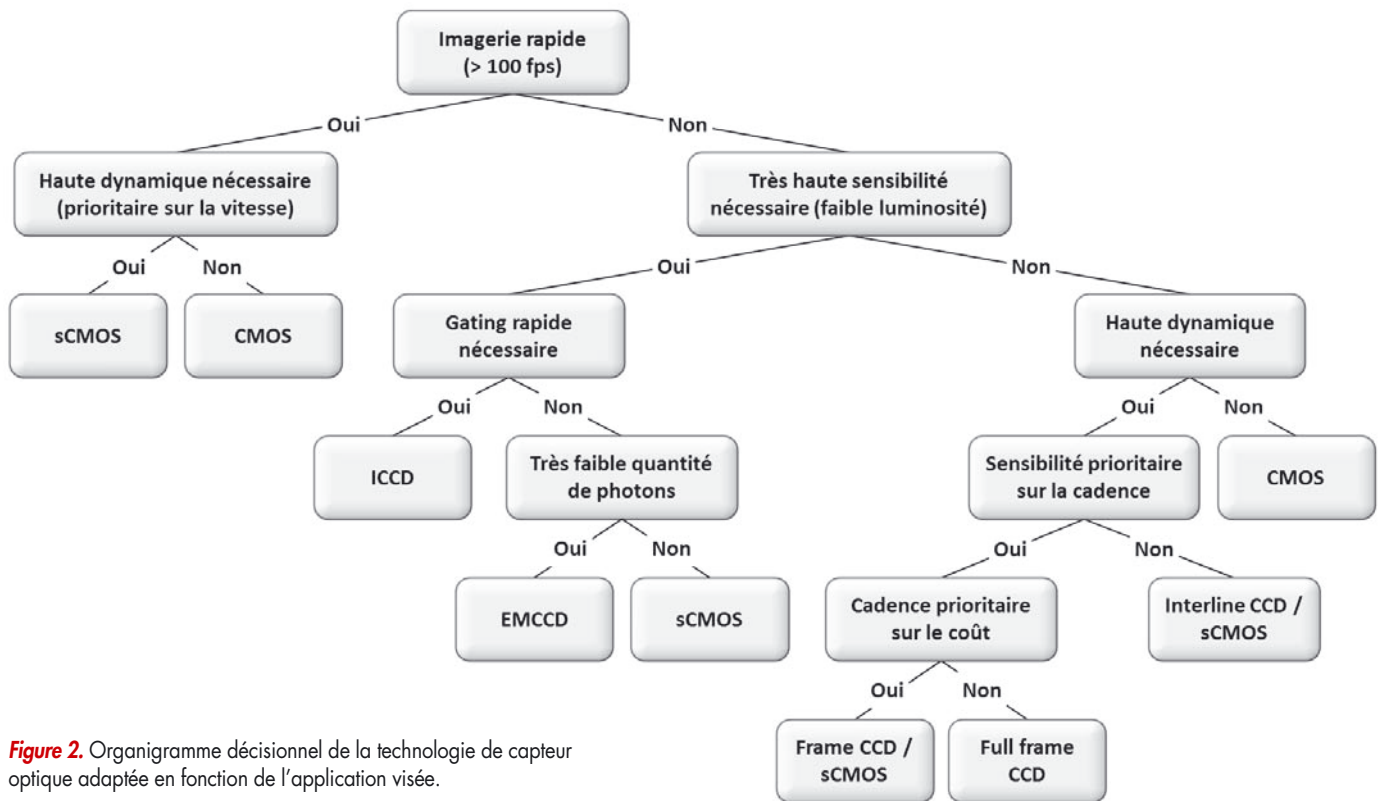
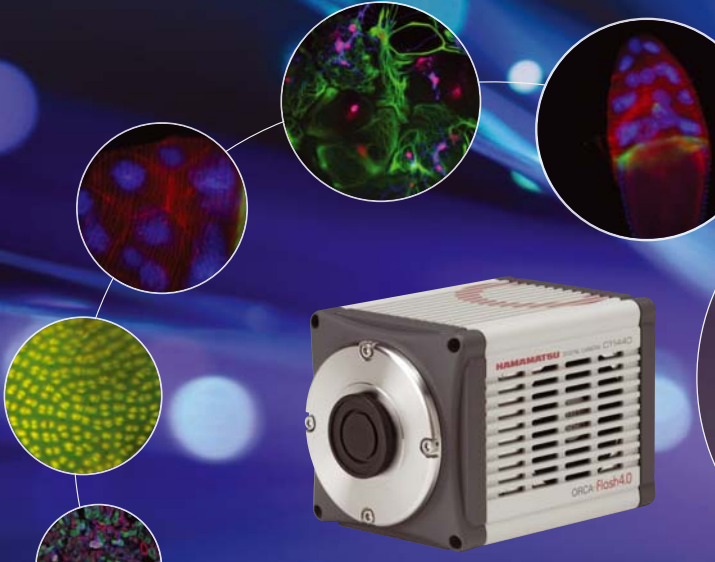


