

Photoniques

LA LUMIÈRE ET SES APPLICATIONS

N°105

TÉMOIGNAGES

P. Métivier - D. Lupinski

FOCUS

Suisse

BIOGRAPHIE

C.E. Bleeker

EXPÉRIENCE

Mesures photométriques

DOSSIER

RAYONNEMENT THERMIQUE

- Refroidissement radiatif diurne par revêtement de fibres de silice
- Rayonnement thermique infrarouge de nano-antennes plasmoniques individuelles
- Thermophotovoltaïque : des cellules PV pour convertir le rayonnement thermique
- Le rayonnement thermique en astrophysique



La loi de Kirchhoff



Acheter une caméra infrarouge



Détection synchrone

... et bien plus, de DC à 600 MHz

À partir de
EUR 5.500,-



En standard

-  Analyseur de spectre
-  Oscilloscope avec FFT
-  Module d'imagerie
-  Interface Python, MATLAB®, C, .NET et LabVIEW®

Options disponibles

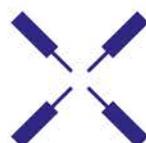
-  AWG
-  Analyseur d'impédance
-  Boxcar PWA
-  PID, PLL, Asservissements

Quelques exemples d'applications

- **Spectroscopie:** laser pulsé, THz, choppers, PLL optique
- **Imagerie:** AFM, Kelvin-probe, CARS, SRS, SNOM
- **Phénomène Quantique:** piège à ions, cQED, boîtes quantiques, centre NV
- **Capteurs:** MEMS, NEMS, gyros, capteur photo-acoustique

Nouveau distributeur en France: Opton Laser

Retrouvez-nous sur
www.zhinst.com



Zurich
Instruments

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

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

Siège social : 33 rue Croulebarbe,
75013 Paris, France
Tél. : +33(0)1 44 08 67 10
CPPAP : 0124 W 93286
ISSN : 1629-4475, e-ISSN : 2269-8418

www.photoniques.com

Le contenu rédactionnel de Photoniques est élaboré sous la direction scientifique de la Société française d'optique
2 avenue Augustin Fresnel
91127 Palaiseau Cedex, France
mariam.mellot@institutoptique.fr
Tél. : +33 (0)1 64 53 31 82

Directeur de publication

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

Rédaction

Rédacteur en chef
Nicolas Bonod
nicolas.bonod@edpsciences.org

Journal Manager
Florence Anglézio
florence.anglezio@edpsciences.org

Secrétariat et mise en page
Studio wake up!
<https://studiowakeup.com>

Comité de rédaction

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

Publicité

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

International Advertising

Bernadette Dufour
Cell phone + 33 7 87 57 07 59
bernadette.dufour@edpsciences.org

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

Gestion des abonnements

abonnements@edpsciences.org

Impression

Fabrique imprimeur
B.P. 10
87500 Saint-Yrieix la Perche
Dépôt légal : Décembre 2020
Route : STAMP (95)



Éditorial



NICOLAS BONOD

Rédacteur en chef

Le Rayonnement Thermique : chaude actualité sur un sujet brûlant

La publication de ce dossier sur le rayonnement thermique trouve une résonance particulière avec l'actualité, à l'heure où la détection des températures corporelles contribue à lutter contre la propagation de l'épidémie, et où la découverte d'un trou noir massif au centre de notre galaxie, due en grande partie aux progrès réalisés en imagerie infrarouge, vient d'être récompensée par le prix Nobel de physique 2020.

L'émission thermique est un domaine de recherche passionnant mais très exigeant et dont les nombreuses applications ont motivé le développement de nombreuses filières de la photonique. Car détecter le rayonnement thermique, c'est détecter un signal couvrant tout le spectre de fréquence puisqu'émis par les sources les plus chaudes, les étoiles, comme les plus froides, le fond cosmique, et que les températures ordinaires voient leur spectre centré dans l'infrarouge moyen. Kirchhoff fit preuve d'une incroyable perspicacité en formulant en 1860 sa fameuse loi qui établit l'égalité entre l'émissivité d'un corps et son absorptivité pour une fréquence, polarisation et incidence donnés. Bien qu'énoncée avant la formulation des équations de Maxwell et de la loi de Planck, cette loi qui établit le pont entre thermodynamique et optique ondulatoire n'a depuis jamais été mise en défaut, ni son domaine d'application cessé de s'étendre. Vous découvrirez dans l'article Comprendre les fondements

de cette loi dont la simplicité de son énoncé n'a d'égale que sa richesse en termes de compréhension et d'application. Ce lien entre émissivité et absorptivité ouvre d'ailleurs des domaines de recherche passionnants dans le domaine de l'énergie : comment refroidir une surface ou un bâtiment sans apport d'énergie ? Comment convertir en électricité ce rayonnement thermique omniprésent ? Chacune de ces questions fera l'objet d'un article dédié dans ce dossier. L'optimisation de l'absorption du rayonnement dans des domaines spectraux spécifiques s'appuie d'ailleurs souvent sur les nano et micro structurations. Or, la mesure du rayonnement thermique émis par des nanostructures plasmoniques individuelles soulève de nombreux défis et vous découvrirez les avancées les plus récentes sur ce domaine. Changement d'échelle en passant des nanostructures plasmoniques aux objets célestes. Le rayonnement thermique est la meilleure source d'information en astrophysique, mais son spectre extrêmement large, du visible aux micro-ondes, et la faiblesse de son signal ont contraint l'instrumentation optique à repousser ses limites. Vous découvrirez aussi dans ce numéro les actualités de nos partenaires qui contribuent au rayonnement de la photonique et de ses acteurs, ainsi que des témoignages et entretiens dont l'un est consacré aux grands défis de la photonique. Je vous souhaite une bonne lecture !

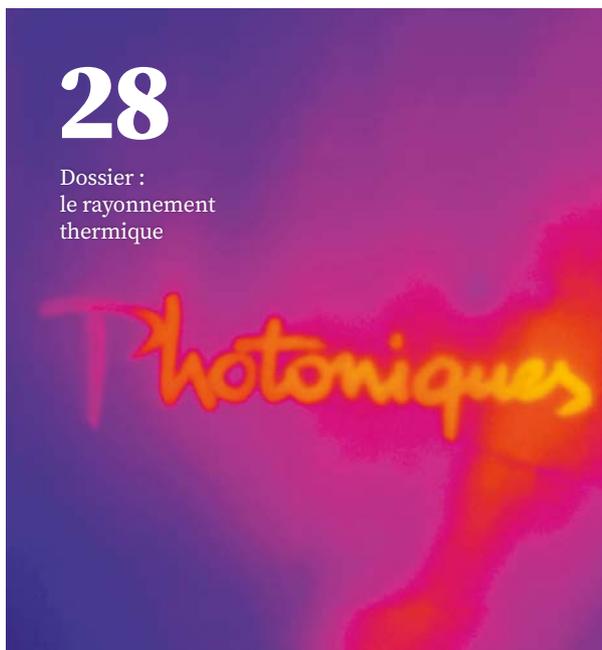


Sommaire

www.photoniques.com

N° 105

14 **TÉMOIGNAGES**
Témoignage d'entrepreneur,
interview de Philippe Métivier



50

Acheter
une caméra
infrarouge



ACTUALITÉS

- 03 Éditorial et actualités de la SFO
- 04 Informations partenaires

TÉMOIGNAGES

- 15 Interview de Philippe Métivier
- 16 Témoignage d'entrepreneur

FOCUS

- 17 La Photonique en Suisse

BIOGRAPHIE

- 22 Caroline Émilie « Lili » Bleeker

EXPÉRIENCE MARQUANTE

- 25 Premières mesures photométriques :
de Léonard de Vinci à Pierre Bouguer

DOSSIER : RAYONNEMENT THERMIQUE

- 28 Refroidissement radiatif diurne
par revêtement de fibres de silice
- 32 Rayonnement thermique infrarouge
de nano-antennes plasmoniques individuelles
- 37 Thermophotovoltaïque : des cellules PV
pour convertir le rayonnement thermique
- 41 Le rayonnement thermique en astrophysique

COMPRENDRE

- 46 La loi de Kirchhoff

ACHETER

- 50 Une caméra infrarouge

PRODUITS

- 53 Nouveautés

Annonceurs

Aérotech	49	EPIC	07
Ardop	35	GMP SA	21
Edmund Optics	03	Imagine Optic	27
		Laser components	45
		Menhir Photonics	21

Opton laser International ..	IV° de couv
Photonics France	12
Sercalo Microtechnology ltd	20
SFO	11
Spectrogon	33

Zurich Instruments

II° de couv

Crédit photo (couverture):
© iStockPhoto & Isabelle Ribet

L'édito de la SFO



PHILIPPE ADAM

Président de la SFO

Bonjour à toutes et tous !

Traditionnellement la fin d'année est l'heure du bilan ; l'année qui vient de s'écouler a été... spectaculaire !

Je ne reviendrai pas sur les conditions difficiles de l'exercice 2020. Je retiendrai par contre quelques lignes de force qui se sont clairement dessinées et qui nous ont permis de vivre presque normalement notre vie de Société Savante.

Malgré ces temps délicats, la SFO bénéficie d'un engagement permanent de tous ses membres. Des initiatives ont continué de fleurir. Un exemple parmi d'autres : la création d'un nouveau club, le club LIDAR. Cette initiative portée par Nicolas CEZARD, décrit bien votre investissement personnel et permet par la même d'assurer la pérennité de la SFO, de ses actions et de son rayonnement.

De fait, la voilure « événementiel en présentiel » a été réduite. La SFO s'est néanmoins mise en ordre de marche pour assurer des événements ONLINE. En témoigne l'organisation de la journée thématique « OPTIQUES FREEFORM » du club Calcul Optique organisée par la SFO avec la participation de l'IOGS et de l'association (FO-RS). Notre contribution s'adapte aux nouvelles exigences : la crise ne doit pas empêcher de penser positivement à l'avenir et c'est un rôle auquel la SFO tient particulièrement.

L'union fait la force : notre communauté a réagi à la situation présente par un resserrement significatif des liens avec l'ensemble des interlocuteurs structurels de notre communauté : EOS, ICO, OSA, Photonique France. Des structures nouvelles de « lobbying » au niveau national sont apparues, pour tenter de favoriser et valoriser la recherche fondamentale. Objectifs : montrer que la Science a des arguments dans les débats courants, que ses méthodes sont valides et robustes. Il faut impérativement préparer le futur.

Dans un avenir proche, la situation héritée de 2020 va laisser des traces : les gommer demande l'ouverture de chantiers prioritaires :

- Assurer notre résilience économique : la respiration « naturelle » de la SFO sur deux années, a été quelque peu bouleversée. Reprendre notre souffle rapidement et sans séquelle sera une priorité.
- Assurer la réussite pleine et entière de la composante « événementiel » de notre activité. Les échéances sont claires et les moyens montent en puissance.

Fort de votre engagement pour la SFO, encore démontré par votre participation à l'AG du 22 octobre, nous serons tous sur le pont pour faire de 2021 une belle et fructueuse année.

Optiquement vôtre
Philippe ADAM

L'OPTIQUE EST NOTRE AVENIR™



Séparateurs de faisceaux par Edmund Optics®

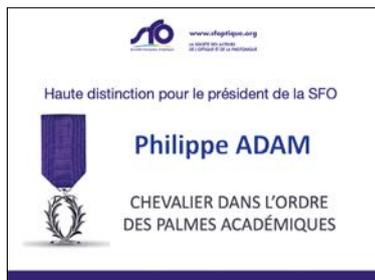
- Large gamme de longueurs d'ondes allant de 250 nm à 8 µm
- Grande variété de formes, de tailles et de rapports de division
 - Options de polarisation avec des rapports d'extinction allant jusqu'à 10 000:1
- Vaste inventaire de pièces standard disponibles pour une livraison rapide.

Edmund Optics® fabrique et fournit des séparateurs de faisceau standard et personnalisés pour une large gamme d'applications.

Pour en savoir plus :

www.edmundoptics.fr/
beamsplitters

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



Le Prix Fabry-De Gramont

Suite à la réunion de délibération, les membres du jury ont attribué le prix à deux talentueux chercheurs :

Frédéric Gérôme (XLIM), lauréat 2019, pour ses travaux autour de la photonique des gaz : de la conception des fibres creuses à la photonique des plasmas. Bertrand Kibler (ICB), lauréat 2020, pour ses travaux dans le domaine des ondes non-linéaires, notamment l'observation des ondes de respiration (breathers) et de leurs interactions, en tirant profit des technologies modernes de l'optique ultrarapide aux longueurs d'ondes télécoms.

AGENDA



CONGRÈS DE LA SFO
www.sfoptique.org

05 / 09 juillet 2021
OPTIQUE
DIJON 2021

■ **OPTIQUE Dijon 2021,**
5 au 9 juillet 2021
Palais des congrès de Dijon
avec la participation de
Gérard MOUROU,
prix Nobel de Physique 2018
Inscription au congrès
Réservation des stands
Bénéficiez du Tarif EarlyBird
Jusqu'au mois de Mars.

■ **École thématique 2021**
Les Houches, 25 - 30 avril 2021
All-optical interrogation of
neuronal networks in vivo
Campagne de soumission ouverte

**Tous les événements
de l'agenda SFO :**
www.sfoptique.org/agenda/

FAIRE-PART DE NAISSANCE : Club Lidar

UN NOUVEAU CLUB LIDAR À LA SFO

La SFO a le plaisir de vous annoncer la naissance de son « *petit vingtième* » ! Un nouveau Club Lidar est en effet venu récemment agrandir la famille des clubs thématiques animés au sein de notre société. Créé à l'initiative de chercheurs de l'Onera, et avec le soutien initial de plusieurs laboratoires (LATMOS, CNRM, LSCE, LMD, ILM, LPCA), ce nouveau club vise tout d'abord à rassembler, au sein de ce nouvel espace d'échange, la communauté scientifique nationale impliquée dans des activités de développement et d'exploitation des systèmes lidars. À ce titre, le club est bien entendu appelé à grandir : n'hésitez pas à nous contacter⁽¹⁾ si vous souhaitez vous en rapprocher.

Les missions du club seront notamment :

- **Promouvoir** les activités scientifiques et techniques de la communauté, à travers les canaux d'information de la SFO
- **Organiser** des journées scientifiques nationales ou des sessions de colloques focalisées sur les systèmes Lidars
- **Contribuer** à la formation des jeunes chercheurs dans ce domaine, *via* la tenue de formations, la création de contenus pédagogiques, et pourquoi pas, *via* la réactivation d'une école d'été dédiée (telle qu'il a pu en exister occasionnellement entre 2010 et 2015).

Forte d'un écosystème très riche, la communauté Lidar française est particulièrement active et innovante. A l'heure où la pandémie de Covid rend difficiles les déplacements en France (et plus encore à l'international), à l'heure aussi où la recherche, de plus en plus, se conçoit à l'échelle européenne, il semble plus que jamais faire sens de resserrer les liens scientifiques nationaux. Gageons que ce nouveau Club Lidar permettra, à l'instar des autres clubs SFO, d'œuvrer en ce sens !

⁽¹⁾ Contact : Nicolas CEZARD sfo.info@institutoptique.fr

En savoir plus : <https://www.sfoptique.org/pages/les-clubs-sfo/club-lidar.html>

RETOUR SUR L'ASSEMBLÉE GÉNÉRALE DIGITALE

15 OCTOBRE 2020

L'Assemblée générale de la Société Française d'Optique s'est tenue le 15 octobre 2020 à 10h00 exclusivement en mode digital *via* l'application Zoom.

Le rapport moral et le rapport financier de l'année 2019 présentés respectivement par le Président Philippe ADAM et par le trésorier Mehdi ALOUINI ont été approuvés.

Nous remercions vivement tous les membres qui ont assisté à ce temps fort de notre association. La version digitale de cette assemblée générale a permis une grande participation des membres éloignés géographiquement et a eu une bonne représentativité sur tout le territoire Français.

Nous remercions également tous les membres qui ont contribué à rendre vivante cette assemblée générale par leurs questions sur le tchat et par la prise de parole.

Fort de cette expérience digitale, la SFO lance sa première journée ONLINE avec la journée thématique du club calcul optique. Nous revenons vers vous très prochainement pour vous annoncer la programmation de futures conférences digitales.

Formation continue à l'Institut d'Optique : des stages de haut niveau accessibles à tous

Proposer des stages de formation continue liés à l'optique et la photonique est l'une des missions majeures de l'Institut d'Optique Graduate School (IOGS) depuis sa création en 1917.

La formation continue s'appuie sur ce qui fait le succès de SupOptique, son école d'ingénieur : des enseignements théoriques de haut niveau, complétés par des travaux pratiques sur plus de 100 montages expérimentaux illustrant la photonique, des « fondamentaux » jusqu'à la pointe de la technologie. Le panel de formateurs inclut des enseignants chercheurs de SupOptique et des industriels reconnus du domaine. Tous ont à cœur de rendre les formations accessibles à tous les publics (ingénieurs, techniciens, techniciens supérieurs, technico-commerciaux ou chercheurs), en présentant les notions de façon pragmatique et en multipliant les exemples concrets. Les enquêtes de satisfaction menées montrent que 99 % des clients sont satisfaits ou très satisfaits du stage suivi.

À ce jour, 44 stages sont proposés au catalogue, allant des bases de l'optique à la conception optique avancée, en passant par la radiométrie, la métrologie, les lasers, les fibres optiques, l'optoélectronique, les systèmes optroniques

et l'infrarouge. Chaque année, cette offre est renouvelée et étoffée par de nouveaux stages, tels que *l'optique et le développement durable*, *les détecteurs pour l'instrumentation*, *le speckle* ou encore *l'optique adaptative* en 2021. Il est également possible de demander des stages sur mesure, associant les notions abordées dans différents stages ou adressant au contraire de nouvelles thématiques.

En bref :

Thierry Midavaine est responsable de la formation continue depuis le 1^{er} octobre. Fin connaisseur des enjeux de la photonique en entreprises industrielles, il mettra également à profit son expérience d'enseignant en écoles d'ingénieurs dans ses nouvelles fonctions. Pour lui, « l'enjeu de la formation continue est de poursuivre la transmission des savoir-faire industriels vers des publics qui doivent se former tout au long de leur vie professionnelle. L'apport de compétences en optique et en photonique constitue une source d'innovations importantes pour tous les ingénieurs, quel que soit leur domaine d'origine. »

AGENDA DE LA FORMATION CONTINUE

■ **Mise en œuvre d'un imageur (base)**
03 au 05 mars 2021

■ **Métrologie visuelle (base)**
08 et 9 mars 2021

■ **Méthode de fabrication et contrôle de systèmes optiques (spécialisation)**
10 mars au 12 mars 2021

■ **Bases de l'optique (base)**
16 au 19 mars
et 30 mars au 02 avril 2021

■ **Mesures de front d'onde (perfectionnement)**
22 et 23 mars 2021

■ **Systèmes optiques d'imagerie (perfectionnement)**
24 au 26 mars
et 07 au 09 avril 2021

■ **Colorimétrie (base/perfectionnement)**
01 au 02 Avril 2021

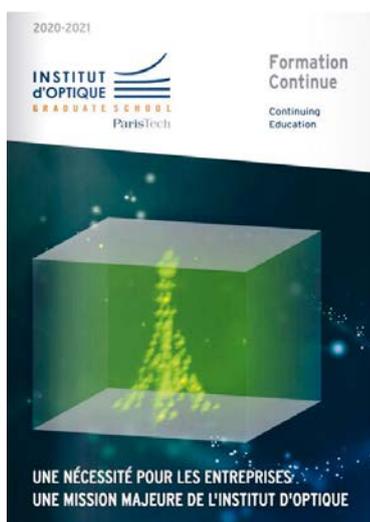
■ **Vision industrielle (base/perfectionnement)**
06 au 08 Avril
et 14 au 16 Avril 2021

■ **Optique et développement durable (nouvelle formation/base)**
12 au 13 Avril 2021

■ **Infrarouge thermique : principes (base/perfectionnement)**
04 au 07 Mai 2021

Plus d'informations :
<https://fc.institutoptique.fr/web/iofc/3-le-catalogue.php>

Ou par mail : fc@institutoptique.fr



44 stages
au catalogue



> 100 montages
expérimentaux



99 % de
satisfaction

VOUS VOULEZ CONTACTER
L'INSTITUT D'OPTIQUE ?
Kenza.Cherkaoui@institutoptique.fr
www.institutoptique.fr

La plus large association de l'industrie photonique au monde !

A lors que certaines organisations et associations industrielles sont aux prises avec ces temps de mobilité réduite, EPIC - European Photonics Industry Consortium - est en plein essor. Le passage des réunions de réseautage physiques vers le monde des rencontres virtuelles a été un excellent périple et le travail acharné d'EPIC est reconnu par le nombre grandissant des nouveaux membres, faisant ainsi d'EPIC la plus grande association de l'industrie photonique au monde ! L'année 2020 approche de sa fin, récapitulons alors quelques-uns des services exceptionnels qu'EPIC a su fournir à ses membres.

Commençons par les réunions technologiques en ligne d'EPIC, un concept de meetings virtuels qui rassemble toute la chaîne d'approvisionnement sur des sujets spécifiques dans tous les domaines où la photonique est essentielle, comme la communication optique, les appareils médicaux, l'automobile, l'agriculture et l'alimentation, les technologies quantiques, les applications laser, etc. Ils offrent une plate-forme permettant aux utilisateurs finaux de partager leurs défis et leurs souhaits concernant les développements futurs, et aux fournisseurs et intégrateurs des systèmes photoniques de présenter leurs capacités à répondre à ces demandes. Il s'agit d'un concept véritablement unique qui offre des opportunités commerciales et une grande visibilité aux participants, puisque ces réunions sont diffusées en direct sur YouTube et visualisées par la suite à plusieurs reprises.

« La réunion technologique en ligne d'EPIC sur les micro-lumineux pour l'éclairage automobile a été formidable, peut-être le meilleur format que j'ai vu jusqu'à présent. Les résultats de la réunion ont déjà commencé à se faire sentir. Gardez cet esprit ! » dit Lennart Brunnberg, PDG de Derema Group, en décrivant agréablement la force d'EPIC et les nombreux avantages offerts à ses membres.

Le succès des réunions technologiques en ligne d'EPIC a également inspiré EPIC à explorer d'autres formes de communications numériques. Début septembre, EPIC a lancé plusieurs services



nouveaux. Entre autres, le lancement des produits innovants « EPIC Members Product Release & Launch » qui fournira aux membres de EPIC une plateforme virtuelle pour partager leurs derniers développements technologiques avec le reste du monde. On a aussi lancé www.mentors-in-photonics.com, un site web qui permettra aux membres d'EPIC à la recherche de nouvelles applications ou qui souhaitent étendre leurs territoires, de retrouver des mentors et leaders inspirants dans le domaine de la photonique qui sont prêts à partager leurs expertises et leur savoir-faire. Il s'agit d'une plateforme unique pour se connecter et apprendre des meilleurs experts de l'industrie. On a également lancé « EPIC Virtual Company Tour » qui offre une visite virtuelle de l'entreprise. Ces visites seront diffusées en direct sur YouTube, donnant ainsi une meilleure visibilité et un excellent moyen aux membres pour se faire connaître, étendre le réseau industriel et leur faciliter les collaborations. Ces nouveaux services viennent compléter les services qu'EPIC fournit déjà en exclusivité à ses membres. Par exemple, l'accès aux rapports de marché récemment publiés tels que « 2020 Quantum Technologies : Technology, Industry and Market Trends » ou « Global Sapphire Glass Market by Segments, Application and Geographic Landscape - Forecast and Analysis 2020-2024 ». Tous ces rapports sont accessibles gratuitement à toute personne travaillant pour une entreprise membre d'EPIC. On met également nos membres en contact avec plus d'utilisateurs finaux et des partenaires potentiels grâce à la signature des protocoles d'accord avec d'autres associations et réseaux industriels pertinents. Cette année, EPIC a signé des protocoles d'accord avec, entre autres, « Driving Vision news DVN

(Réseau mondial d'éclairage et ADAS pour les constructeurs automobiles), AIPH (Association internationale des producteurs horticoles) et IUVA (Association internationale de l'ultraviolet).

Parmi les autres activités, on cite les interviews de PDG/CTO avec les entreprises membres, les partenariats avec les médias et les partenaires d'événements et d'autres activités que nous organisons pour promouvoir la photonique. Sans oublier que EPIC met en permanence les offres d'emploi sur le site web d'emploi et carrière en photonique : www.jobs-in-photonics.com. EPIC est au service de la communauté de la photonique, alors si vous êtes membre : assurez-vous de bien profiter de tous les avantages et services que EPIC vous offre, et si vous ne l'êtes pas, demandez-vous pourquoi vous ne voudriez pas rejoindre la plus large association industrielle du monde.

PROCHAINES RÉUNIONS EN LIGNE D'EPIC SUR LES TECHNOLOGIES

Les manifestations d'EPIC sont réputées pour l'excellence de leur mise en réseau, la création de nouveaux liens professionnels et le renforcement des liens existants. Mettre en relation les membres de EPIC signifie établir la confiance au sein de l'industrie de la photonique en Europe.

■ **EPIC Online Technology Meeting on Exploring Emerging Applications for Photonic Integrated Circuits**
 11 January 2021

■ **EPIC Online Technology Meeting on Growing Needs for Ultrafast, High Power Laser Applications**
 13 January 2021

■ **EPIC Online Technology Meeting on Market Expectations for Specialty Fiber and Fiber Sensors Applications**
 18 January 2021

Découvrez les prochains événements EPIC sur :
www.epic-assoc.com/epic-events

EPIC Mentors in Photonics

Connect with over 100 industry leaders on this new and unique platform for EPIC members who want to explore uncharted territories or expand to new markets and applications.



www.mentors-in-photonics.com

EPIC is the leading industry association that promotes the sustainable development of organizations working in the field of photonics. EPIC fosters a vibrant photonics ecosystem by maintaining a strong network and acting as a catalyst and facilitator for technological and commercial advancement. EPIC publishes market and technology reports, organizes technical meetings and B2B roundtables, supports EU funding proposals, advocacy and lobbying, education and training activities, standards and roadmaps, and pavilions at exhibitions.

AGENDA

■ **MorningTech
Photonique & Santé,
2 février 2021, en ligne**

■ **Photonics +,
Virtual Exhibition
and Conference (EPIC),
17-18 février 2021,
en ligne**

■ **Photonics West,
6-11 mars 2021,
San Francisco, États-Unis**



De nouveaux projets pour Alain Chardon, après 6 ans au sein de Photonics Bretagne

Après un peu plus de 6 années à œuvrer au développement de la filière photonique au sein de Photonics Bretagne, Alain Chardon s'oriente vers de nouveaux challenges professionnels en tant que Business Developer au sein de l'un de nos adhérents bretons, Le Verre Fluoré.

Ses principales activités à Photonics Bretagne en tant que référent des adhérents, à savoir la mise en relation et l'accompagnement, sont désormais reprises par Denis Tregoat qui pilotera également notre collaboration avec le Pôle Images & Réseaux.

N'hésitez pas à le contacter.

De l'espace aux fonds sous-marins, il n'y a qu'un pas pour les systèmes de navigation inertielle d'iXblue



iXblue, a participé au développement du système de navigation inertielle pour KASSAV 1 (Kit Autonome de Sécurité pour la SAuvergarde en Vol), système de sécurité autonome conçu pour augmenter les performances du système actuel de localisation en vol des fusées européennes lancées depuis le port spatial européen en Guyane française. S'appuyant sur une technologie hybride, KASSAV 1 utilise la fusion de données de l'unité de mesure inertielle (IMU) conçue par iXblue et basée sur la technologie du gyroscope à fibre optique et un capteur GNSS.

Le système a été mis en service avec succès pour la première fois lors du lancement d'Ariane 5 le 15 août 2020. Il a permis au CNES de suivre de manière autonome et très précise le lanceur à tout moment. D'autre part, iXblue et ECA GROUP renforcent leur partenariat et signent un contrat pour la navigation, les systèmes de positionnement sous-marin et les sonars d'évitement d'obstacles pour le programme de remplacement de Mine CounterMeasures pour les marines belge et royale néerlandaise. iXblue fournira des sonars prospectifs (FLS) ainsi que des systèmes de navigation inertielle et de positionnement et de communication sous-marine.

CRISTALENS LAURÉAT DU PROGRAMME EUROPÉEN H2020!

Cristalens Industrie – PME française, implantée à Lannion, spécialisée dans les implants intraoculaires pour la chirurgie de la cataracte et réfractive – a été sélectionnée par la Commission Européenne dans le cadre du Concours d'appel à projets « HORIZON 2020 ». Ce soutien financier de 1,6 M€ permettra de financer sa stratégie d'expansion internationale bâtie autour de sa dernière innovation : Artis Symbiose®. Cet implant, par sa technologie « Binocularité & Continuité de phase », est conçu pour offrir aux patients opérés de la cataracte une vision binoculaire nette et continue de 40 à 90 cm et sans compromis sur la vision de loin. Malgré le contexte, les retombées économiques et sociales s'annoncent d'importance au niveau local, national et international.

Cailabs obtient le label « utilisé par les armées françaises » pour son produit AROONA

Cailabs, entreprise française deep tech qui conçoit, fabrique et vend des solutions photoniques, vient d'obtenir la labellisation UAF (« Utilisé par les Armées Françaises ») décernée par le ministère des Armées, pour sa solution innovante AROONA. C'est dans un contexte de modernisation des systèmes de communications et suite à un travail avec la DIRISI1 (Direction interarmées des réseaux d'infrastructure et des systèmes d'informations de la défense) pour la mise à niveau d'infrastructures de câblage optique multimode de sites militaires français, que la solution AROONA a pu obtenir la labellisation UAF. AROONA renforce ainsi sa position de référent sur le marché du câblage structuré des réseaux locaux, ce qui devrait favoriser un accès à de nouveaux marchés civils et militaires tant en France qu'à l'international.

Optitec renforce sa Direction



Christophe Camperi-Ginestet a rejoint l'équipe du pôle au poste de Directeur Général Adjoint – Opérations. Titulaire d'un doctorat en optoélectronique obtenu à Georgia Tech (USA) et ingénieur en physique des matériaux, Christophe a débuté sa carrière au sein d'un grand groupe américain dans le secteur du développement et transfert de technologie. Il s'est ensuite lancé dans l'entrepreneuriat avec la création de start-ups dans la Tech avec un développement de filiales à l'international. Christophe a rejoint Optitec pour renforcer & développer les opérations au sein du

pôle en coordonnant l'aspect technique et business.

Contact : Christophe Camperi-Ginestet – christophe.camperi@pole-optitec.com

Retour sur la journée

« Accélérez votre Business vers l'industrie 4.0 : L'alliance du digital et de la photonique »

Le 17 septembre dernier, s'est tenue l'Assemblée Générale Optitec puis notre événement réseau « Accélérez votre Business vers l'industrie 4.0 : L'alliance du digital et de la photonique », qui a rassemblé une cinquantaine de membres.



Nous avons pu lors de cette rencontre, bénéficier de l'intervention de François-Xavier de Thieulloy, Référent Expert Industrie du Futur - Bpifrance, qui nous a présenté les nouveaux usages et business models dans l'industrie : comment passer du fordisme à la facturation à l'usage, ainsi que de l'intervention de Morgane Rivière, Research Engineer chez Facebook sur la digitalisation de l'industrie et plus particulièrement sur le « machine learning » : « L'intelligence artificielle n'est pas encore prête à remplacer le cerveau. Un algorithme, une tâche, c'est une agrégation de données statistiques ». Les activités des entreprises Videtics, SYMETRIE et i2S • Innovative Imaging Solutions ont pu être présentés à l'ensemble des participants. Et, plus de 80 rendez-vous business qualifiés ont eu lieu.



AGENDA

■ Salon Milipol Qatar

15 au 17 mars 2021, Doha, Qatar

Milipol Qatar est l'événement international de la sûreté et de la sécurité intérieure des États au Moyen-Orient.

Contact : Regina Zainetdinova
regina.zainetdinova@pole-optitec.com

■ Salon du Bourget

Du 21 au 27 juin 2021, Paris

Le Salon international de l'aéronautique et de l'espace de Paris-Le Bourget est une des plus importantes manifestations internationales de présentation de matériels aéronautiques et spatiaux

Contact : Regina Zainetdinova
regina.zainetdinova@pole-optitec.com

■ Salon Vision

05 au 07 octobre 2021, Stuttgart, Allemagne

Organisé tous les deux ans à Stuttgart, le Salon Vision est considéré comme le salon mondial pour le traitement d'images.

Contact : Regina Zainetdinova
regina.zainetdinova@pole-optitec.com

NOUVEAUX ADHERENTS

En 2020, le réseau s'est agrandi avec 27 nouvelles entreprises innovantes :

3DECOUVERTE,
4G TECHNOLOGY,
ABELIO, ACTI, ASCLEPIOS TECH SAS, ATEM, BODYO,
CLARTEIS, DIODON DRONE TECHNOLOGY, E-VISIO BLOC, ERGONOMIE DENTAIRE, EXTREM'VISION, HOASYS, IMASOLIA, INNOWTECH, INRAE, NEWTECH SCIENTIFIC, MIRSENSE, ODESYSO, OPENINDUS, SOLNIL, SOPRO ACTEON, TACHYSSEMA DEVELOPPEMENT, TECHNEXT, THE VIRTUAL PROPAGANDERS, VIDETICS, VORTEX IO.

Partenariat avec le cluster grec HPhos



Le 28 mai 2020, le pôle ALPHA-RLH a signé un accord de partenariat avec le cluster photonique grec HPhos (Hellenic Photonics Cluster) basé à Athènes. HPhos rassemble des entreprises innovantes et des instituts de recherche qui fournissent des technologies photoniques pour la fabrication industrielle et l'automatisation, les télécommunications, la défense et la sécurité, l'alimentation, la santé, l'environnement et l'efficacité énergétique...

Le partenariat est basé sur les domaines d'activité des deux pôles (la photonique, l'électronique et leurs applications) dans le but de mettre en place des actions communes, afin d'améliorer la compétitivité des produits et services de leurs membres en favorisant et en encourageant l'innovation collaborative.

AGENDA

■ **European Microwave Week (EuMW)**
10 au 15 janvier 2021
en digital

■ **Webinaire "IoT et cybersécurité (industrie et bâtiment)"**
28 janvier 2021

Plus d'informations sur :
www.alpha-rlh.com

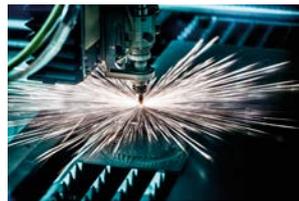
INPHO® Venture Summit 2020 au service des entrepreneurs

Pour sa 7^{ème} édition, INPHO® Venture Summit, organisé par ALPHA-RLH, a placé la deep tech au cœur du nouveau monde virtuel imposé par la pandémie COVID-19. Malgré ces contraintes, ce fut un réel succès. Avec 350 participants venus des USA, d'Europe et d'Asie pour se réunir les jeudis et vendredis d'octobre, INPHO 2020 se résume à ces chiffres clés : 18 keynotes speakers (Ericsson, Mayo Clinic, AP-HP, Hyundai Motor, Orange Silicon Valley, Sony, Airbus, Bosch, Trumpf, Schneider Electrics...), des pitches de 27 investisseurs (fonds sous gestion supérieurs à 100 millions €) et de 22 start-ups sélectionnées pour plus de 145 M€ recherchés.

L'évènement a été conçu par les investisseurs. Le discours de bienvenue de Geoffrey Moore, expert et auteur de renommée mondiale, donne le ton en définissant les différentes technologies de rupture. Georges Ugras, Président d'INPHO et Hervé Floch, Directeur Général du pôle ALPHA-RLH, ont remis le prix de la start-up la plus prometteuse et un chèque de 5000 € à NVision Imaging Technologies pour sa technologie d'imagerie moléculaire avec des agents IRM quantiques améliorés.

Toutes les conférences sont disponibles en replay sur www.inpho-ventures.com.

INPHO® 2020 a été soutenu par le CEA/CESTA, la SEML Route des Lasers, la Région Nouvelle-Aquitaine, la Métropole et la Ville de Bordeaux, avec le concours organisationnel de BLUMORPHO.



ÉLABORATION DE LA FEUILLE DE ROUTE DE LA PHOTONIQUE NÉO-AQUITAINE

La Région Nouvelle-Aquitaine, en collaboration avec le pôle ALPHA-RLH et le centre de ressources technologiques ALPhANOV, a lancé en juillet 2020 la construction d'une feuille de route régionale sur la photonique – Horizon 2025. Il s'agit de définir les orientations stratégiques, les objectifs et les moyens à déployer sur les 5 ans à venir, afin de renforcer et d'amplifier le rôle de leader de la Nouvelle-Aquitaine sur cette filière technologique.

Les axes technologiques de la feuille de route néo-aquitaine sont élaborés en lien étroit avec ceux de la feuille de route photonique nationale établie par Photonics France en 2018. Après la remontée d'idées et de suggestions d'amélioration *via* un questionnaire, les acteurs régionaux de la photonique (entreprises, laboratoires, universités, institutionnels...) ont pu participer, le 9 octobre dernier, à 3 ateliers de réflexion afin d'apporter leur contribution concernant les marchés d'application, les technologies clés, les ressources humaines/la formation.

La concertation va se poursuivre dans les prochains mois avec des réunions de travail sur des thèmes spécifiques. Les propositions d'actions qui en découleront seront intégrées à la feuille de route qui sera présentée aux élus régionaux avant d'être officiellement lancée avant la fin 2021.

Conférences BIPSA dans le cadre de ViV HealthTech



La première édition de ViV HealthTech s'est déroulée en ligne les 9 et 10 novembre 2020.

Elle a rassemblé plus de 700 participants afin de dresser un panorama des évolutions et innovations dans la filière Santé autour d'un programme de 44 conférences, tables rondes et ateliers.

Dans le cadre du réseau BIPSA (Bio-Imagerie Photonique et Santé en nouvelle-Aquitaine) qui réu-

nit des acteurs académiques et industriels néo-aquitains du monde de l'imagerie biologique et biomédicale, le pôle ALPHA-RLH a proposé une table ronde et cinq conférences qui ont généré 100 connexions.

La table ronde dédiée à l'imagerie cellulaire, organisée en collaboration avec le Bordeaux Imaging Center (BIC) de l'Université de Bordeaux, a abordé le thème du e-training ainsi que les derniers développements et applications en matière de microscopie à feuille de lumière (illumination sélective d'une fine tranche de l'échantillon à analyser).

Les conférences ont mis en avant les technologies de la simulation numérique, de la théranostique (utilisation de l'imagerie pour cartographier les cellules pathogènes dans le corps et les traiter de manière ciblée), de l'intelligence artificielle et de l'imagerie optique pour lutter notamment contre le cancer, les accidents cardiovasculaires ou la cécité, avec des interventions de membres du pôle comme Imagine Optic, Nurea, DESKi et le CHU de Bordeaux.

En parallèle, des rendez-vous B to B ont permis aux entreprises de présenter leurs solutions et technologies aux professionnels de santé, donneurs d'ordres industriels et investisseurs.

Retour sur la 7^{ème} Conférence européenne des clusters 2020

Cet évènement phare de la Commission européenne organisé en ligne les 10 et 11 novembre a rassemblé 1000 participants de 52 pays, dont le pôle ALPHA-RLH, pour débattre et construire l'avenir de la politique des clusters en Europe.

Au programme : conférences, ateliers et sessions de matchmaking.

À cette occasion, Hervé Floch, Président de la Commission Europe de l'Association Française des Pôles de Compétitivité (AFPC), a annoncé la création prochaine de l'association (AISBL) EUCLÉS, European Clusters Labelling Excellence Structure, qui s'est concrétisée par la signature d'un protocole d'entente par 12 représentations nationales de clusters.



© studiowakeup.com

CONGRÈS
DE LA **OPTIQUE**
Société Française d'Optique

05 / 09 juillet 2021

OPTIQUE
DIJON 2021

VENEZ À DIJON
www.sfoptique.org
rubrique congrès OPTIQUE



Save the Date pour notre Photonics Online Meetings #3 - 11 mai

"Après le succès de nos deux premières éditions avec chaque fois plus de 250 participants (dont 25% internationaux), save the date pour nos Photonics Online Meetings #3, le 11 mai 2021 !

Avec une dimension internationale plus marquée, ce 3ème volet permettra un réseautage encore plus important avec notamment le soutien de nombreuses associations européennes parmi lesquelles : AEIT-CORIFI, Photonics Austria, Photonics Netherlands, Photonics Sweden, Optonique, Litek, Spectaris, OpTecNet, Photonics Hub GmbH et OptecBB.

Mais les « POM » qu'est-ce que c'est ?

Une journée de rendez-vous d'affaires d'envergure européenne, entre donneurs d'ordres et fournisseurs de la filière photonique complétée de webinaires produits et services.