Figure 2. Organigramme décisionnel de la technologie de capteur optique adaptée en fonction de l'application visée.

Discover the Breakthrough



ORCA®-Flash4.0 V2

The first sCMOS camera with over 80% peak Quantum Efficiency. Available NOW from Hamamatsu.

Scientific breakthroughs rarely come from giant steps. Rather, it's a continuous progression of small steps and astute application of those differences that enables advances. From its introduction the ORCA-Flash4.0 has challenged the status quo of imaging and has undergone a series of useful enhancements. The most recent is perhaps the most exciting; a notable increase in the ability to detect photons. If you have not yet experienced the ORCA-Flash4.0 V2 sCMOS, now is the time.

What breakthrough will you make with your extra photons?

HAMAMATSU

PHOTON IS OUR BUSINESS

www.hamamatsucameras.com

Les principaux fabricants et fournisseurs de solutions d'imagerie industrielle et scientifique (hors caméras rapides).

Distributeurs	Fabricants et technologies	Contacts
ACAL BFI	LUMENERA (CCD, CMOS), MIGHTEX (CCD, CMOS) NEW IMAGING TECHNOLOGIES (CMOS) QIMAGING (CCD, EMCCD, CMOS, sCMOS)	Louis Goyer +33 (0)6 87 70 73 88 – louis.goyer@acalbfi.fr
AMS TECHNOLOGIES	MIGHTEX (CCD, CMOS)	33 (0)1 64 86 46 00 – info@amstechnologies.com
ANDOR	ANDOR (CCD, EMCCD, ICCD, sCMOS)	William Fresquet (life sciences) +33 (0)6 78 01 27 72 – w.fresquet@andor.com Jean-Michel Laurent (physical sciences) +33 (0)6 07 09 18 98 – jm.laurent@andor.com
ATD ELECTRONIQUE	ANDANTA (CCD), AWAIBA (CMOS), CMOSIS (CMOS) FAIRCHILD IMAGING (sCMOS), NEW IMAGING TECHNOLOGIES (CMOS), SONY (CCD, CMOS)	Bernard Kreff +33 (0)1 30 15 69 74 – bkreff@atd.fr
HAMAMATSU	HAMAMATSU (CCD, EMCCD, ICCD, sCMOS)	Anne Llorens +33 (0)1 69 53 71 00 – allorems@hamamatsu.fr
I2S	BASLER (CCD, CMOS)	Corinne Barbot +33 (0)5 24 07 74 35 – c.barbot@i2s.fr
IDS IMAGING	IDS IMAGING (CCD, CMOS)	Mithridate Mahmoudi +33 (0)1 42 21 47 04 – m.mahmoudi@ids-imaging.fr
LASER 2000	PHOTON FOCUS (CMOS)	Fabien Poujol +33 (0)5 57 10 92 87 – poujol@laser2000.fr
OPTOPRIM	RAPTOR PHOTONICS (CCD, EMCCD, sCMOS)	Yann Joly +33 (0)6 09 48 19 74 – info@optoprim.com
PHOTON LINES	FINGER LAKES INSTRUMENTATION (CCD) GREATEYES (CCD), JENOPTIK (CCD, CMOS) LUMENERA (CCD, CMOS), PCO (CCD, sCMOS) SPECTRAL INSTRUMENTS (CCD)	Agnes Robert +33 (0)1 30 08 99 00 – ag-robert@photonlines.com
	PHOTEK LUMINTEK (ICCD, EMCCD)	Eric Drean +33 (0)1 30 08 99 00 – er-drean@photonlines.com
ROPER SCIENTIFIC	PHOTOMETRICS (CCD, EMCCD, CMOS) PRINCETON INSTRUMENTS (CCD, ICCD, EMCCD) QIMAGING (CCD, EMCCD, CMOS, sCMOS)	Jeremy Thiblet, Eric Morcet +33 (0)1 60 86 80 59 – info@roperscientific.fr
SPOT IMAGING	SPOT IMAGING (CCD, CMOS)	info@spotimaging.com

sous grandissement révèle un bruit plus marqué dans le cas du capteur CMOS.