En visio ; une moyenne de 10 RDVs One2One de 20 minutes entre donneurs d'ordres et fournisseurs de technologies et de services ; vos équipes mobilisables toute la journée selon les RDV ; des démonstrations/expérimentations/showroom/logiciels en live ; des conférences virtuelles sur une plateforme facile d'accès et intuitive... **et encore bien d'autres nouveautés à découvrir pour cette 3^e édition !**

L'objectif ? Faciliter et soutenir les rencontres dans le contexte actuel incertain en apportant des solutions aux enjeux à venir. L'occasion pour les grands donneurs d'ordres est de parvenir à solutionner des questions business avec les fournisseurs de technologies et de découvrir entre autres les nouvelles tendances de la Photonique.

Qui participe ? Plus de 250 entreprises françaises, européennes et internationales sont attendues : grands donneurs d'ordre, fournisseurs de technologies et de services, investisseurs, institutions, partenaires publics et privés mais également des congressistes.

N'attendez pas, réservez dans votre agenda la journée du 11 mai !

POUR CONTACTER
PHOTONICS FRANCE

Tél. : 01 79 35 56 16
contact@photonics-france.org
www.photonics-france.org

PhotonHub, un réseau d'innovation photonique unique

Photonics France et les pôles adhérents Alpha-RLH, Photonics Bretagne, Minalogic, Optitec et Systematic sont partenaires du projet européen PHOTONHUB (2021 – 2025) qui réunit 53 partenaires européens dont 21 français. L'objectif de Photonhub est de créer un **réseau d'innovation photonique unique** qui intégrera les meilleures technologies, installations, compétences et expériences en matière de photonique. PhotonHub fournira aux entreprises européennes photoniques ou utilisatrices un accès à un éventail de services **via le guichet unique de PhotonHub** :

- Des possibilités de **formation et de perfectionnement** pour l'apprentissage de la photonique, tant au niveau technologique qu'au niveau des applications au sein des 40 centres de formation **partenaires**.
- Des capacités de **soutien à l'innovation** « tester avant d'investir » telles que l'expertise, la conception, le prototypage, l'expérimentation, l'ingénierie et la production pilote.
- Une **aide à la recherche d'investissements** auprès de sources de capital-risque grâce à une gamme complète de supports comme la mise en relation directe ou le soutien à des journées de rencontres comme INPHO.

Photonics France est co-responsable de l'implication des régions européennes avec pour objectif en 2025 que 7 régions de l'UE s'engagent chacune à verser 500 000 euros par an pour le soutien financier de projets d'innovation photonique transfrontaliers et que 5 nouveaux centres locaux d'innovation (EDIH) en photonique soient créés.

Les 5 pôles régionaux partenaires ont pour mission, au sein de chacune de leur région, de créer des centres locaux d'innovation (EDIH) photoniques, d'obtenir un soutien financier fort pour le soutien à l'innovation, et d'assurer avec succès la promotion des services offerts par PHOTONHUB décrits ci-dessus.

La coordination de la réponse des partenaires français associatifs, laboratoires et centres technologiques a été largement reconnue et félicitée par nos homologues partenaires. Cette réussite est née de la volonté de chaque association et acteurs industriels et académiques de la photonique d'avoir une coordination solidaire pour notre filière en créant notamment Photonics France en 2018.

Ce projet est aligné avec le projet de **Photonics21 BestPhorm21 (2021 – 2024)** sur la stratégie de développement de la photonique en Europe dont Photonics France et Photonics Bretagne sont également partenaires.

RENDEZ-VOUS BUSINESS #L'ORÉAL

Échanger, pitcher, collaborer autour de la photonique & de la cosmétique !

Afin de s'adapter à la situation sanitaire tout en continuant à soutenir le développement de nos membres, Photonics France proposera dès janvier un nouveau modèle de Business Meeting hybride : à la fois online et en présentiel !

Cette 1^{ère} édition se fera en collaboration étroite avec L'Oréal. À travers plusieurs étapes, les adhérents de Photonics France pourront se positionner au plus près des besoins du grand groupe afin de répondre à des problématiques spécifiques à la photonique.

À la fin de ce processus composé notamment d'un **appel à intérêts** (15 problématiques ont été répertoriées) puis de **pitchs en visio**, les **entreprises retenues seront conviées à des rendez-vous One to One avec les spécialistes de L'Oréal.**

Réservées à nos adhérents, ces Business Meetings se dérouleront en janvier et février 2021.

Photonics Online Meetings #3

11 mai 2021



Save the date - 11 mai 2021

Une journée en 100% visio d'envergure européenne

Des rendez-vous d'affaires, entre donneurs d'ordres et fournisseurs de la filière photonique. Des conférences de grands donneurs d'ordres et des webinaires produits, ...

Une moyenne de 10 RDV qualifiés pour :

- > Présentez vos compétences à des donneurs d'ordres et partenaires
- > Identifiez des compétences et des solutions technologiques
- > Assistez à des conférences produits/services & experts

250 entreprises et laboratoires européens attendus

Avec le soutien de :



En bref

Photon Innovation Hub : lancement du projet au 1^{er} janvier 2021 !

Le Hub Optics & Photonics de Systematic, ainsi que les autres pôles et clusters de la photonique française, est partie prenante de ce projet qui a pour ambition de générer des collaborations R&D entre plateformes et industriels européens.

FoodPackLab 2 : Innovation & Sécurité agri/agro – Soutien à l'Internationalisation des PME européennes en Inde & Afrique du Sud



Inscrit dans la continuité de la phase une du projet, le soutien aux PME s'organisera notamment autour d'un panel variés de **webinaires thématiques**, de préparation et **formation aux marchés internationaux visés**, de **missions à l'international vers l'Inde et l'Afrique du Sud** ainsi que de nombreuses activités de suivi et d'accompagnement suite aux missions. <https://foodpacklab.eu/>

AGENDA

■ **WHAT'S ON chez STAE, 19 janvier 2021, Savigny-sur-Orge (91)**, de la conception à l'intégration venez visiter leurs nouveaux locaux : 7 000m² au service de vos projets électroniques, mécaniques et optiques.

■ **WHAT'S ON chez Tower Farm, 11 février 2021, Saint-Nom-La-Bretèche (78)**. Spécialistes de l'agriculture indoor pour la culture intensive de plantes comestibles et médicinales, ils conçoivent des systèmes de culture pilotés et contrôlés par plus de 20 paramètres.

■ **WHAT'S ON chez Mihaly, 18 mars 2021, Orsay (91)**, experts en impression 2.5D et de numérisation 3D grand format couleurs haute définition, leur laboratoire de Recherche et Développement, dans le Centre Scientifique d'Orsay, saura répondre à vos défis (art & patrimoine, décoration, produits industriels...).

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

Retour sur les sessions WHAT'S ON ? de juin et juillet

Deux ans après la fusion de Systematic et d'Opticsvalley, le Hub Optics & Photonics a su fédérer la communauté d'Île-de-France. Notre Hub occupe aujourd'hui la place de fer de lance de la photonique française et nos ambitions sont grandes. Le 26 novembre dernier, notre journée annuelle, les Photonics Excellence Days, était sous le signe de l'ouverture et du maillage de la photonique avec les autres Deep Tech et a été présenté, à cette occasion, notre plan de bataille 2021.



En effet, révolutionner nos usages au quotidien, les technologies photoniques le font déjà mais ce que la crise que nous traversons nous a montré, et nous montrera, c'est combien l'excellence industrielle et académique de la France dans ce secteur est un atout clé de notre souveraineté. La photonique doit donc être connue, reconnue et soutenue pour ses atouts et ses capacités, notamment pour les grands enjeux sociétaux (santé et biomédical, énergies renouvelables, agroalimentaire, accès à l'information...). Voilà toute l'ambition du Hub Optics & Photonics !

La Photonique : atout de la réindustrialisation

Malgré une année mettant à mal le secteur événementiel, le Hub a gardé sa ligne conductrice et organisé 10 événements dédiés à l'écosystème afin de renforcer les liens entre les membres (Welcome Sessions, WHAT'S ON, Rencontres d'Affaires PME-GG, Photonics Excellence Days...).

Tous se sont mobilisés et se mobilisent encore afin de soutenir ce dynamisme désormais bien instauré dans le Hub.

Tous se sont mobilisés et se mobilisent encore afin de soutenir ce dynamisme désormais bien instauré dans le Hub.

LES CHIFFRES DE L'ANNÉE :

195 MEMBRES DONT 107 PME, 3 ETI, 25 GRANDS GROUPES, 49 ACADÉMIQUES ET 11 DIVERS (COLLECTIVITÉS, INVESTISSEURS, CABINETS, FÉDÉRATIONS, ASSOCIATIONS...)

13 PROJETS ACCOMPAGNÉS

47 MEMBRES DU COMITÉ DE PILOTAGE, ISSUS DE 32 INDUSTRIELS ET ACADÉMIQUES

10 ÉVÉNEMENTS DÉDIÉS À L'ÉCOSYSTÈME

Le succès des WHAT'S ON lancées en 2020 à la demande de nos membres, favorisant les rencontres et l'exploration des dernières innovations, nous pousse à organiser dès aujourd'hui la programmation 2021 ! 8 nouvelles WHAT'S ON sont déjà en cours de préparation pour l'année prochaine.

<https://systematic-paris-region.org/retour-sur-les-whats-on-2020/>



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

Contactez Lola Courtillat, Coordinatrice du Hub : lola.courtillat@systematic-paris-region.org



Interview de Philippe Métivier

Photoniques s'entretient avec Philippe Métivier, directeur R&D laser au sein du groupe Lumibird, qui a animé la table ronde sur les « Priorités de la filière photonique » lors des dernières French Photonics Days (Perros-Guirec, 17&18 septembre 2020). Cette table ronde a réuni Giorgio Anania (Président d'Aledia et VP de Photonics 21), Eric Bothorel (Député de la 5^e circonscription des Côtes-d'Armor), Benoit Cadier (Directeur iXblue Photonics Lannion), Thierry Georges (Directeur Général d'Oxxius).

Comment améliorer la visibilité, l'attractivité et la notoriété de la photonique auprès des pouvoirs publics ?

Tout d'abord, je vous remercie de me donner l'occasion de rendre compte du regard que les participants à cette table ronde ont pu porter sur la photonique dans la situation si particulière que nous vivons actuellement.

Il est manifeste que la photonique n'est pas assez connue des pouvoirs publics et plus généralement du grand public. Il est donc important de « remettre la science au milieu du village ! » comme le dit Eric Bothorel, député de Lannion, et de montrer tout ce que la photonique peut apporter au quotidien. « Une avalanche d'innovations va s'abattre sur la planète dans les années futures », ainsi que l'a mentionné Giorgio Anania, « et la photonique va faire marcher tout ça ! ». Il faut en parler au grand public en particulier dans les collèges et les lycées et sensibiliser les jeunes aux nouveaux métiers de la photonique.

Comment consolider les nombreuses entreprises innovantes présentes sur le marché et construire des acteurs forts capables d'acquérir une visibilité internationale ?

La photonique étant une technologie transverse, elle est présente dans énormément d'applications et du coup les segments de marchés sont innombrables et souvent individuellement petits. Cela présente l'intérêt de faciliter l'émergence de start-ups qui peuvent assez facilement devenir leader dans leur niche, mais freine aussi l'émergence de grandes entreprises photoniques qui doivent couvrir un grand

nombre de secteurs applicatifs. Il est donc nécessaire de favoriser l'émergence de groupes consolidant ces start-ups dans une logique de verticalisation allant des technologies les plus innovantes aux applications. On peut aussi favoriser l'émergence de start-ups ambitieuses visant des marchés plus importants, que l'industrie européenne a par le passé souvent abandonnées aux pays asiatiques. Aledia avec sa nouvelle technologie micro-LED pour les écrans plats du futur est un bon exemple de cette nouvelle ambition. Ceci nécessite de mobiliser de gros moyens, ce qui représente toujours un vrai challenge dans notre pays.

Comment réduire le temps de transfert entre la recherche et la mise sur le marché de nouveaux produits ?

La rapidité de réponse aux nouveaux besoins est essentielle et il est indispensable de s'appuyer sur la très grande qualité de l'innovation des labos français. Comme le mentionnait Benoit Cadier, « on essaye de raccourcir le temps entre l'idée du labo et la PME, mais on a encore souvent des lourdeurs au niveau des organismes de valorisation ». Eric Bothorel mentionnait que de nouvelles structures favorisant l'échange entre des personnes qui n'étaient pas prédestinées à travailler ensemble (juristes, chercheurs...) commençaient à voir le jour, « l'excitation de ces échanges multiculturels faisant naître de nouveaux projets ». Il est aussi important que les idées innovantes se confrontent le plus vite possible aux besoins des clients, car de cette confrontation naissent les nouveaux produits à succès de demain.

Quelles sont les leçons que la filière photonique tire de la première crise COVID ?

Comme l'a fait remarquer Thierry Georges « la Covid, d'une part, et la guerre commerciale entre la Chine et les États-Unis, d'autre part, aboutissent à la même conclusion : les technologies de base doivent revenir dans notre périmètre accessible, que ce soit en France ou plus largement en Europe... c'est une grosse opportunité dans le domaine de la Photonique ! ». Le plan de relance gouvernemental va dans ce sens et devrait ouvrir de nouvelles opportunités à nos industriels. Nous voyons aussi que les entreprises ont su s'adapter rapidement aux contraintes liées à la pandémie, ceci en particulier grâce aux nouveaux modes de communication. Il est important que notre filière s'appuie sur cette dynamique pour promouvoir de nouvelles façons de coopérer.

Quelles opportunités voyez-vous pour la photonique au lendemain de cette crise ?

On constate que la demande en technologies n'a jamais été aussi importante que durant cette crise. En même temps, il y a une véritable prise de conscience collective de la fragilité de nos écosystèmes et de nos modes de vie. Pour moi, un enjeu majeur de la photonique est de démontrer que cette technologie est au service d'un mieux-vivre et d'un plus grand respect de notre monde. C'est à la fois une opportunité, un challenge et une très grande responsabilité.

Retrouvez l'intégralité de cette table ronde : <https://www.youtube.com/watch?v=Xa4qUUX7n5g>

TÉMOIGNAGES D'ENTREPRENEUR

Dominique Lupinski, Cristal Laser
dominique.lupinski@cristal-laser.fr



Entretien avec Dominique Lupinski, co-fondateur avec Philippe Villeval de Cristal Laser, entreprise basée à Nancy spécialisée dans la production de cristaux pour l'optique non-linéaire.

COMMENT VOUS ÊTES-VOUS LANCÉS DANS L'AVENTURE DE L'ENTREPRENARIAT ET DANS LA CROISSANCE DES CRISTAUX ?

Il y a 33 ans, mon associé Philippe Villeval et moi-même avons rejoint le laboratoire de cristallographie de l'université de Nancy pour réaliser un transfert de technologie, ce qui fut mis en œuvre par la création d'une entreprise : Cristal Laser. Il s'agissait en fait d'une triple rupture technologique : Premièrement, à cette époque, les lasers à gaz commençaient à être remplacés par des lasers à solides. Ensuite, des matériaux cristallins commençaient à peine à être utilisés de façon industrielle comme convertisseurs de fréquence. Enfin, nous avons fait le pari d'industrialiser la méthode dite de « croissance en flux » pour les synthétiser. Pour couronner ce cocktail de la mort (car c'est ainsi que l'a appelé notre banquier), nous avons créé notre propre entreprise.

COMMENT VOUS ÊTES-VOUS POSITIONNÉS SUR LE SECTEUR DE L'OPTIQUE ET DE LA PHOTONIQUE ?

De façon naturelle, les propriétés en optique non-linéaire de nos matériaux (KTP, LBO, RTP, KTA) nous ont destinés au monde de l'optique et de la photonique. Notre objectif était d'emblée de figurer parmi les principaux fabricants au monde. Nous sommes en effet sur un marché de niche très concurrentiel où l'adage : « Gold, Silver, or Out » a tout son sens. Mais le monde de la photonique est lui-même une petite famille dans laquelle nous nous sommes sentis chaleureusement accueillis :

autant par le département optronique de la DGA que par nos clients partenaires. Je me souviens encore de l'encouragement de Jean-Paul Pocholle (Thalès) lorsqu'il m'a dit : « *Donnez-moi les cristaux, je vous fais le laser* ». Bref : sans les cristaux, pas de photons et c'est encore largement vrai aujourd'hui.

QUELS ÉTAIENT LES ATOUTS DE LA RÉGION DE NANCY POUR CRISTAL LASER ?

Philippe et moi sommes restés en Lorraine car nous nous y sentons bien et la Région nous a toujours soutenus. L'avantage que j'y vois est que nous nous trouvons à équidistance de nos principaux clients européens.

QUELLES ONT ÉTÉ LES GRANDES ÉTAPES DE VOTRE DÉVELOPPEMENT ?

Les étapes de notre développement sont très liées à l'évolution des technologies et aux positions prises par nos clients et partenaires. Ainsi notre premier client industriel, Quantel (Lumibird aujourd'hui) dans le domaine de l'ophtalmologie, et que nous continuons de fournir 30 ans plus tard pour cette même application. Nous avons ensuite connu un fort essor grâce au développement des lasers à forte énergie ou à haute puissance moyenne, où nos cristaux de LBO ont ainsi permis à leurs utilisateurs de battre des records mondiaux dans leur catégorie. Ce sont eux qui ont rendu possibles par exemple des impulsions de 360 J à 351 nm (CEA), ou encore de 10 Petawatt (Thalès, ELI-NP). Dans le domaine des hautes puissances, il faut aussi citer les 100 W d'UV atteints par Amplitude Systèmes tout comme le récent record de 1,4 KW à 515 nm (ISFW en collaboration avec Trumpf).

Un autre développement qui nous a beaucoup fait progresser, ce sont les applications

spatiales : ainsi, un peu de Cristal Laser se trouve à bord des missions Curiosity, Perseverance (NASA) et Aeolus (ESA).

QUELLES SONT LES SPÉCIFICITÉS DES CRISTAUX QUE VOUS SYNTHÉTISEZ ?

Pour répondre simplement : à partir d'une longueur d'onde déterminée par le matériau à gain du laser, nos cristaux permettent de générer d'autres longueurs d'ondes. Le plus souvent ce sont des harmoniques, mais on peut aussi générer des longueurs d'onde plus lointaines par conversion paramétrique.

Ainsi, nos cristaux permettent de couvrir l'ensemble du spectre de 213 nm à 4 µm, dans des lasers très différents allant de la femtoseconde à l'émission continue, du milliwatt au kilowatt. Il est difficile d'être plus spécifique, car nous travaillons avec plus d'une centaine de fabricants de lasers dans le monde.

D'autre part, nous nous efforçons également d'accompagner nos clients – en ce sens, ils sont aussi nos partenaires – dans le développement de leurs propres produits car nous avons souvent à y gagner en termes d'amélioration ou d'innovation.

QUELS SONT VOS PRINCIPAUX MARCHÉS ?

Notre chance, c'est que les marchés que nous servons sont très divers et cela nous permet d'amortir les chocs. Ainsi, par le biais de nos clients, nous sommes présents dans le secteur médical (ophtalmologie, dermatologie), biomédical (séquençage d'ADN et cytométrie), mais aussi dans l'industrie manufacturière (semi-conducteurs, marquage laser), sans oublier le domaine militaire (téléométrie et contre-mesures), spatial, ou encore scientifique.

La Photonique en Suisse

La photonique est reconnue dans le monde entier comme l'une des technologies clés du 21^e siècle. La Suisse ne fait pas exception, bien au contraire. Ce petit pays au cœur de l'Europe, sans faire partie de l'Union, n'ayant que des ressources naturelles très modestes, a réussi à se distinguer au cours des siècles et surtout depuis le début du xx^e siècle par un fabuleux savoir-faire commercial, bancaire et technologique dans un environnement stable et paisible et par sa capacité à innover.



Jean-Jacques Goy
Président de GMP SA, Jean-Jacques.goy@gmp.ch

Pierre-Yves Fonjallaz
Resp. Romandie, Swissphotonics, fonjallaz@swissphotonics.net

La Suisse, grâce à sa position dominante dans la mécanique de précision et dans l'industrie des machines, a été très tôt active dans l'optique. Les optiques traditionnelles sont fabriquées par la mécanique de précision. Réciproquement, le laser est un outil idéal pour l'industrie de précision.