L'organigramme décisionnel présenté à la figure 2 ne constitue pas un raisonnement absolu et systématique à suivre avant l'achat d'une caméra, mais a simplement pour but d'illustrer de manière simple certaines questions techniques à se poser afin de faciliter le choix parmi les différentes technologies disponibles. Bien entendu, le budget alloué à l'achat d'un capteur intervient dès le début du processus de sélection. Toutefois, même si la question du coût peut conditionner l'achat même du capteur, elle ne se substitue en général pas au besoin appelant à une technologie particulière.

Les capteurs CCD bénéficient de hautes performances et d'une grande polyvalence d'utilisation. Bien que leur coût relativement élevé limite leur utilisation dans les dispositifs de grande consommation, ils sont très utilisés dans les applications à haute technicité, aussi bien dans le visible que dans l'infrarouge ou l'UV. Les capteurs ICCD et EMCCD constituent deux solutions de choix en matière de très haute sensibilité pour les bas niveaux de lumière. En revanche, les capteurs CCD ne peuvent généralement pas répondre aux besoins d'imagerie à haute vitesse (> 100 fps).

L'architecture multifonctionnelle, compacte et très fiable propre aux capteurs

CMOS fait de ces derniers un choix souvent évident pour les dispositifs embarqués. Combinées à un faible coût de production, ces caractéristiques rendent ces capteurs prédominants sur le marché de la consommation de masse (smartphones, caméras grand public...). De plus, la technologie CMOS représente très souvent la seule option possible dans les applications d'imagerie à haute vitesse. Enfin, la récente évolution apportée par les capteurs sCMOS permet à ces derniers de progressivement s'implanter dans les technologies de pointe et dans la recherche, mettant ainsi fin à la situation de quasi-monopole exercée jusqu'alors par les capteurs CCD dans ces secteurs.

■ Modules lasers

HTDS présente la gamme de modules lasers DPSS iFLEX-iRIS du fabricant Excelitas Technologies. Ces modules compacts apportent une solution laser « plug & play » ultra stable sur 21 longueurs d'onde (de 375 nm à 852 nm), avec des puissances jusqu'à 220 mW. Ils sont particulièrement adaptés aux applications en biotechnologie, métrologie, recherche et industrielles. Conçus autour d'une diode DSSP très haute stabilité et d'une électronique très faible bruit, les modules iFLEX-iRIS proposent des options telles que connecteurs pour fibre optique KineFLEX, modulateurs, ou encore systèmes multi-longueur d'onde.

www.htds.fr



■ Capteur IR



Ulis lance le capteur d'images Pico384 Gen2, conforme aux standards d'intégration du consortium JEDEC pour l'assemblage dans des produits finaux en grandes séries. Doté d'une résolution de 384 x 288 pixels, ce capteur est principalement destiné aux caméras de vision nocturne pour les applications de loisir grand public ; il permet par exemple d'observer des animaux sauvages, la nuit, à plusieurs centaines de mètres.

www.ulis-ir.com

■ Laser à fibre



Keopsys propose un laser à fibre dopée erbium délivrant 30 W en continu et polarisé linéairement, entièrement refroidi par air : il se présente sous la forme d'un benchtop 3U dont la partie supérieure est ajourée pour une meilleure dissipation de la chaleur. La largeur de raie est de 500 MHz, avec une qualité de faisceau $M^2 < 1,1$. La sortie du laser est isolée et collimatée dans une tête optique compacte.

www.keopsys-group.com

■ Caméras CMOS

Laser2000 distribue deux caméras de Photonfocus destinées à l'imagerie hyperspectrale. Les capteurs A1312 et A2080 ont été optimisés pour les systèmes incluant spectromètres imageurs et besoins de dynamique élevée. Ces deux modèles de caméras intègrent un capteur CMOS CMOSIS de 2 MP avec obturateur global. La caméra HS01 est équipée d'un capteur à balayage de ligne. Ce capteur couvre la gamme spectrale 600-1000 nm. La caméra HS02 dispose d'un capteur CMOS couplé à un filtre hyperspectral agencé en mosaïque ($5.5 \mu\text{m} \times 5.5 \mu\text{m}$) permettant de travailler sur la gamme spectral 600-975 nm.