De même, la technique de précision, la microtechnique et les machines les plus sophistiquées ne peuvent être qualifiées que par des procédures de mesure et d'analyse optiques. C'est ainsi que l'industrie suisse de la photonique génère aujourd'hui, avec presque 10 000 collaborateurs, un chiffre d'affaires de 4 milliards de francs (4 B€), soit environ 5 % du marché européen et presque 1 % du marché mondial. Compte tenu de l'effet de levier des industries de la photonique sur l'ensemble de l'économie suisse, un chiffre d'affaires d'environ 40 milliards de francs est rendu possible par la photonique en Suisse. L'industrie liée à la photonique en Suisse est constituée de quelques grands acteurs comme Oerlikon, Leica, Trumpf, Bystronic et ASML, mais surtout par plus de 200 petites et moyennes entreprises très innovantes. Ces entreprises ont un très fort taux d'exportation et des produits à très haute valeur ajoutée. Rien de très original sans doute pour les connaisseurs du secteur mais ces caractéristiques sont poussées à l'extrême en Suisse. Malgré la cherté du franc suisse, les produits suisses, en particulier photoniques, sont très attractifs pour la clientèle étrangère.

Beaucoup de ces entreprises trouvent évidemment leur origine dans le monde académique et les instituts de recherche. En Suisse, les Écoles Polytechniques Fédérales de Zürich et de Lausanne (EPFZ et EPFL) et les instituts du CSEM, d'EMPA et du PSI (on peut y rajouter le centre de recherche d'IBM à Rüschlikon) sont les principaux moteurs de découvertes majeurs en photonique et de leur commercialisation. Les universités de Genève et Berne et un réseau de hautes écoles spécialisées jouent aussi un rôle très important (HES-SO). Nous nous focaliserons plus tard sur la région francophone de la Suisse, la Romandie. En attendant, voici quelques exemples d'entreprises notoires en Suisse germanophone et italophone : II-IV Laser Enterprise, Axetris, Cedes, Diamond, ESPROS, Exalos, Femtoprint, Fisba, NKT Photonics, Regent Lighting, Huber&Suhner, IMT, Optotune, Reichle de Massari, Safran, Volpi et WZW. Vers la fin des années 1990, la photonique Suisse a été fortement renforcée par des programmes nationaux du Conseil des Écoles Polytechniques Fédérales (CEPF) de financement de la recherche dans le domaine, ● ● ●

OPTIKI/II. Ces programmes avaient pour but de combler un retard de l'industrie avec l'aide des compétences académiques. La collaboration entre la recherche et l'industrie dans le domaine de la photonique a été encouragée et les technologies nécessaires ont été développées. C'est en particulier grâce à cet appui que la Suisse est devenue à l'époque un cluster photonique de rayonnement mondial. A suivi le collapse de la bulle télécom vers le tournant du millénaire et une forte diversification vers d'autres domaines d'application, mais ce type de financement public prit malheureusement fin malgré les bénéfices importants reconnus par toutes les parties impliquées. Pour citer le *White Paper – Photonics Switzerland* de Swiss MEM : « *Quand de nouvelles approches technologiques se développent rapidement et de façon disruptive, que par-là s'ouvrent des possibilités de produits entièrement nouveaux, et que simultanément d'autres domaines de la technique sont influencés, un programme national fondamental sur une large base, exécuté en commun, est alors nécessaire et utile* ».

Le côté disruptif est toujours présent et nous pensons qu'un soutien gouvernemental continue à être justifié, comme pas mal de pays dans le monde l'ont très bien compris (surtout Chine, Corée du Sud et Singapour). Le gouvernement suisse a en tout cas pris la décision récemment de continuer à soutenir la photonique suisse au travers des organisations Swiss MEM et Swissphotonics dans le cadre du programme d'Innosuisse intitulé « *National Thematic Network Innovation Booster* ». Swiss MEM est l'association suisse de l'industrie des machines, des équipements électriques et des métaux (industrie MEM), et la photonique en est l'une de ses composantes essentielles. Swiss MEM estime que la part des produits de ses membres qui présentent des fonctions photoniques devrait passer de 40 % en 2017 à 70 % en 2025. L'association Swissphotonics est la plateforme nationale de la photonique suisse et est principalement active dans le domaine du réseautage et du développement stratégique du domaine. L'association est parfaitement intégrée dans les efforts européens dans le cadre de la plateforme technologique européenne Photonics21 et d'EPIC, en particulier pour ce qui concerne l'organisation d'événements pour propager la photonique dans les principaux domaines d'application.

La photonique en Romandie

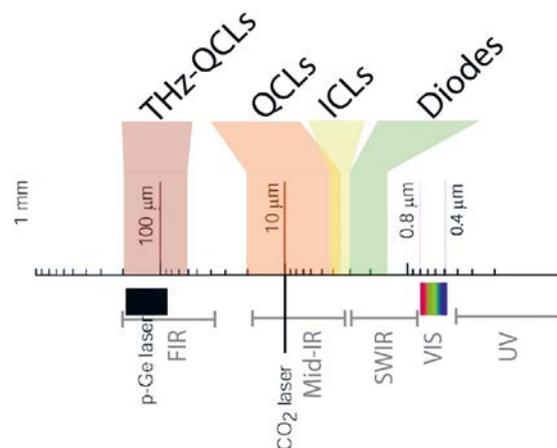
La Romandie francophone compte 2 millions d'habitants (un quart de la Suisse). Mis à part l'exemple fameux de la multinationale Logitech et quelques gros utilisateurs comme Bobst et Swatch Group, la photonique romande est surtout basée sur au moins 70-80 entreprises de petites tailles mais pas toujours à proprement parler des PME (CP Automation, LASEA, Sercalo, Solaronix, Synova, Silitec, Tech-Laser, etc.). Implantée dans toute la Romandie, l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), jeune université très haut placée

dans les rankings d'universités (3ème du WURR 2020), est un puissant moteur d'innovation et produit 2 start-ups photoniques par année (Abionic, Attolight, CREAL 3D, Fastree 3D, Gamaya, Innoview, Ligentec, Lyncee Tec, MicroR, Miraex, Morphotonix, Nanolive, Rayform, Samantree, Viventis, etc). Beaucoup de ces start-ups sont intégrées à l'Innovation Park de l'EPFL à Lausanne, ville où de fait plus de la moitié de toutes les entreprises photoniques romandes ont leur siège. Parmi une bonne trentaine de professeurs en photonique, Michael Graetzel, inventeur de la cellule solaire du même nom et Tobias Kippenberg avec ses composants quantiques, sont les plus connus. Les spécialités de l'EPFL en photonique sont la biophotonique, la nanophotonique, la micro-optique (l'héritage horloger du Jura y est pour quelque chose) et le photovoltaïque. Swissphotonics a une antenne à l'EPFL et vous donnera volontiers plus de détails sur les acteurs romands et suisses.

Portraits d'entreprises photoniques en Romandie

Alpes Lasers, St-Blaise

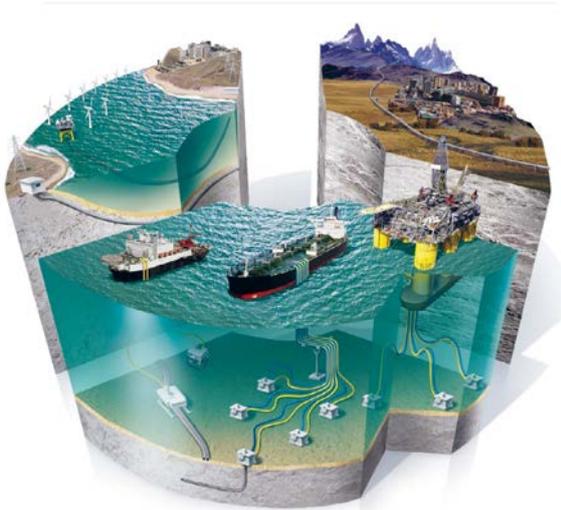
Alpes Lasers est une société d'ingénierie suisse qui



fait œuvre de pionnier dans le domaine des lasers, en particulier les lasers infrarouges utilisés dans diverses applications telles que la détection de gaz. En 1994, le Prof. Jérôme Faist (actuellement à ETH Zurich) fait pour la première fois la démonstration expérimentale avec ses collègues de Bell labs du laser à cascade quantique (QCL en anglais). De retour en Suisse, il démarre la startup Alpes Lasers, entreprise qui a admirablement réussi à croître organiquement et occupe une position centrale en Suisse et en Europe. Alpes Lasers s'efforce de promouvoir ses lasers, dans les domaines du moyen IR et des THz, auprès de ses clients actifs sur un large éventail de marchés, de la sécurité civile ou industrielle à la défense. Alpes Lasers participe à, ou coordonne, un grand nombre de projets européens ce qui lui permet d'investiguer en permanence de nouveaux horizons et de se connecter à beaucoup de nouveaux clients.

Omnisens SA, Morges

Omnisens produit des capteurs répartis à fibre optique et propose des solutions fiables de surveillance des infrastructures énergétiques permettant une détection précoce et une localisation précise d'événements pouvant porter préjudice à l'installation.



Ces techniques de mesure fournissent une information sur les conditions de fonctionnement et permettent une surveillance en mesurant des variations de température (DTS), de contraintes (DSS), de vibrations (DAS) le long de la fibre.

Omnisens est une entreprise suisse active au niveau mondial dans la génération éolienne offshore pour la surveillance des câbles électriques, dans l'industrie pétrolière pour la surveillance des oléoducs et gazoducs, tant terrestres que sous-marins. Elle est leader de la mesure répartie à fibre optique sur longue distance. Les produits d'Omnisens sont basés sur la diffusion Brillouin stimulée.

Ziemer Ophthalmic Systems AG, Port

Fabricant de dispositifs médicaux à la pointe de la technologie dans le domaine de l'ophtalmologie et la mécanique de précision pour l'industrie horlogère. La gamme de produits comprend actuellement des dispositifs pour la chirurgie réfractive et pour la chirurgie



de la cataracte par laser ainsi que des instruments de précision pour le diagnostic. Parmi les nombreuses innovations, Ziemer produit le seul laser femtoseconde mobile du marché.

Ce système est utilisé quotidiennement par le personnel médical dans des environnements stériles. L'utilisation du système requiert peu de formation car toutes les étapes essentielles du processus laser, guidé par imagerie, sont automatisées et contrôlées par ordinateur. Un procédé breveté lié à l'emploi d'une faible énergie laser donne d'excellents résultats cliniques qui ne peuvent être obtenus avec les instruments et techniques chirurgicales traditionnels.

GMP SA, Renens

Distributeur de systèmes et d'instruments de haute technologie dans les domaines lasers, spectroscopie, microscopie et anti-vibration. À côté de cela, GMP commercialise sa propre sphère d'intégration pour la mesure du rendement quantique.

Conçue par des spécialistes qualifiés et expérimentés en spectroscopie de l'EPFL, la sphère G8 a été développée pour présenter un excellent rapport signal/bruit, éviter la rétrodiffusion de la lumière d'excitation et toute contamination possible de la sphère lors de la manipulation de l'échantillon, et faciliter le processus de l'étalement. Le résultat est un dispositif soigné, pratique et facile à utiliser, destiné à des mesures de haute précision et répétables. Changement d'échantillon en quelques secondes. La sphère GMP SA G8 permet la détermination du rendement quantique avec une reproductibilité de quelques pour cent et une précision de moins de 10 %.



Insolight, Ecublens

Développe un nouveau type de panneau solaire destiné à l'agrivoltaïsme pour combiner production agricole et électrique sur un même terrain. Dans le cadre de la transition énergétique, un enjeu majeur est de déployer des centrales solaires sans pour autant sacrifier les terrains agricoles. L'agrivoltaïsme offre des perspectives de déploiement intéressantes aux installateurs, ainsi que des synergies sur les structures de montage (en serre). Les panneaux conventionnels dégradent cependant les rendements agricoles à cause de leur opacité et peinent à percer dans ce marché.



Les panneaux Insolight résolvent ce problème, en combinant haut rendement et translucidité. La technologie optique permet à la fois de récupérer la lumière directe avec 29 % de rendement tout en laissant passer la lumière diffuse souhaitable pour la photosynthèse.

La société, qui compte 15 collaborateurs, vient de lancer sa pré-série de modules destinés aux premières installations avec des clients, avec 1000 modules prévus en 2021. Elle se concentre sur le design et la commercialisation – tandis que la production est sous-traitée à des partenaires industriels en Europe.

Et encore:

Agie Charmilles New Technologies SA, Genève. Un expert mondial dans le secteur des machines à outils surtout électro-érosion, fraisage à haute vitesse et haute performance (avec système de fixation et de palettisation). Agie Charmilles a su innover avec sa gamme de machines pour la texturation laser 3D.

ID Quantique SA, Genève. Fondée par des scientifiques de l'Université de Genève, ID Quantique est le leader mondial dans le secteur de la cryptographie quantique pour l'encryption de réseaux, génération de clés sécurisées quantiquement et la génération de nombres aléatoires.

H. Glass SA, Villaz-Saint-Pierre et EPFL. Panneaux solaires esthétiques et transparents basés sur la technologie des cellules solaires colorées (DSSC) développées par M. Michael Grätzel (EPFL).

Suss Microoptics SA, Hauterive. Microoptiques réfractives et diffractives de haute qualité pour le couplage des fibres, la collimation et l'homogénéisation des faisceaux.

SCHOTT Suisse SA, Yverdon. Fabricant d'optiques de qualité utilisées dans les applications industrielles, par exemple systèmes laser, appareils optomécaniques et optoélectroniques, métrologie et appareils médicaux, ainsi que dans l'aéronautique, les applications spatiales et l'industrie horlogère. ●

NOUS REDIRIGONS LA LUMIÈRE LÀ OÙ VOTRE SYSTÈME OPTIQUE EN A BESOIN

PUBLI-RÉDACTIONNEL

Depuis 1999, Sercalo Microtechnology Ltd. est fournisseur de solutions MEMS pour l'industrie de la fibre optique. Sercalo est leader du marché de composants MEMS pour les équipements de tests et mesures et de surveillance des réseaux télécom. Les produits MEMS Sercalo, notamment les commutateurs à fibre optique, les atténuateurs et les filtres accordables, sont la solution de choix lorsqu'une fiabilité élevée et une stabilité à long terme sont requises. Depuis quelques années, Sercalo propose sur le marché de nouveaux modèles de micro-miroirs pour la direction et le balayage du faisceau lumineux. Ces miroirs MEMS sont utilisés dans les capteurs à balayage optique, comme par exemple la tomographie par cohérence optique, les LiDAR pour la conduite autonome et la communication inter satellites, pour n'en citer que quelques-uns.

LES MIROIRS MEMS SERCALO POUR VOS BESOINS SPÉCIFIQUES

Une technologie MEMS mature se traduit par l'absence de frottement et d'adhérence. Par conséquent, les miroirs ne connaissent ni fatigue ni usure. Les composants à fibre optique Sercalo sont qualifiés selon la norme Telcordia 1221 pour résister aux environnements extrêmes (chocs mécaniques, vibrations, chaleur humide, tests de cycle thermique, etc.) et le site de fabrication est certifié ISO 9001.

CONCEPTION, FABRICATION MEMS ET ASSEMBLAGE SUR UN MÊME SITE

Les compétences de Sercalo couvrent l'ensemble du processus de production, de la conception et de la qualification du MEMS, à la fabrication et l'assemblage final. Tous les produits sont conçus, fabriqués et certifiés « *Swiss Made* ».

SOLUTIONS MEMS OPTIQUES À PORTÉE DE CLIC

Sercalo propose une gamme de produits standards disponibles dans son nouveau magasin en ligne et à travers son réseau de distribution mondial. Sercalo propose également ses services pour la conception sur mesure de MEMS selon les besoins spécifiques du client. Contactez-nous, nous sommes prêts à créer avec vous des solutions optimales et durables! ●

CONTACT

DR. CORNEL MARXER | CEO
info@sercalo.com | www.sercalo.com



LA SPHÈRE D'INTÉGRATION G8 DE GMP SA

La sphère d'intégration G8 est le fruit d'une collaboration entre l'Ecole Polytechnique de Lausanne et GMP SA.

Un exemple de mesure parfaitement adapté à la sphère G8 est celle du rendement quantique des matériaux. Elle permet des mesures précises en utilisant de très petites quantités de matière en poudre ou liquide. L'utilisation d'une sphère nécessite d'accorder entre autres la plus grande attention au rapport signal/bruit, à la rétrodiffusion de la lumière d'excitation, à la contamination éventuelle de la sphère lors de la manipulation de l'échantillon et au processus d'étalonnage.

Conçue par des spécialistes qualifiés et expérimentés en spectroscopie, la sphère G8 répond à ces préoccupations.



Le résultat est un appareil soigné, avec un excellent rapport signal/bruit, pratique et facile à utiliser, destiné à des mesures de haute précision et répétables à quelque pourcent. A titre d'exemple la conception du porte échantillon avec une double enveloppe en quartz très pur permet de changer d'échantillon en quelques secondes tout en garantissant que la contamination du revêtement intérieur de la sphère soit

impossible. Nous avons aussi mis au point un guide détaillé pour nos clients sur comment réaliser la calibration ainsi que ces mesures de manière à obtenir le meilleur résultat possible.

Aux cours du temps le guide et la sphère ont subi des améliorations. Cet instrument fait actuellement l'objet de travaux de développement par GMP pour le rendre encore plus versatile et facile d'utilisation. La sphère G8 est utilisée par des chercheurs dans le monde entier, à leur plus grande satisfaction. Elle est parfaitement compatible avec les fluoromètres de Horiba et d'Edinburgh Instruments. ●



Menhir Photonics est une société en pleine croissance basée à Zurich (Suisse) et proposant des sources laser femtosecondes dont les caractéristiques ainsi que la robustesse sont mondialement reconnues.



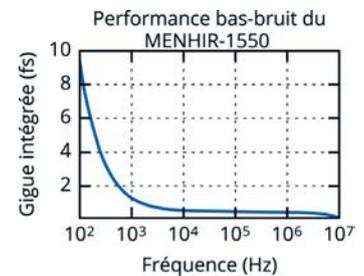
Le succès de Menhir Photonics repose sur des designs laser de haute qualité combinés avec une technique d'assemblage optimale offrant une très grande robustesse. La poli-

tique d'options permet de définir des lasers en cohérence totale avec les besoins des clients.

Le produit phare, MENHIR-1550, est un laser pulsé (< 250 fs) émettant à 1550 nm, avec des taux de répétition paramétrables (de 200 MHz à 2,5 GHz) et répondant à de nombreuses applications.

Ses caractéristiques techniques uniques (gigue inférieure à 10 fs sur une large plage de fréquence de bruit 1 kHz – 10 MHz, niveau de bruit

ultra-bas, capacité de génération de signaux périodiques...) en font un produit d'exception pour la synchronisation d'équipements ou pour l'utilisation dans des produits de pointe tels que des oscilloscopes



ultra-rapides, des analyseurs de réseau ou tout simplement pour une source de référence de fréquence fixe.

Nos équipes hautement qualifiées de Menhir Photonics en Suisse et de Wavetel en France sont à votre écoute pour définir la meilleure solution à votre besoin. À noter que Wavetel vient d'ouvrir une quatrième agence en France, à Lannion, afin d'accompagner l'expansion de son pôle d'expertise photonique. ●

CONTACT

WAVETEL – a Simac Group Company

Arnaud BOUT

FRANCE

+33 (0)6 83 55 19 47 | about@wavetel.fr

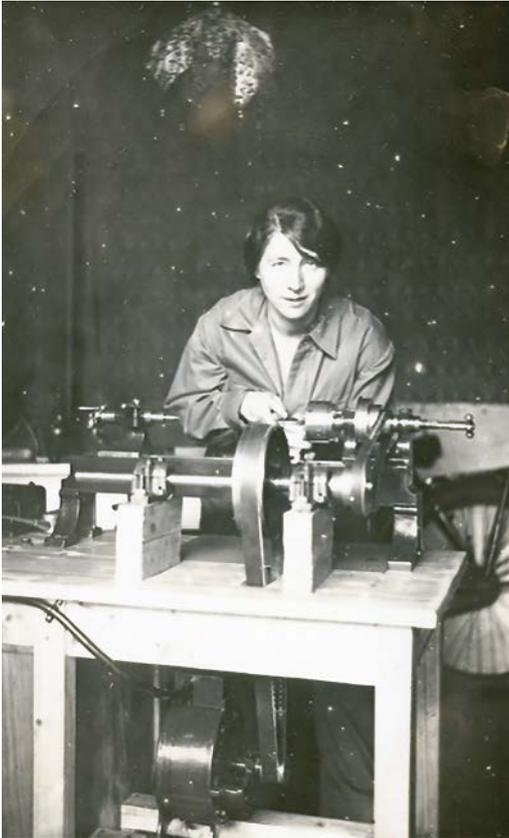
Menhir Photonics

Florian Emaury

SUISSE

+41 (0)61 331 45 45 | contact@menhir-photonics.com

Caroline Émilie « Lili » Bleeker



Lucie LEBoulleux

LESIA, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Université de Paris, Sorbonne Université, 5 place Jules Janssen, 92195 Meudon, France

* lucie.leboulleux@obspm.fr

Caroline Émilie « Lili » Bleeker était une physicienne et auto-entrepreneuse néerlandaise. Après un doctorat sur les spectres des alcaloïdes, elle monte la première entreprise néerlandaise de production de matériel et d'instruments optiques. Elle signe notamment avec Frederik Zernike le brevet sur le microscope à contraste de phase, pour lequel le physicien obtient le prix Nobel de Physique en 1953. Elle se démarque également pour son engagement contre le nazisme lors de la Seconde Guerre Mondiale.

<https://doi.org/10.1051/photon/202010322>

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

Enfance et éducation

Caroline Émilie « Lili » Bleeker naît le 17 janvier 1897 dans la ville de Middelburg au Pays-Bas. Elle est alors la cinquième et dernière enfant de Johannes Lambertus Bleeker, un pasteur évangélique luthérien, et de Gerhardina Martha Döhne. Si ses sœurs quittent le foyer pour devenir enseignantes, Caroline

Bleeker, en tant que benjamine, est supposée rester auprès de ses parents afin d'aider sa mère au quotidien. Cependant, elle s'oppose rapidement à ce destin et se lance dans des études supérieures.

En 1916, après son diplôme de Hogere Burgerschool (baccalauréat), Caroline Bleeker commence à étudier les mathématiques avant de se

BIOGRAPHIE

17 Janvier 1897

Naissance à Middelburg, Pays-Bas

1930

Création de sa société de conseils

1939

Société NEDOPTIFA

1960

Dépôt du brevet sur le microscope à contraste de phase

8 novembre 1985

Décès à Zeist, Pays-Bas

tourner vers la physique à l'université d'Utrecht. Elle se spécialise ensuite en astronomie puis en physique expérimentale et théorique. A la suite de son master et grâce à un travail d'assistante au laboratoire de Physique de l'université d'Utrecht, elle se lance alors dans un doctorat sous la direction du professeur et docteur Leonard S. Ornstein. Le 5 novembre 1928, elle devient docteure avec distinctions en physique expérimentale. Sa thèse, intitulée *Emissie- en dispersiemetingen in de seriespectra der alkaliën* (mesures d'émission et de dispersion dans les spectres en série des alcaloïdes), est imprimée par G. J. Willemse, dont le fils Gerard deviendra son principal associé et compagnon de vie.

Caroline Bleeker, l'auto-entrepreneuse

Malgré les recommandations élogieuses de Leonard Ornstein, Caroline Bleeker peine à trouver un emploi après sa thèse. Finalement, un an et demi après son doctorat, elle fonde un cabinet de consultation en physique qui produit du matériel de laboratoire et des instruments de mesure. Si le cabinet est originellement localisé dans son propre salon, il s'étend rapidement et finit par déménager dans une petite usine à Utrecht. En 1935, Gerard Willemse rejoint la société dont il devient co-directeur.

Un an plus tard, grâce à plusieurs investisseurs dont le professeur Frederik « Frits » Zernike (voir Photoniques 73 - 2014), Caroline Bleeker monte aussi un atelier d'optique et l'entreprise commence à produire et distribuer du matériel et des instruments optiques. Notamment, Caroline Bleeker négocie et obtient le marché des jumelles à prismes pour l'armée néerlandaise, et son produit est même présenté au premier ministre néerlandais Hendrikus « Hendrik » Colijn.

En 1939, le cabinet de conseil compte plusieurs dizaines d'employés et évolue pour devenir la *Nederlandsche Optiek- en Instrumentenfabriek Dr. C.E. Bleeker*, aussi appelée NEDOPTIFA ou BLEEKER. En sus de l'armée, on trouve parmi ses principaux clients des scientifiques, des professeurs d'universités et de grands laboratoires.

Seconde Guerre Mondiale

Le 10 mai 1940, afin de contourner la ligne Maginot, l'armée allemande lance une attaque aussi soudaine qu'inattendue contre les Pays-Bas. C'est la

célèbre Bataille de Hollande, qui ne dure alors qu'une semaine et aboutit à la capitulation du pays. Mais Caroline Bleeker choisit son camp : afin d'éviter que ses produits soient utilisés par l'armée allemande, elle stoppe la production des jumelles à prismes et, en contrepartie, développe celle de microscopes dédiés aux universités. L'entreprise connaît alors des difficultés : les ventes chutent drastiquement et Caroline Bleeker doit utiliser ses propres revenus pour payer ses employés. Par ailleurs, elle cache des citoyens de confession juive dans son usine d'Utrecht mais, dénoncée aux autorités en 1944, elle les aide à s'enfuir avant de disparaître à son tour avec son compagnon. Jusqu'à la fin de la guerre, l'entreprise restera fermée et l'usine sera occupée par les troupes allemandes et néerlandaises.

L'après-guerre

Au sortir de la guerre, en mai 1945, la société est au plus mal et ne peut recevoir d'aide de l'état pour se redresser totalement. Malgré ces difficultés,

Caroline Bleeker et Gerard Willemse ouvrent une seconde usine dans la ville de Zeist, qui est inaugurée par le ministre de la reconstruction et du logement, Joris in't Veld. Caroline Bleeker et Frits Zernike déposent aussi un brevet sur le microscope à contraste de phase, un instru-

ment optique non invasif permettant d'étudier la structure des cellules, que l'entreprise NEDOPTIFA entreprend de produire. C'est d'ailleurs pour cette invention que Frits Zernike reçoit le prix Nobel de Physique en 1953. Enfin, en 1961, la reine Juliana des Pays-Bas visite l'usine de Zeist et se voit offrir des jumelles produites par la société et gravées aux armoiries royales. Malgré tout, les dettes accumulées au cours de la guerre et accrues par l'achat de la nouvelle usine ne se combrent pas.

Dernières années

Le 31 décembre 1963, à respectivement 66 et 63 ans, Caroline Bleeker et Gerard Willemse se retirent de la direction de leur entreprise et une nouvelle direction est nommée. La société fusionne avec « De Oude Delft » en 1969 avant de fermer définitivement en 1978.

Les dernières années de sa vie, Caroline Bleeker souffre d'une forme grave d'Alzheimer qui nécessite beaucoup de soins. Le 8 novembre 1985, elle décède à Zeist où elle est enterrée aux côtés de son

Parmi les travaux marquants réalisés par Caroline Bleeker, on compte la conception du microscope à contraste de phase dont elle a co-signé le brevet avec Frederik Zernike

compagnon, parti cinq ans plus tôt d'une maladie cardio-vasculaire. Cependant, le nom de la physicienne n'est inscrit sur leur tombe commune qu'en 1997. Cette tentative de faire disparaître Caroline Bleeker de l'Histoire est réitérée lors de son oraison funèbre, au cours de laquelle ses exploits et son entreprise ne sont pas mentionnés.

Le microscope à contraste de phase

Parmi les travaux marquants réalisés par Caroline Bleeker, on compte la conception du microscope à contraste de phase dont elle a co-signé le brevet avec Frederik Zernike (*Inrichting voor microscopische waarneming met variabel fasecontrast, en microscopobjectief, geschikt voor deze inrichting*, brevet n° 94480, 1960).

Dédié à la bactériologie et à l'étude des cellules et micro-organismes transparents, ce microscope permet de s'affranchir des méthodes traditionnelles invasives, qui utilisent des colorants fixateurs. Il utilise les différences d'indices optiques des objets transparents à observer, qui engendrent des déphasages (ou retards) entre les ondes lumineuses les traversant. L'œil et les détecteurs n'étant pas directement sensibles à ces différences de marche, le microscope à contraste de phase les transforme en variations d'intensité. Pour cela, il faut que le rayon à détecter interfère avec un rayon de référence. Frederik Zernike propose d'imposer un déphasage de $\pi/2$ (ou un quart de longueur d'onde) au rayon de référence en utilisant des anneaux ou une lame de phase. Caroline Bleeker et Frederik Zernike conçoivent le premier modèle de microscope à contraste de phase et NEDOPTIFA est la première entreprise à le commercialiser.

Récompenses

Caroline Bleeker ne s'est pas illustrée qu'en physique : pour son engagement contre le nazisme et sa bravoure, elle reçoit en 1946 une distinction royale en devenant officier de l'Ordre d'Orange-Nassau (*Officier in de Orde van Oranje Nassau*).

Enfin, pour sa contribution à la physique et l'optique, le bâtiment du groupe de Physique Instrumentale de l'Université d'Utrecht porte son nom depuis 1998 : Caroline Bleekergebouw.

Aujourd'hui

On peut se souvenir de Caroline Bleeker comme d'une experte en physique expérimentale et d'une entrepreneuse hors-pair, deux milieux qui étaient, à l'époque, presque exclusivement masculins. Son refus

On peut se souvenir de Caroline Bleeker comme d'une experte en physique expérimentale et d'une entrepreneuse hors-pair, deux milieux qui étaient, à l'époque, presque exclusivement masculins.

des conventions et des restrictions dues à son genre en font un modèle féminin original et toujours d'actualité : dans sa vie professionnelle, elle était consciente de ses capacités intellectuelles et se refusait à accepter une position inférieure à ses connaissances et dans la sphère privée, elle rejetait les conventions sociales établies telles que le mariage ou l'attachement de la benjamine au foyer parental.

Loin de rester symbolique, son combat pour les droits des femmes s'est traduit de façon concrète : elle était attachée à l'embauche de femmes parmi ses employés et une section du journal de son entreprise s'adressait spécifiquement aux femmes : « *Van vrouw tot vrouw* » (de femme à femme).

Ainsi, par sa personnalité, ses accomplissements et ses engagements, Caroline Bleeker est devenue une figure non seulement de l'optique, mais aussi de l'émancipation des femmes et de leur mise en lumière tardive dans un milieu traditionnellement masculin. ●

EN SAVOIR +

Dr. Caroline Émilie Bleeker en de Nederlandse Optiek- en Instrumentenfabriek Dr. C.E. Bleeker, Dr. Gijs van Ginkel

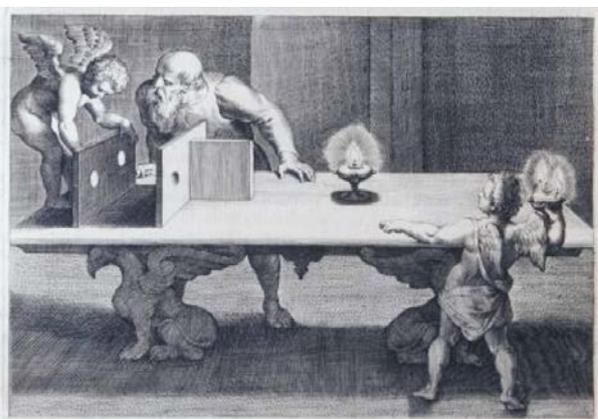
Binoculars made in Holland : BLEEKER, Dr. Gijs van Ginkel

Caroline Émilie Bleeker (1897-1985): Een vrouw in een fysisch bedrijf, Marianne I.C. Offereins, GEWINA / TGGNWT, volume 20, issue 4, pp. 297 – 308

PREMIÈRES MESURES PHOTOMÉTRIQUES : DE LÉONARD DE VINCI À PIERRE BOUGUER

Lionel SIMONOT

Université de Poitiers, Institut Pprime, UPR CNRS 3346, Chasseneuil Futuroscope, France
lionel.simonot@univ-poitiers.fr



Comment mesurer une quantité de lumière ? Cette question fondamentale pour toute expérience optique n'allait pas de soi jusqu'au XVIII^e siècle. Il fallait inventer un instrument et un protocole de mesure utilisant le seul photodétecteur alors disponible : l'œil humain. Plusieurs savants et quelques grands peintres contribuèrent sur plus de deux siècles à l'élaboration du premier photomètre.

<https://doi.org/10.1051/photon/202010326>

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

Qui inventa le premier photomètre ? De Léonard de Vinci à Pierre Bouguer, il fallut plus de deux siècles pour établir le principe de mesures photométriques par égalisation visuelle entre les éclairagements produits par la source de lumière considérée et par une source de référence. Après un essor important au XIX^e pour caractériser les nouveaux dispositifs d'éclairage au gaz, les photomètres vont disparaître au XX^e siècle avec l'apparition des capteurs photoélectriques.

La photométrie est une discipline cousine de l'optique géométrique. Or, si cette dernière trouve ses racines dès le III^e siècle avant J.C. avec les travaux d'Euclide, il faut attendre de longs siècles pour qu'émerge l'étude de la mesure quantitative de la lumière. Comment en effet mesurer la lumière de manière fiable ? Certes, le système

visuel humain est particulièrement performant par sa capacité à détecter des luminosités allant de la quasi obscurité jusqu'à l'éblouissement, performance encore inégalée par les photodétecteurs actuels. Mais l'œil humain ne peut faire une mesure absolue de la lumière reçue d'autant qu'il s'adapte à la luminosité ambiante. Pour s'affranchir de ce défaut, il fallait inventer un « photomètre », un dispositif permettant de quantifier la luminosité d'une source de lumière par un observateur humain. Le principe repose sur l'égalisation visuelle entre les éclairagements produits par la source à étudier et par une source de référence.

L'INVENTION D'UN PEINTRE ?

L'usage de la perspective et de la peinture à l'huile a donné une nouvelle liberté aux peintres de la Renaissance leur permettant de traduire avec un réalisme rarement atteint jusqu'alors

les volumes et les reliefs. Quelques décennies plus tard, Léonard de Vinci a bénéficié de cette révolution technique et picturale, et a porté jusqu'à l'incarner, la maîtrise de la construction des ombres et des lumières. Ainsi, comme pour de nombreuses autres inventions, il n'est pas illégitime d'attribuer à Léonard de Vinci celle du premier photomètre. On trouve effectivement quelques schémas rudimentaires dans un de ses fameux codex (en l'occurrence le *Manuscrit C de France*). Le principe de comparaison des ombres créées par deux sources y est décrit (figure 1). En modifiant la distance d'une des sources, il est possible d'égaliser la « force » des ombres. Le principe du photomètre est esquissé. Mais, en s'équipant d'un miroir, vous pourrez constater dans le texte qui accompagne le schéma, que Léonard de Vinci propose une loi de décroissance de l'éclairagement en inverse de ●●●

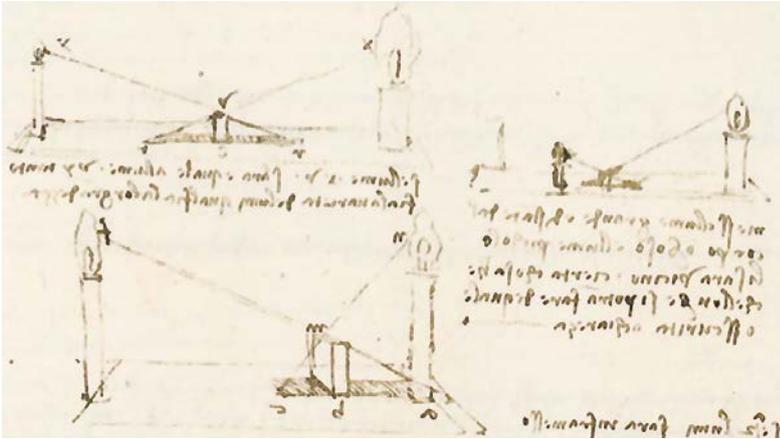


Figure 1.
Extrait *Manuscrit de France* Léonard de Vinci –
Manuscrit C folio 22 recto, circa 1490-1491.

la distance, ce qui, nous le verrons par la suite, n'est pas correcte. Une telle erreur indique que le peintre n'a probablement pas mené des expérimentations très approfondies.

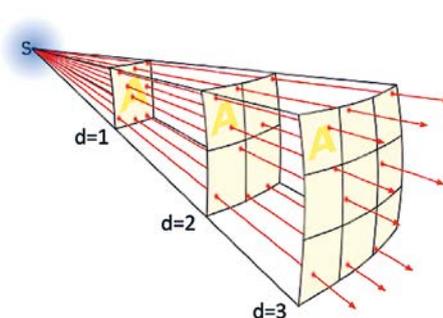
Plus d'un siècle plus tard, c'est un autre peintre qui semble illustrer le fonctionnement d'un photomètre. La gravure, présentée en tête d'article, est de Paul Rubens. Étonnant de voir une œuvre du peintre de la couleur en noir et blanc ! Il s'agit d'une illustration pour un traité d'optique en six livres publié en 1613. Son auteur, François d'Aguillon, est un savant jésuite. Son lien avec le peintre est plus évident par la classification des couleurs qu'il expose également dans son traité. Il propose, sans doute pour la première fois, d'ordonner les couleurs autour – outre du noir et du blanc – de la triade jaune / rouge / bleu, largement adoptée depuis dans l'art occidental.

L'expérience, représentée sur la gravure et décrite dans le livre, consiste à comparer les tâches lumineuses formées par une lampe à une flamme et une lampe à deux flammes. D'Aguillon établit que l'éclairement de la première lampe est plus important que celui de la lampe à deux flammes placée à une distance double. Mais d'Aguillon ne formalise pas par une loi mathématique cette décroissance de l'éclairement avec la distance. C'est donc un prototype de photomètre qui n'aurait jamais été utilisé sauf par les deux génies dessinés par Rubens !

LOI EN CARRÉ INVERSE

La loi de décroissance de l'éclairement avec la distance à la source lumineuse avait pourtant été établie par Johannes Kepler, quelques années auparavant, en 1604 dans son livre *Astronomia pars Optica*. Pour comprendre cette loi, il faut bien saisir qu'un éclairement est une densité de flux lumineux par unité de surface. Or, si dans un cône partant de la source S, un flux de lumière traverse une surface élémentaire à une distance $d=1$, la surface traversée à une aire 4 fois plus grande à la distance $d=2$, et 9 fois plus grande à la distance $d=3$. La densité de flux sur une surface dénommée A sur la figure 2 diminue bien avec l'inverse de la distance au carré.

Figure 2.
Diminution de l'éclairement avec la distance :
loi en carré inverse. https://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_en_carr%C3%A9_inverse#/media/File:Inverse_square_law.svg



La première véritable mesure photométrique, utilisant correctement la loi en carré inverse semble avoir été faite par le scientifique Christian Huygens en 1698 pour comparer la luminosité du Soleil et celle de Syrus.

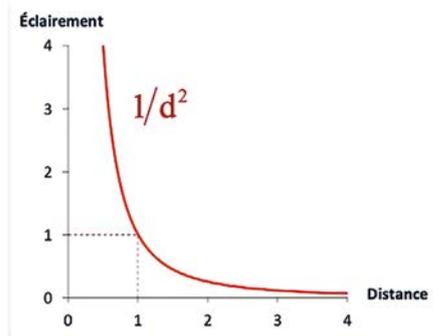
Il observe les deux astres à travers un long tube équipé d'un diaphragme réglable. Les luminosités (on dirait aujourd'hui les luminances) varient en inverse de l'ouverture du diaphragme. Mais la méthode sera critiquée trois décennies plus tard par Pierre Bouguer. La comparaison des luminosités émises par les deux astres à plusieurs heures d'intervalle ne lui paraît pas fiable [1].

23 NOVEMBRE 1725 : NAISSANCE DE LA PHOTOMÉTRIE

Pierre Bouguer est de son vivant un scientifique reconnu surtout pour ses études sur la navigation : les formes des bateaux, les manœuvres, les mesures pour s'orienter en mer... Bien qu'essentiels, ses travaux en photométrie ne constituent qu'une part mineure de ses activités scientifiques. En 1729, il publie un *Essai d'optique sur la gradation de la lumière* qu'il complète dans les toutes dernières années de sa vie. Son essai devient un *Traité d'optique* et est publié à titre posthume en 1760.

Grand expérimentateur, Pierre Bouguer pose les bases de la photométrie :

- il décrit le principe méthodologique d'égalisation de luminosité pour deux sources de lumière observées simultanément ;
- il propose divers dispositifs permettant la mesure (figure 3) ;
- il utilise correctement la loi en carré inverse.