www.laser2000.fr



■ Caméra X

Les caméras CCD optimisées pour les rayons-X de Acal BFI sont conçues pour un fonctionnement dans la plage d'énergie 5 à 120 keV et disponibles en versions analogique, GigE et CameraLink et en résolution 640 x 480, 1280 x 1024 et 2k x 2k. Elles s'appuient sur un scintillateur à base de GdOs (ou CsI en option) couplé à un réseau de fibre optique directement en contact avec le capteur ; cette architecture favorisant la durée de vie du capteur et l'efficacité dans la bande X.

www.acalbfi.fr



Grande dynamique : la dernière frontière de l'imagerie CMOS



Les imageurs de grande dynamique de New Imaging Technologies font appel aux procédés standards de fabrication CMOS mais offrent des performances inégalées pour des scènes à fort contraste.

Basés sur la conversion directe des photons en tension (principe photovoltaïque), les pixels ont une réponse logarithmique. Ils permettent ainsi d'obtenir dans toutes images et en une seule acquisition 140dB de dynamique intra-scène sans double ou multi-expositions. Cette performance est aussi atteinte lors de changements rapides d'illumination. Cette technologie se décline dans les bandes spectrales visible et proche infrarouge (NIR-SWIR). Elle est particulièrement adaptée pour les fortes illuminations (plasma, arc électrique, laser, LED, soleil) mais aussi pour s'affranchir des réflexions spéculaires (matériaux brillants, reflets). Les applications se déclinent à l'infini ; caméras industrielles visibles et InGaAs, soudage, stéréo & 3D, microscopie, comptage de personnes, thermographie, capteurs optiques, biométrie, écran tactile tout optique, vision de nuit...

Contact

niT
Tél. 01 64 47 88 58
info@new-imaging-technologies.com
www.new-imaging-technologies.com

ANNONCEURS

Zurich Instruments.....	II ^e de couverture	EdpSciences.....	IV ^e de couverture
Alcal BFI.....	13	Kerdry.....	19
Alphanov.....	19	Laser Components.....	35
EdpSciences.....	16	NIT.....	47
Hamamatsu.....	45	Photon Lines.....	43
HTDS.....	41	Scientec.....	39
Idex.....	31	Spectrogon.....	15
Idil Fibres Optiques.....	37	Spectros.....	21
IDS Imaging.....	27, 33	Yenista.....	23
Imagine Optic.....	25		

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

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),
Didier-Luc Brunet (Azur Light Systems)
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 (AFOP).

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 Décembre 2015

Routeage Routeage 93 (93)



IMPRIM'VERT®

PROCHAIN NUMÉRO

Le numéro 80 de Photoniques paraîtra le 10 mars 2016



L'optique dans l'automobile

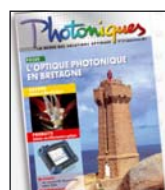
Au programme également :

- Focus : la région Rhône-Alpes
- Comprendre : le capteur à fibres à réseaux de Bragg
- Acheter : une caméra IR

Et aussi...

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

Vous pouvez nous faire parvenir vos communiqués de presse avant le jeudi 28 janvier 2016.



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

Vitrine de l'innovation 2016

Photoniques



A l'occasion du **Congrès Optique Bordeaux 2016**
qui se tiendra du **20 au 23 juin**
à l'ENSEIRB MATMECA de Talence,

Présentez vos produits, vos services,
vos savoir-faire innovants en
optique photonique dans la

Vitrine de l'innovation 2016 !

**Et concourez pour les photons
d'Or, d'Argent et de Bronze !**

Conditions d'inscription :

- Produit, service ou savoir-faire innovant en optique photonique, mis sur le marché depuis moins d'un an
- Maximum deux produits par entité (même raison sociale)

Pour plus d'informations, consulter
notre site : www.photoniques.com

Contact :

Annie KELLER

Tél. : 01 69 28 33 69 • 06 74 89 11 47

a.keller@photoniques.com

Inscriptions :

Du 1er janvier 2016 au 8 avril 2016



Société Française d'Optique



edp sciences