Dans son essai, Pierre Bouguer indique même la date de ce qui peut être considérée comme la naissance de la photométrie [2]. Dans la nuit du 23 novembre 1725, il compare l'éclairement produit sur une feuille par la lune et celui produit par quatre bougies. En ajustant la distance des bougies pour obtenir l'égalisation des luminosités, il estime la brillance de la lune.

AMÉLIORATIONS ET DISPARITION DES PHOTOMÈTRES

Malgré la rigueur méthodologique de Bouguer, la précision des mesures n'est pas au rendez-vous. A la fin du XVIII^e siècle, Rumford propose un photomètre basé (comme sur les schémas de Léonard de Vinci !) sur la comparaison des ombres et non des éclairagements directs des sources lumineuses elles-mêmes. L'œil se fatigue moins et l'observateur a plus de temps pour ajuster précisément la luminosité. Pour s'affranchir de la subjectivité des mesures, des photomètres thermométriques sont développés mais ne connaissent pas un grand succès. Peu efficaces pour la photométrie stellaire en raison de la faible luminosité des étoiles, les photomètres thermométriques sont aussi trop complexes à utiliser pour quantifier les performances des brûleurs des lampes à gaz apparues au XIX^e siècle [3]. Les praticiens préfèrent le photomètre de Bunsen en raison de sa simplicité et de son faible coût. Le composant principal est une feuille blanche qu'une tâche d'huile rend translucide en son centre. La feuille est placée entre les deux sources de lumière à comparer

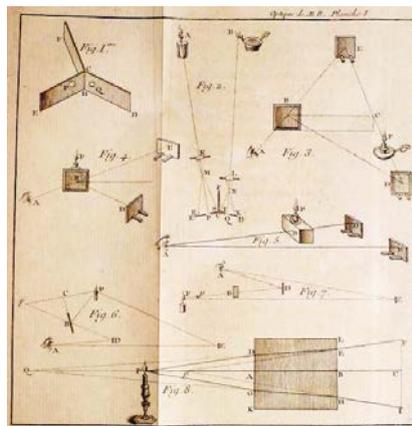


Figure 3. Divers systèmes de mesures photométriques. Planche du Traité d'optique de Pierre Bouguer.

et l'égalisation des éclairagements se produit lorsque la tâche de graisse est aussi lumineuse que le reste du papier et devient donc invisible.

Le principe d'égalisation des photomètres impose l'utilisation de sources de lumière de référence. Les « bougies », souvent différentes d'un pays à l'autre, deviennent les unités de l'intensité lumineuse. L'unification de ces unités est progressive et ce n'est qu'au milieu du XX^e siècle que les « bougies » sont remplacées par la candela, une des sept unités de base du système international. Entre temps, le développement de détecteurs photoélectriques rend obsolète le principe des photomètres par égalisation visuelle. Ils sont remplacés par les luxmètres et autres luminancemètres ne faisant plus appel à la subjectivité d'un opérateur. ●

RÉFÉRENCES

- [1] J.-E. Morère, La photométrie : les sources de l'Essai d'Optique sur la gradation de la lumière de Pierre Bouguer 1729, dans Revue d'histoire des sciences et de leurs applications **18**, n°4, 337-384 (1965)
- [2] W. E. Knowles Middleton, The beginnings of photometry, Appl. Opt. **10**, 2592-2594 (1971)
- [3] X. Chen, Visual Photometry in the Early 19th Century: A "Good" Science with "Wrong" Measurements, dans : *Wrong for the Right Reasons*. Springer, Dordrecht, 161-183 (2005)

HASO R.FLEX2

*The Swiss Army Knife
of optics*

HASO R-Flex2



HASO R-Flex2 SWIR

More on Youtube



contact@imagine-optic.com

www.imagine-optic.com
www.ioweb.store

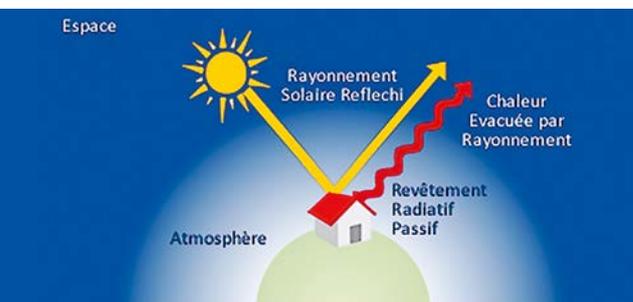
imagine  optic™

REFROIDISSEMENT RADIATIF DIURNE PAR REVÊTEMENT DE FIBRES DE SILICE

Karl Joulain*, Refet Ali Yalçın, Jérémie Drévilion, Etienne Blandre

Institut Pprime, CNRS, Université de Poitiers, ISAE-ENSMA, 86073 Poitiers Cedex

*karl.joulain@univ-poitiers.fr



Le refroidissement radiatif diurne est un procédé de refroidissement passif nécessitant des revêtements très réfléchissants dans le visible et fortement absorbants dans l'infrarouge. De la laine de verre constituée de fibres extrêmement fines de silice permet d'obtenir des puissances de refroidissement proches du maximum théorique à un coût potentiellement très bas.

<https://doi.org/10.1051/photon/202010528>

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

Le contrôle de la température est depuis toujours un enjeu important que cela soit pour des raisons de confort thermique, de conservation des denrées périssables ou de fonctionnalité de certains produits manufacturés. Si les procédés de chauffage sont nombreux et très faciles à mettre en œuvre, le refroidissement est en général plus ardu avec moins de méthodes à disposition.

Certaines d'entre elles sont cependant très simples. On sait depuis très longtemps que le refroidissement peut être important la nuit notamment dans les situations de grandes étendues plates comme des hauts plateaux et en l'absence de couverture

nuageuse et d'humidité. Ce refroidissement, d'origine radiative, est dû à la transparence de l'atmosphère dans la partie infrarouge du spectre pour des longueurs d'ondes comprises entre 8 et 13 microns. Dans cette plage de longueur d'onde, le sol échange directement avec le vide spatial c'est-à-dire avec le rayonnement cosmologique à 3 K. L'efficacité de ce refroidissement dépend essentiellement des conditions locales comme la température ambiante, le relief et surtout l'humidité de l'air.

Moins connue est la possibilité d'obtenir un refroidissement radiatif de jour [1]. Si ce refroidissement est tout comme en conditions nocturnes, très favorisé en l'absence de couverture nuageuse et d'humidité

en raison d'une meilleure transparence de l'atmosphère dans l'infrarouge, celui-ci est cependant diminué par l'absorption du rayonnement solaire. Cette absorption ne dépend pas des conditions locales mais essentiellement des propriétés radiatives du corps que l'on veut refroidir. D'un point de vue théorique, un refroidissement radiatif diurne sera fortement favorisé si l'objet visé par cette application est fortement réfléchissant et le moins absorbant dans le spectre d'émission du soleil (lumière visible et proche infrarouge) et fortement émettant dans la bande de transparence de l'atmosphère située dans l'infrarouge moyen (voir figure en tête de l'article).

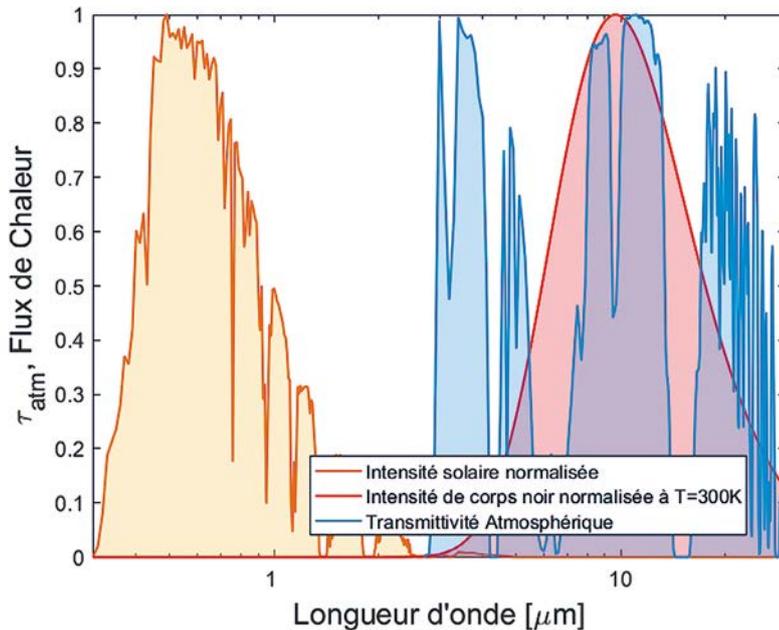


Figure 1. Spectre du flux solaire incident, transmittance de l'atmosphère et spectre d'émission du corps noir à température ambiante ($T = 300 \text{ K}$).

UN REVÊTEMENT RÉFLÉCHISSANT DANS LE VISIBLE ET ABSORBANT DANS L'INFRAROUGE

On peut appréhender ces conditions en observant les courbes de la figure 1 sur lesquelles on observe le rayonnement solaire, le rayonnement thermique infrarouge de corps considéré et la transparence de l'atmosphère.

Nous pouvons formaliser la puissance de refroidissement en présence d'éclairement solaire de la manière suivante :

$$P_{cool} = P_{rad} - P_{atm} - P_{solar},$$

où P_{rad} est la puissance émise par unité de surface par la surface de l'objet soumise au refroidissement, P_{atm} est la puissance par unité de surface échangée radiative avec l'atmosphère, P_{solar} est enfin la puissance du rayonnement solaire incident absorbée par la surface. Ces grandeurs s'expriment selon les relations suivantes :

$$P_{rad} = \int_{2\pi} \int_0^\infty I_{bb}(\lambda, T=T_{sur}) \varepsilon(\lambda, \theta) \cos\theta d\lambda d\Omega$$

$$P_{atm} = \int_{2\pi} \int_0^\infty I_{bb}(\lambda, T=T_{amb}) \alpha(\lambda, \theta) \varepsilon_{atm}(\lambda, \theta) \cos\theta d\lambda d\Omega$$

$$P_{solar} = \int_0^\infty I_{solar}(\lambda) \alpha(\lambda, \theta)_{\theta=0} d\lambda$$

Ces quantités dépendent des propriétés radiatives de l'objet à refroidir, notamment son absorptivité spectrale $\alpha(\lambda, \theta)$ par ailleurs égale à son émissivité $\varepsilon(\lambda, \theta)$ (voir l'article Comprendre

la loi de Kirchhoff de ce numéro), où λ est la longueur considérée et θ la direction du rayonnement incident, et bien sûr de l'intensité de corps noir $I_{bb}(\lambda, T)$ et de l'irradiation solaire $I_{solar}(\lambda)$. L'émissivité de l'atmosphère est quant à elle reliée à la transparence de l'atmosphère $t(\lambda)$ par l'expression $\varepsilon_{atm}(\lambda, \theta) = 1 - t(\lambda)^{1/\cos\theta}$. Il apparaît donc effectivement mathématiquement dans ces formules que la puissance de refroidissement sera d'autant plus grande que l'absorption du rayonnement solaire par la surface sera faible, que l'atmosphère sera transparente et que la surface sera émissive dans l'infrarouge. La transparence de l'atmosphère ne peut pas descendre en dessous de certaines valeurs correspondant à des conditions atmosphériques ultra sèches. Dans des conditions où par exemple la température ambiante et la température de la surface sont égales à 300 K, le maximum théorique de refroidissement dans lequel le matériau conçu serait parfaitement émettant (ou absorbant) dans l'infrarouge et parfaitement réfléchissant dans le visible vaut 191 W.m^{-2} .

Cette valeur est aussi la puissance de refroidissement maximale pour un corps noir la nuit au travers l'atmosphère lorsque la température de surface et la température ambiante sont égales à 300 K.

RÉFLEXION PAR DIFFUSION NON ABSORBANTE

Pour atteindre des puissances de refroidissement élevées, plusieurs stratégies peuvent être explorées comme nous allons le montrer dans la suite. La première et sans doute la plus simple consiste à coupler une couche de silice qui est transparente et non absorbante dans le visible et pratiquement un corps noir dans l'infrarouge avec une couche métallique réfléchissante. Un tel assemblage permet d'atteindre une puissance de refroidissement de 89 W.m^{-2} , valeur obtenue en calculant la réflectivité et l'absorptivité spectrale d'une couche de silice déposée sur un substrat d'argent. Comme on le voit, cette idée naïve donne une puissance de refroidissement non négligeable mais encore loin des maxima théoriques. Une analyse plus fine montre que c'est l'absorption du rayonnement solaire, de l'ordre de 50 W.m^{-2} , qui obère les performances de ce dispositif.

L'augmentation de la réflectivité du revêtement est donc le paramètre clé pour viser un meilleur refroidissement radiatif. Une des stratégies consiste à utiliser un milieu non absorbant et diffusant dans le visible mais qui est fortement émettant dans l'infrarouge moyen. En effet, un milieu fortement diffusant non absorbant dans le visible devient très réfléchissant si son épaisseur est plus grande que la longueur de transport. Cette longueur de transport est la distance à partir de laquelle un rayonnement incident collimaté à l'entrée du milieu devient isotrope dans ce milieu en raison des multiples diffusions auxquelles il est soumis. C'est un phénomène qui s'observe lorsque l'on voyage en avion au-dessus d'une couche de nuage épaisse. Une telle couche vue du dessus ●●●

apparaît très lumineuse en raison du fait qu'elle réfléchit quasiment intégralement le rayonnement solaire. C'est le même principe qui gouverne la fabrication de peinture blanche ou bien l'efficacité de certaines crèmes solaires.

Ces dernières années, plusieurs études ont été menées pour obtenir des revêtements performants présentant un bon pouvoir refroidissant. Elles ont notamment utilisé des particules sphériques de silice dans une matrice de type PMMA [2]. La silice est en effet un excellent matériau pour fabriquer des particules diffusantes car ce matériau est transparent dans le visible et fortement émettant dans l'infrarouge moyen.

Les performances de ces matériaux composites, déjà intéressantes, peuvent néanmoins être améliorées en augmentant le contraste d'indice entre les particules diffusantes et la matrice dans laquelle elles sont enfermées. Une solution peut être de remplacer la matrice transparente (d'indice supérieur à 1) dans laquelle les particules sont emprisonnées par le vide (d'indice égal à 1). On comprend malheureusement facilement que ce type de solution est difficilement envisageable pour des particules sphériques. En revanche des diffuseurs comme des fibres de silice analogues aux fibres présentes dans les isolants de type laine de verre peuvent facilement s'auto supporter.

UNE LAINE DE VERRE COMME REVÊTEMENT

Dans notre laboratoire à l'institut P' de Poitiers, nous avons étudié un revêtement constitué d'un ensemble de fibres déposées sur un substrat noir (Fig. 2) [3].

Pour obtenir l'émissivité (et donc l'absorptivité) et la réflectivité du revêtement, nous avons utilisé une méthode statistique, la méthode de Monte-Carlo. Le principe de cette méthode est le suivant : pour une fréquence et une direction données, un ensemble de rayons est envoyé sur le revêtement proposé, dont les fibres présentent une distribution

d'orientation autour de l'horizontale. La section efficace de diffusion d'une fibre unique est bien connue et basée sur un calcul électromagnétique exact analogue à la théorie de Mie [4]. Pour un rayon donné, on tire une orientation selon la fonction de distribution d'orientation des fibres. À partir des expressions donnant les sections efficaces de diffusion ou d'absorption, on en déduit une probabilité de diffusion ou d'absorption du rayon considéré. Un tirage aléatoire permet d'en déduire si le rayon est absorbé ou diffusé par cette fibre. S'il est absorbé, le rayon contribue à l'absorption. S'il est diffusé, il continue sa course jusqu'à une autre fibre ou bien jusqu'aux frontières du domaine où il pourra être considéré comme réfléchi s'il sort par la face d'entrée ou absorbé s'il sort par la face de sortie. Le nombre considérable de rayons tirés permet d'en déduire statistiquement les réflectivités et émissivités spectrales et directionnelles du revêtement.

Il est à noter que ces considérations ne sont valables que lorsque l'on se place dans le régime de diffusion indépendante dans lequel il n'y a pas d'évènement de diffusion multiple entre les diffuseurs. Ceci est vérifié lorsque la taille des diffuseurs (fibres ou particules sphériques) est bien plus petite que la distance entre ces diffuseurs. Une concentration volumique inférieure à une dizaine de pourcent assure en pratique cette condition.

Une fois les propriétés radiatives

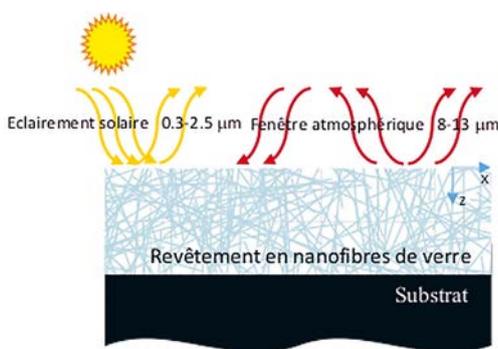
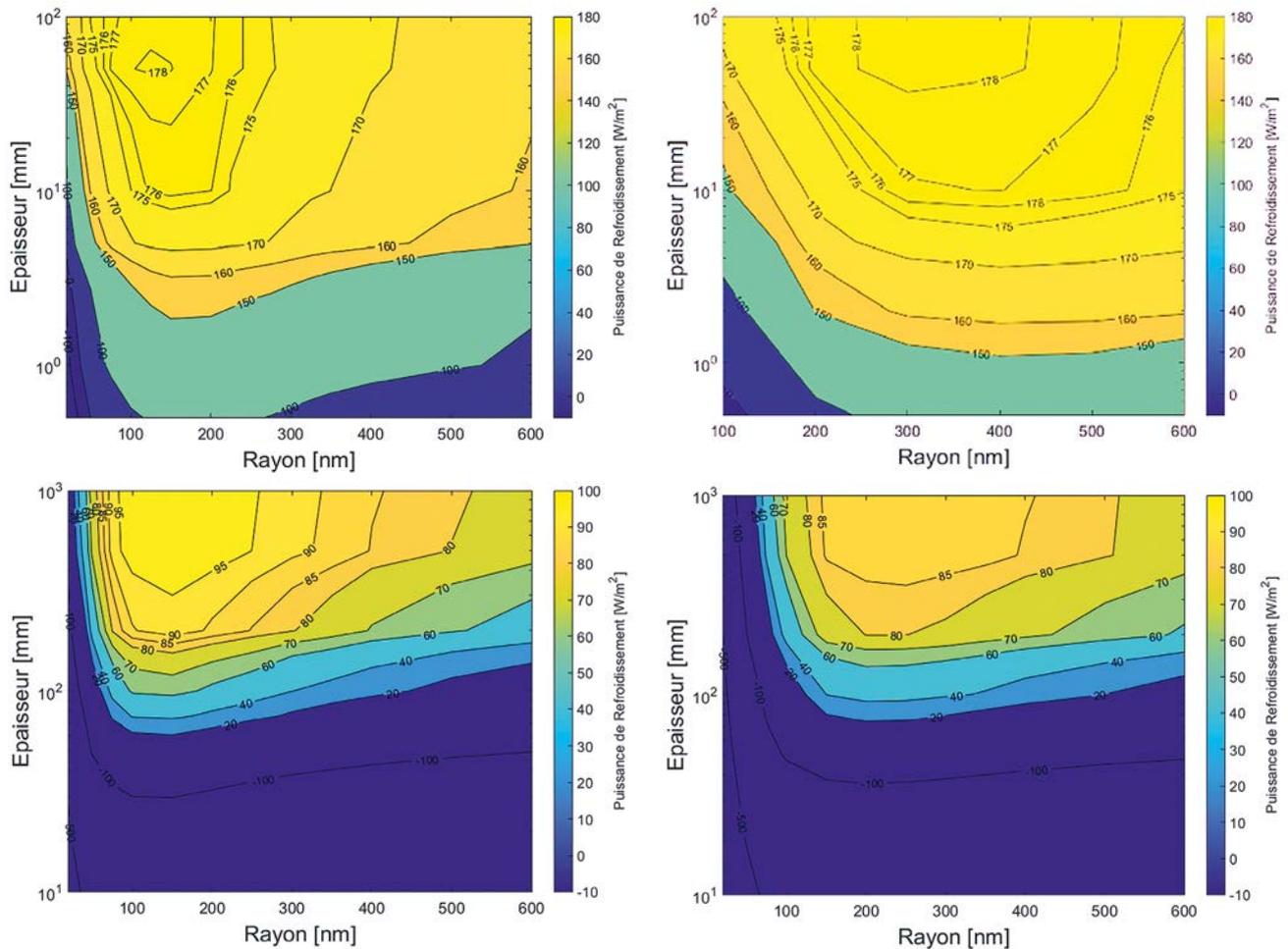


Figure 2.

Revêtement proposé pour le refroidissement radiatif constitué d'un ensemble de fibres de silice dispersées au-dessus d'un substrat noir.

du revêtement ainsi déterminées, nous avons calculé la puissance de refroidissement en conditions diurnes pour 4 types de situations. Fibres en suspension dans l'air, sphères en suspension dans l'air, fibres dans une matrice transparente de type résine acrylique (indice 1,5), sphère dans une matrice transparente identique au cas précédent. Dans les 4 cas, une certaine épaisseur de ces matériaux composites est déposée sur un corps noir ce qui constitue la situation la plus défavorable. Sur la figure 3 sont représentées les puissances de refroidissement calculées pour différentes épaisseurs et différents diamètres de diffuseurs dans le cas d'une fraction volumique de diffuseurs de 4 %. On note un optimum de puissance dans tous les cas de figure pour des tailles de diffuseurs de quelques centaines de nm. Pour des diffuseurs dans l'air, l'épaisseur optimale est de quelques dizaines de mm tandis qu'elle est de plusieurs dizaines de cm dans le cas d'une matrice en résine acrylique. On note également que la puissance de refroidissement est presque deux fois supérieure pour des diffuseurs dispersés dans l'air que dans le cas où ils sont dispersés dans une matrice. Elle atteint une valeur de 178 W.m^{-2} assez proche du maximum théorique. On voit donc le grand intérêt à utiliser des diffuseurs dispersés dans l'air et donc à utiliser des fibres qui même si elles sont un peu moins performantes que les sphères ont l'avantage de pouvoir être effectivement maintenues facilement en suspension dans l'air.

Sur cet exemple simple d'un revêtement constitué de diffuseurs de SiO_2 en suspension, nous avons vu que des puissances de refroidissement élevées pouvaient être atteintes. D'autres stratégies plus complexes peuvent être élaborées. Il est ainsi possible d'améliorer sensiblement la puissance de refroidissement d'un système multicouche comme le revêtement constitué d'une couche de silice déposée sur un substrat d'argent [5]. Dans ce cas précis, nous avons montré qu'en gravant un réseau bidimensionnel à la surface de ce système d'une période



de 5 microns et de fraction volumique 0,5, il était possible d'atteindre une puissance de refroidissement de $114 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, supérieure de plus de 25 % à ce qu'elle est sur la surface nue.

QUEL AVENIR POUR CES REVÊTEMENTS ?

La question de la fabrication à grande échelle et de la soutenabilité économique de tels revêtements est évidemment importante. Si les processus de gravure de périodes micrométriques sont difficilement envisageables à l'échelle d'un bâtiment, la fabrication de fibres de silice nanométriques l'est si on est capable de gagner un ordre de grandeur sur le diamètre des fibres qui dépend de la capacité à faire passer de la silice fondue au travers d'une buse de quelques centaines de nm de diamètre. Un tel processus de fabrication, proche de celui de la laine de verre, permettrait une production à bas coût. Une autre

question est l'acceptabilité esthétique de tels revêtements qui doivent être le plus « blanc » possible pour diminuer leur absorptivité dans le visible. Développer des revêtements colorés est néanmoins envisageable tout en conservant des performances de refroidissement honorables comme l'ont montré deux de nos études récentes où la colorisation peut être obtenue à l'aide de diffuseurs de type cœur coquille ou bien en introduisant des bandes d'absorption à l'aide de cavités résonnantes dans des multicouches [5,6].

Si beaucoup reste à faire pour ajuster les propriétés optiques de matériaux composites aux conditions optimales du refroidissement radiatif et pour trouver un procédé industriel de fabrication très peu onéreux, il reste que ce procédé passif offre une option très intéressante sur le plan énergétique pour le management thermique des objets. ●

Figure 3.

Puissance nette de refroidissement pour différentes épaisseurs de revêtements et diamètres de diffuseurs pour une fraction volumique de 4% et pour 4 situations (a) fibres en suspension dans l'air, (b) sphères en suspension dans l'air, (c) fibres en suspension dans une matrice transparente d'indice 1,5, (d) sphères en suspension dans une matrice transparent d'indice 1,5.

RÉFÉRENCES

- [1] E. Rephaeli *et al.*, *Nano Lett.* **13**, 1457 (2013)
- [2] Y. Zhai *et al.*, *Science* **355**, 1062 (2017)
- [3] R. A. Yalçın *et al.*, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **206**, 110320 (2020)
- [4] C. F. Bohren et D. R. Huffman, *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, 1st edn, (Wiley, New-York, 1998)
- [5] E. Blandre *et al.*, *Opt. Express* **28**, 29703 (2020)
- [6] R. A. Yalçın *et al.*, *ACS Photonics* **7**, 1312 (2020)

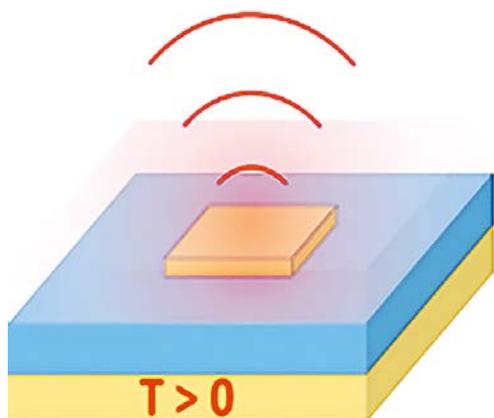
RAYONNEMENT THERMIQUE INFRAROUGE DE NANO-ANTENNES PLASMONIQUES INDIVIDUELLES

Patrick BOUCHON¹ et Yannick DE WILDE²

¹ DOTA, ONERA, Université Paris-Saclay, 91123 Palaiseau, France

² Institut LANGEVIN, ESPCI Paris, Université PSL, CNRS, 75005 Paris, France

* Patrick.Bouchon@onera.fr ; Yannick.Dewilde@espci.fr



Nous exploitons les fluctuations thermiques pour étudier les résonances de nano-antennes plasmoniques métal-isolant-métal (MIM) individuelles dont les modes électromagnétiques sont excités en chauffant les nanostructures. La spectroscopie infrarouge par modulation spatiale permet de mesurer le spectre du rayonnement thermique de champ lointain d'une antenne unique en s'affranchissant de la contribution dominante du fond environnant. Des mesures de microscopie à effet tunnel à rayonnement thermique fournissent quant à elles une image super-résolue de la structure spatiale du rayonnement thermique de champ proche.

<https://doi.org/10.1051/photon/202010532>

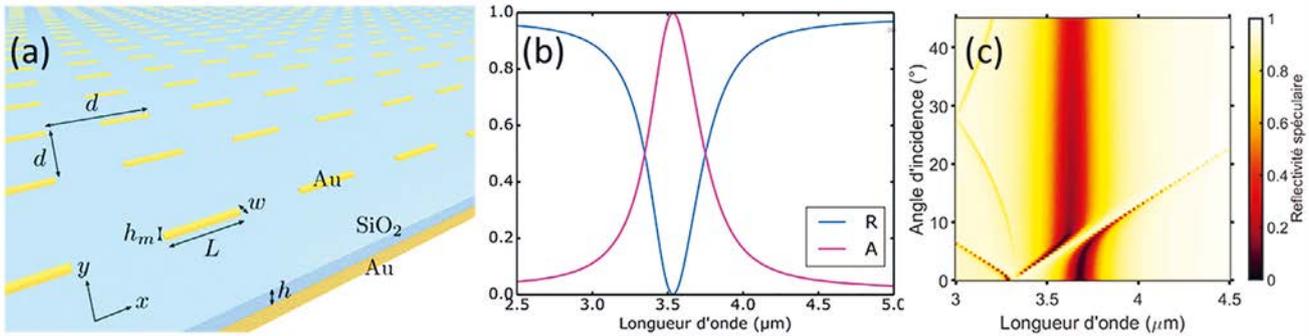
Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation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

CONTRÔLER LE RAYONNEMENT THERMIQUE

Contrôler le rayonnement thermique de surfaces étendues ou d'objets de taille inférieure à la longueur d'onde caractéristique de ce rayonnement est un enjeu important pour de nombreuses applications telles que l'optimisation des transferts de chaleurs

par rayonnement, le refroidissement radiatif, le thermophotovoltaïque. Ce rayonnement thermique est contrôlé d'une part par la température qui va définir la courbe du corps noir de Planck, et par l'émissivité de la surface. Les progrès accomplis en nanophotonique offrent de multiples possibilités d'ingénierie permettant

de contrôler l'émissivité et d'atteindre des propriétés qui s'écartent de celles de sources conventionnelles. Dès 2002, il a été montré que la cohérence spatiale d'ondes de surface excitées par un réseau pouvait être exploitée pour créer de nouvelles sources thermiques directionnelles [1]. Les métasurfaces formées de l'agencement périodique



d'objets résonants sub-longueur d'onde offrent un autre moyen intéressant de contrôler l'émission thermique. La figure 1 montre qu'à l'aide d'antennes plasmoniques formées d'un réseau de nanostructures métalliques comme de simples bâtonnets d'or, il est par exemple possible de produire une émission thermique d'émissivité quasi-unitaire dans le moyen infrarouge à une longueur d'onde proportionnelle à la taille des bâtonnets, alors qu'une couche d'or continue et sans relief présente au contraire une très faible émissivité dans l'infrarouge. Compte tenu de leur faible encombrement, des antennes bâtonnets de tailles différentes peuvent aussi être juxtaposées dans la cellule-unité d'un réseau, ce qui permet d'atteindre une émission thermique élevée dans une bande spectrale choisie [2].

Figure 1.

(a) Réseau d'antennes plasmoniques métal-isolant-métal (MIM) formé de bâtonnets d'or ($w = 0,1 \mu\text{m}$, $L = 1 \mu\text{m}$, $h = 220 \text{ nm}$, $h_m = 50 \text{ nm}$). (b) Spectres théoriques d'absorption et de réflexion d'une antenne MIM présentant une résonance associée à la longueur des bâtonnets. (c) La présence d'ordres diffractés par le réseau de $3,2 \mu\text{m}$ de période produit une réponse angulaire modifiée par rapport à celle d'une antenne isolée.

DE LA MÉTASURFACE À L'OBJET UNIQUE

S'il est possible de produire une source thermique dont le spectre est plus étroit que la courbe de Planck, l'intensité du rayonnement qui se propage à grande distance d'une telle source est fortement limitée car l'émissivité ne peut dépasser 1. Compte tenu de cette limitation qui distingue les sources

thermiques des dispositifs actifs tels les diodes et les lasers, elles utilisent des surfaces étendues formées d'un grand nombre d'antennes identiques. L'intensité des sources ainsi produites est alors suffisante pour que leur spectre d'émission puisse être facilement mesuré avec un spectromètre infrarouge à transformée de Fourier (FTIR). Par exemple, une source d'une surface de 1 cm^2 et d'émissivité quasi unitaire dans une bande spectrale de $1 \mu\text{m}$ centrée autour de $10 \mu\text{m}$ produit un rayonnement de $2,6 \text{ mW}$ par stéradian lorsqu'elle est chauffée à $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Pour réaliser une telle source, il est nécessaire de fabriquer une métasurface contenant plus d'1 million de nano-antennes plasmoniques identiques. L'étude d'un réseau d'antennes n'est cependant pas exempte de difficultés lorsqu'il s'agit d'appréhender les ●●●

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

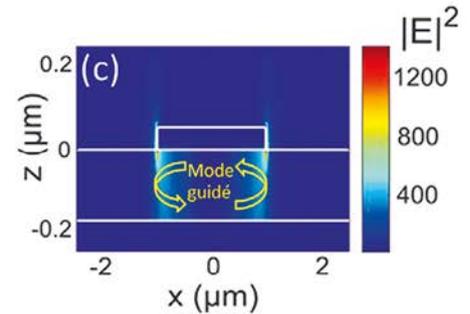
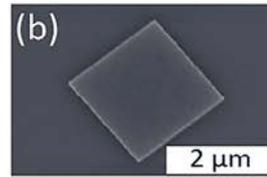
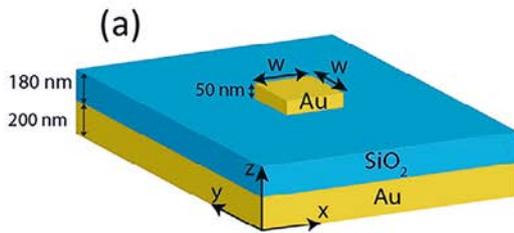


Figure 2.

(a) Schéma d'une nano-antenne plasmonique métal-isolant-métal (MIM). (b) Image par microscopie électronique à balayage. (c) Profil d'intensité du champ sous une antenne MIM.

propriétés intrinsèques de la brique de base qui le constitue. Si le pas du réseau est trop élevé, des ordres diffractés se manifestent et modifient le diagramme d'émission des objets individuels, s'il est trop faible, des effets de couplage de champ proche apparaissent, ce qui perturbe également le comportement individuel des antennes.

Caractériser l'émission thermique d'une nano-antenne plasmonique individuelle est un enjeu majeur pour la compréhension fine du comportement électromagnétique de ce type de dispositifs. Deux verrous importants se sont longtemps opposés à sa mise en œuvre. D'une part, le rayonnement thermique infrarouge émis par une antenne plasmonique est à peine de l'ordre de quelques nW par stéradian à 100 °C. Mesurer son spectre avec un spectromètre FTIR nécessite de s'affranchir de la contribution du signal infrarouge de fond dominant qui est également d'origine thermique. D'autre part, les antennes plasmoniques infrarouges sont des objets de taille sub-lambda, de sorte qu'un simple microscope infrarouge ne suffit pas pour imager la répartition spatiale du rayonnement thermique produit à leur surface en raison de la limite de diffraction.

Nous avons réalisé l'étude de nano-antennes plasmoniques individuelles qui démontrent la levée de ces verrous [3]. Les antennes étudiées sont des nano-antennes de type métal-isolant-métal (MIM). Leur structure consiste en un carré en or épais de 50 nm et d'une largeur w voisine de 2 µm, déposé sur une couche diélectrique de silice (SiO₂) de 180 nm d'épaisseur, qui recouvre elle-même

un film continu en or épais de 200 nm sur substrat de silicium. Comme l'illustre la figure 2, ces antennes se comportent comme des cavités Fabry-Perot pour les plasmons de gap qui restent confinés sous le carré métallique. La longueur d'onde de résonance fondamentale λ_{res} dépend de la géométrie et des matériaux, permettant d'élaborer des absorbeurs ou des émetteurs thermiques quasi-parfaits sélectifs spectralement dans l'infrarouge. Utilisées dans un détecteur infrarouge, les antennes MIM concentrent le champ incident dans un volume très inférieur à $(\lambda_{res})^3$ permettant de réduire le volume de semiconducteur et d'obtenir ainsi un détecteur très sensible [4].

REPOUSSER LES LIMITES DE LA SPECTROSCOPIE INFRAROUGE...

Les expériences menées visent à produire une excitation thermique des modes résonants de nano-antennes MIM individuelles en plaçant l'échantillon sur lequel elles reposent sur un support chauffant permettant d'élever leur température à environ 160 °C. Le rayonnement émis correspond alors à la section efficace d'émission de l'antenne, équivalente à la section efficace d'absorption, multipliée par le spectre de Planck. Le montage utilisé pour mesurer le spectre de nano-antennes MIM individuelles est schématisé dans la

figure 3. Un microscope infrarouge collecte le rayonnement émis par l'échantillon chauffé pour l'envoyer ensuite dans un spectromètre FTIR. Le détecteur utilisé est optiquement conjugué avec l'échantillon et capture le rayonnement en provenance d'une zone dont la taille minimale est d'environ 1000 µm². La section géométrique de l'antenne MIM est environ 1000 fois plus faible, et le signal associé à son rayonnement thermique est noyé dans un signal de fond beaucoup plus intense dû au rayonnement thermique de régions voisines du substrat.

Nous avons développé une méthode de spectroscopie infrarouge par modulation spatiale (IR-SMS) qui permet d'éliminer complètement la contribution du fond thermique parasite dans les mesures de spectroscopie FTIR, de manière à pouvoir extraire le spectre d'une seule nano-antenne MIM en dépit de ses dimensions réduites. Notre approche s'inspire de travaux menés pour mesurer l'extinction produite par des nanoparticules métalliques [5]. La méthode IR-SMS exploite l'effet de vignettage qui se produit au niveau du détecteur infrarouge lorsqu'une source quasi-ponctuelle est translatée latéralement dans le plan objet. L'échantillon est déplacé spatialement sur une dizaine de microns par un piézoélectrique suivant un signal sinusoïdal. Cette modulation spatiale de l'ordre d'une dizaine de microns induit une faible modulation de l'intensité perçue par le détecteur, qui se superpose au fond. En démodulant le signal détecté à la fréquence d'oscillation spatiale, il devient alors possible d'extraire le rayonnement

thermique propre à la nano-antenne MIM et de supprimer la contribution dominante du rayonnement thermique de son environnement.

Des spectres de section efficace d'émission ont été obtenus pour différentes tailles de nano-antennes MIM. Un exemple de spectre produit par une antenne de 2 μm est représenté dans la figure 3. Les spectres mesurés présentent une très bonne adéquation avec les spectres calculés numériquement. Les deux résonances observées, l'une vers 7 μm et l'autre 11 μm , se décalent vers le rouge pour des tailles croissantes de nano-antennes. De façon intéressante, la dispersion de la silice présente une résonance dans l'infrarouge moyen, de sorte que la condition de résonance du mode fondamental peut-être satisfaite

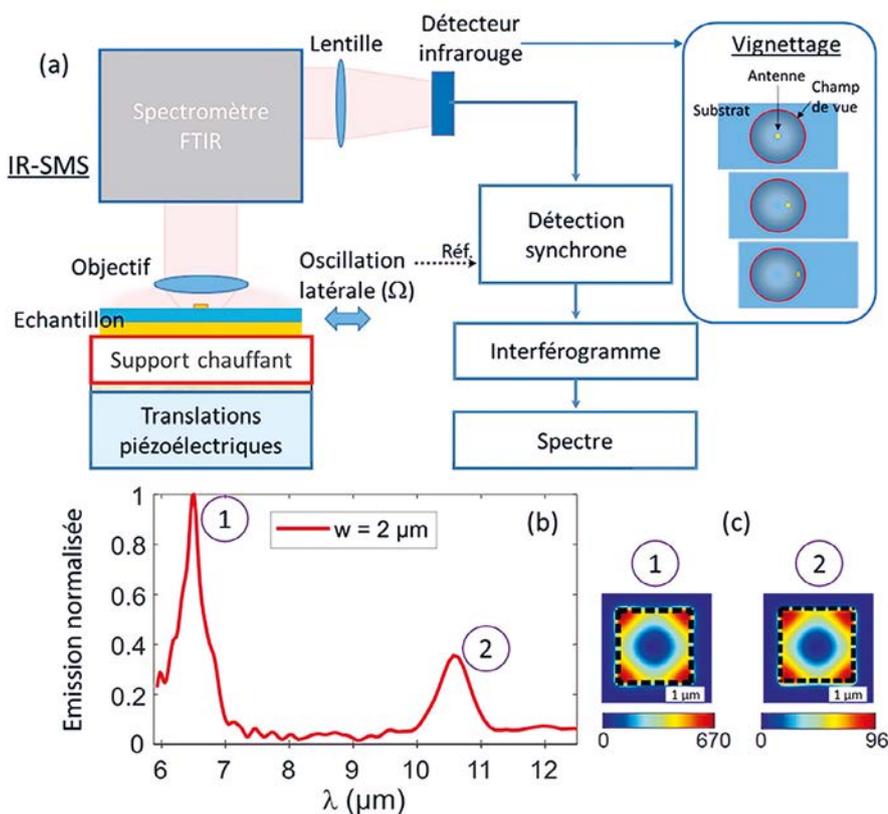
à différentes longueurs d'onde, ce qui explique la présence de deux pics dans les spectres d'émission thermique. Les cartes de champ calculées sous le carré métallique aux deux résonances confirment que la distribution spatiale des deux modes est bien la même.

ET DE LA RÉOLUTION EN IMAGERIE

Un microscope à effet tunnel à rayonnement thermique (TRSTM) permet de cartographier le rayonnement thermique de champ proche de ces antennes MIM. Cet instrument, initialement développé pour étudier la cohérence spatiale et temporelle du rayonnement thermique de champ proche associée aux polaritons de surface [6], est schématisé dans la figure 4. Ici, la pointe métallique d'une sonde locale à balayage analogue ●●●

Figure 3.

(a) Montage de spectroscopie infrarouge par modulation spatiale (IR-SMS) basé sur l'effet de vignettage qui se produit dans le champ de vue du détecteur infrarouge quand l'image de l'antenne s'écarte du centre de celui-ci. (b) Spectre d'émission thermique d'une antenne MIM de taille sub-longueur d'onde ($w=2\mu\text{m}$) obtenu en supprimant le fond thermique dominant par IR-SMS. (c) Cartes d'intensité du champ calculées sous le carré d'or d'une antenne MIM aux longueurs d'onde de résonance.



Interféromètre GEMINI

- Résolution Spectrale Variable**
Résolution spectrale inférieure à 1 nm
- Ultra Sensible**
pas de fente d'entrée
grande ouverture utile (diamètre 10mm)
- Plage Spectrale étendue**
250 – 3500 nm
Plage spectrale de fonctionnement

**Standards
PRODUITS
Customs**

Enceinte



Cabine de Protection Laser



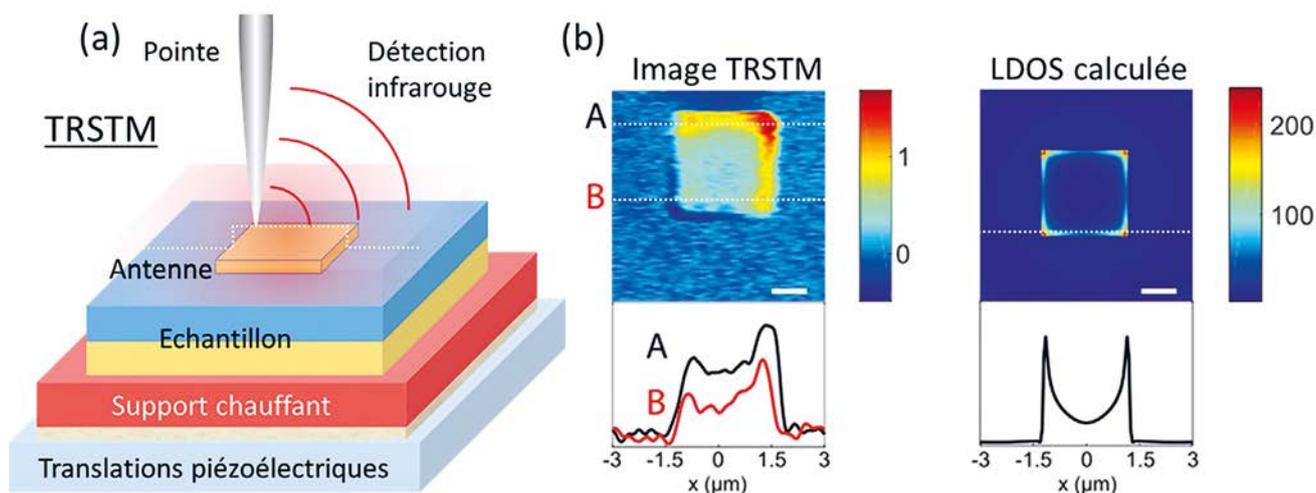


Figure 4.

(a) Schéma de principe du microscope à effet tunnel à rayonnement thermique (TRSTM). (b) Image TRSTM obtenues sur une antenne MIM ($w=2,4 \mu\text{m}$) et profils mesurés sur les bords de la structure. (c) Calcul de la densité locale d'états électromagnétique sur une antenne MIM de taille identique.

CONCLUSION

Les antennes plasmoniques offrent de multiples possibilités pour manipuler l'émission ou l'absorption de lumière dans l'infrarouge. La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier permet de caractériser l'émission thermique de métasurfaces comportant un nombre important d'antennes, mais se heurte à la présence d'un signal de fond parasite dominant lorsqu'il s'agit de caractériser le rayonnement thermique

d'une seule antenne. La spectroscopie infrarouge par modulation spatiale (IR-SMS) a permis de lever ce verrou pour mesurer le rayonnement thermique de nano-antennes MIM individuelles. La méthode est très générale et potentiellement applicable pour caractériser tout objet dont la taille n'excède pas quelques micromètres avec un spectromètre FTIR. La méthode IR-SMS est une méthode de champ lointain basée sur la détection de champs propagatifs. Le microscope à effet tunnel à rayonnement thermique (TRSTM) donne quant à lui accès aux propriétés du rayonnement thermique de champ proche grâce à l'emploi d'une pointe diffusante qui relaye l'information du champ présent à la surface de l'échantillon vers un système de détection infrarouge situé en champ lointain. ●

RÉFÉRENCES

- [1] J.-J. Greffet, R. Carminati, K. Joulain *et al.*, Y. Chen, *Nature* **416**, 61 (2002)
- [2] M. Makhsiyani, P. Bouchon, J. Jaeck *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **107**, 251103 (2015)
- [3] C. Li, V. Krachmalnicoff, P. Bouchon *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **121**, 243901 (2018)
- [4] D. Palaferri, Y. Todorov, A. Biglioli *et al.*, *Nature* **556**, 85 - 88 (2018)
- [5] A. Arbouet, D. Christofilos, N. Del Fatti *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 127401 (2004)
- [6] Y. De Wilde, F. Formanek, R. Carminati *et al.*, *Nature* **444**, 740 (2006)
- [7] R. Carminati, A. Cazé, D. Cao, F. Peragut, V. Krachmalnicoff, R. Pierrat, Y. De Wilde, *Surf. Sci. Rep.* **70**, 1 (2015)

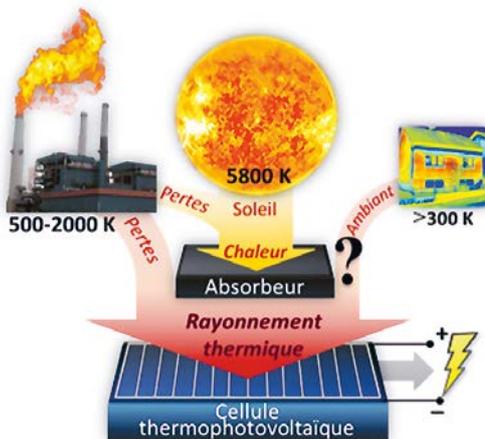
THERMOPHOTOVOLTAÏQUE : DES CELLULES PV POUR CONVERTIR LE RAYONNEMENT THERMIQUE

Pierre-Olivier CHAPUIS^{1*}, Christophe LUCCHESI¹, Rodolphe VAILLON²

¹ Centre d'Energétique et de Thermique de Lyon (CETHIL), CNRS – INSA Lyon – Université Claude-Bernard Lyon 1, INSA de Lyon, Villeurbanne, France

² IES, Univ Montpellier, CNRS, Montpellier, France

* olivier.chapuis@insa-lyon.fr



Les cellules solaires permettent de convertir le rayonnement du soleil en puissance électrique, mais le rayonnement thermique issu des corps chauds est une autre source d'énergie omniprésente dans le milieu ambiant qui peut être mise à profit. Les cellules dites thermophotovoltaïques convertissent en électricité ce rayonnement dans la gamme infrarouge avec des rendements attendus élevés.

<https://doi.org/10.1051/photon/202010537>

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

RÉCUPÉRONS L'ÉNERGIE THERMIQUE !

Le besoin en énergie électrique toujours croissant et la nécessité de la produire de manière décarbonée dans la mesure du possible sont à l'origine du regain d'intérêt pour les sources alternatives depuis une quinzaine d'années. Une partie importante de la puissance électrique pourrait idéalement être obtenue par récupération de l'énergie disponible dans le milieu ambiant. La récupération de l'énergie thermique, possible lorsqu'un corps possède une température supérieure à l'ambiante, peut se faire par conversion thermoélectrique, mais ceci requiert de maintenir une différence de température entre les deux faces d'un composant solide. Une alternative prometteuse est la

La loi de Wien stipule que la longueur d'onde du maximum du spectre du rayonnement thermique est $\lambda_{\max} = \frac{2898 \mu\text{m}\cdot\text{K}}{T}$, où T est la température (en kelvins). D'autre part, 98% de l'énergie rayonnée est située entre $\lambda_{\max}/2$ et $8\lambda_{\max}$. Autour de l'ambiante, la récupération du rayonnement thermique nécessiterait donc de convertir des photons de longueurs d'ondes proche de 10 μm . Malheureusement, les lois de la thermodynamique limitent la capacité à convertir la chaleur des sources proches de la température ambiante (T_0) puisque le rendement maximum de Carnot est $\eta_{\text{Carnot}} = (T_c - T_0)/T_c$ où T_c est la température du corps chaud. D'autre part, la loi de Stefan-Boltzmann indique que la puissance émise par un corps dépend de sa température à la puissance quatrième ($P \propto T^4$). Il est donc plus facile d'obtenir une puissance électrique significative pour des différences de températures plus importantes que quelques kelvins. Les dispositifs thermophotovoltaïques actuels sont basés sur des émetteurs thermiques de température supérieure à 100 °C, certains pouvant atteindre 2000 °C.

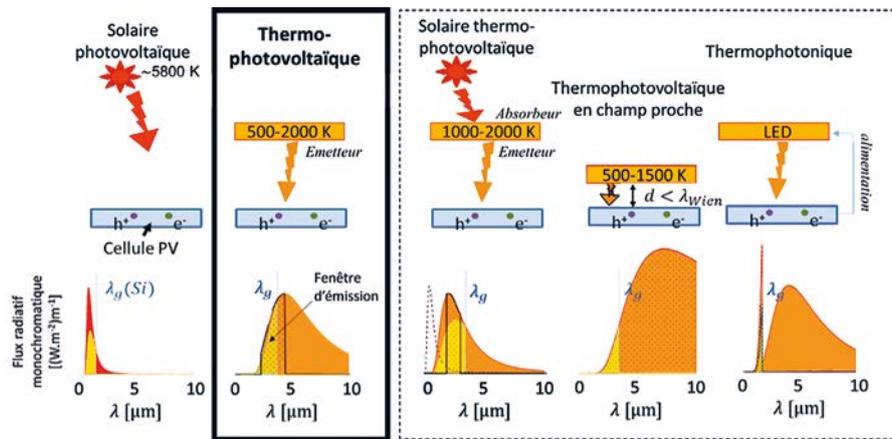


Figure 1. La famille des concepts thermophotovoltaïques.

conversion thermophotovoltaïque (TPV) permettant de convertir le flux radiatif issu d'un corps chaud, qui peut être éloigné du récupérateur, via une cellule photovoltaïque qui fonctionne dans l'infrarouge (voir Fig. 1) [1]. De multiples sources de chaleur (moteurs de véhicules, usines, etc.) pourraient être mises à profit.

PRINCIPE DE LA CONVERSION THERMOPHOTOVOLTAÏQUE

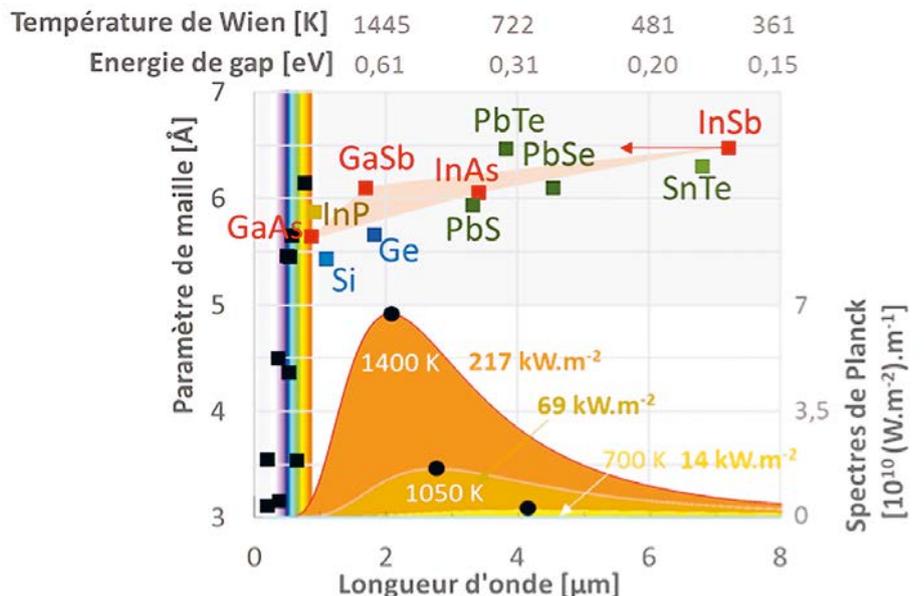
Un dispositif thermophotovoltaïque est composé d'un émetteur de rayonnement thermique chaud et d'une cellule TPV, typiquement une jonction p-n de température moins élevée (idéalement à la température ambiante). Il est important de bien saisir les différences entre les cellules solaires et les cellules TPV. Les cellules photovoltaïques (PV) solaires convertissent le rayonnement thermique du soleil assimilé à un corps noir rayonnant à une température de 5800 K (voir Fig. 1) : l'énergie est donc comprise entre 250 nm et plusieurs microns (les cellules PV au silicium convertissent la partie inférieure à 1,1 μm). Il est difficile de convertir efficacement un rayonnement incident dont le spectre est étalé : une cellule photovoltaïque fonctionne optimalement uniquement pour les photons juste en-dessous de la longueur d'onde de gap λ_g (la puissance qui peut être convertie pour chaque longueur d'onde est représentée en jaune sur la Fig. 1), et l'énergie d'un photon de longueur d'onde bien inférieure n'est pas

convertie intégralement en électricité puisque la différence à l'énergie de gap $hc/\lambda - hc/\lambda_g$ est perdue en chaleur. La conséquence est que le rendement maximum des cellules solaires actuelles en silicium n'atteint que ~30 % (proche du rendement maximum pour une cellule mono-jonction). Contrairement au cas du solaire photovoltaïque, il est possible de contrôler, au moins partiellement,

les propriétés radiatives (optiques) de la source chaude pour le TPV ou, si la source et la cellule sont suffisamment proches, de renvoyer le rayonnement non-converti par la cellule vers la source pour éviter une perte de rendement. Sur la figure 1, une partie seulement du rayonnement maximal qui peut être réceptionné (corps noir, en orange), la « fenêtre d'émission », est émise par le corps chaud. Ceci permet en principe d'optimiser le rayonnement émis par la source afin d'en convertir une grande partie, par exemple en concentrant la puissance émise juste en-dessous de la longueur d'onde de gap. Le rendement maximal théorique est alors proche de 100 % ! Mais cela signifie aussi que la puissance électrique générée est plus faible, puisque la fenêtre d'émission est alors réduite. Contrairement au cas du PV, rendement et puissance générée ne sont pas systématiquement proportionnels pour le TPV.

L'autre élément clé est la cellule TPV. Les matériaux dont l'énergie de gap est située dans l'infrarouge sont peu nombreux et certains, notamment InSb, doivent même être refroidis pour fonctionner (comme le sont les détecteurs IR). L'un des défis importants est de concevoir des cellules TPV qui fonctionnent aux températures proches de l'ambiante sans

Figure 2. Matériaux d'intérêt pour le thermophotovoltaïque (figure inspirée des travaux de l'IES).



être refroidies. La figure 2 indique que les matériaux thermoélectriques (repérés en vert) et les matériaux III-V (repérés en rouge), qui peuvent être épitaxiés sous forme d'alliages à base de In/Ga/As/Sb (zone rosée), sont adaptés à l'infrarouge. Dans un certain nombre de cas, des structures compliquées avec empilement de couches peuvent être nécessaires, ce qui impose une contrainte : seuls des matériaux de paramètres de maille proches peuvent en principe être combinés. Les puissances émises par les corps noirs (émetteurs parfaits) à haute température sont indiquées sur la figure 2, et sont à comparer au flux solaire maximal incident de $1,35 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ sur la surface terrestre. Le soleil est un astre qui apparaît très petit dans le ciel : l'angle solide sous lequel le rayonnement solaire direct est incident est très faible. En comparaison, une surface chaude pourra illuminer une cellule TPV avec un angle solide beaucoup plus grand, en raison de sa proximité, et générer des flux radiatifs beaucoup plus importants.

CONCEPTION DES ÉMETTEURS EN CHAMP LOINTAIN

L'un des éléments clés pour obtenir un rendement élevé est de concevoir un émetteur dont le spectre est accordé à celui qui peut être photoconverti par la cellule TPV. Il existe différents moyens pour modéliser le spectre échangé, et les possibilités ouvertes par la photonique sont immenses (structures MIM, structures planaires en réseau de croix, etc.) [2]. Nous allons détailler un cas simple, où la totalité du rayonnement de l'émetteur atteint la cellule. L'émissivité hémisphérique monochromatique d'un milieu semi-infini de surface lisse peut être reliée à ses coefficients de Fresnel $r_{p,\lambda}$:

$$\epsilon_\lambda = \int_{\theta \in [0, \frac{\pi}{2}]} \sum_{p=TE, TM} (1 - |r_{p,\lambda}|^2) \times \frac{\cos\theta \sin\theta d\theta d\phi}{2\pi} \quad (1)$$

où p est la polarisation, θ l'angle à la normale à la surface et ϕ l'angle azimutal. Le flux surfacique émis

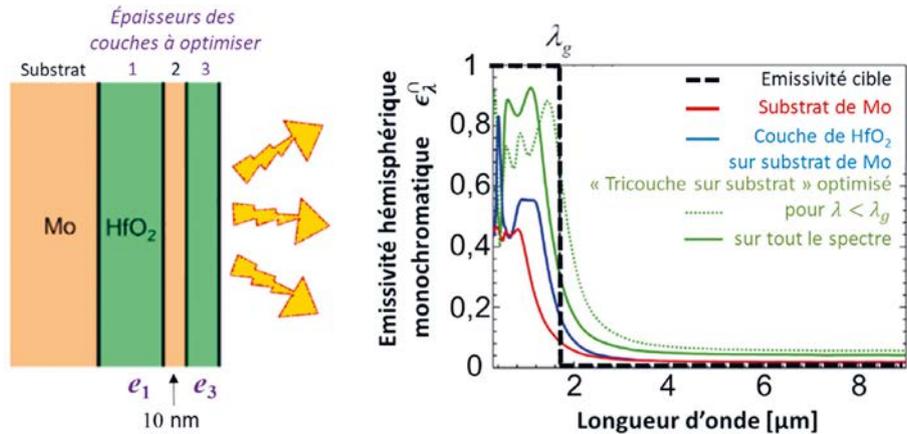


Figure 3.

Structure multicouche pour l'émission thermique optimisée dans une fenêtre $[0-\lambda_g]$ (figure détaillée dans [3]).

s'écrit alors :

$$\varphi = \int_{\lambda=0}^{+\infty} \epsilon_\lambda \cdot \varphi_{CN}(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

où le flux radiatif du corps noir $\varphi_{CN}(\lambda)$ est donné par la loi de Planck. Si le milieu n'est pas semi-infini et qu'il est par exemple constitué par un empilement de couches minces (voir Fig. 3), il suffit de remplacer les coefficients $r_{p,\lambda}$ de Fresnel par les coefficients de réflexion généralisés du matériau $R_{p,\lambda}$ (réflexion à la surface du matériau). Lorsque l'empilement est constitué d'un milieu transparent encapsulé entre deux métaux, on obtient une cavité de Fabry-Pérot qui n'émet qu'à certaines longueurs d'onde bien définies. Un objectif simple peut être d'obtenir un matériau d'émissivité maximale pour les photons convertibles par la cellule TPV (pour $\lambda < \lambda_g$) et minimale sous l'énergie de gap (pour $\lambda > \lambda_g$) de telle sorte qu'on ait une fenêtre d'émission similaire à celle représentée sur la figure 1. La figure 3 montre un exemple d'optimisation de l'émission. Même pour ces matériaux résistants à haute température, l'oxydation qui modifie les propriétés optiques reste un défi au-dessus de 1000°C .

QUELQUES APPLICATIONS

Les rendements de conversion TPV viennent d'atteindre 30 % pour des émetteurs vers 1200°C .

Diverses applications sont en plein développement.

L'une d'elles est la conversion *solaire thermophotovoltaïque* [4], qui a été développée pour contourner la limite de rendement des cellules solaires (Fig. 1). Il s'agit tout d'abord d'absorber l'entière du rayonnement solaire (par exemple avec un matériau noir) afin de chauffer un composant (absorbant-émetteur) qui réémet un rayonnement vers la cellule TPV avec un spectre idéal (fenêtre proche du gap) pour qu'il puisse être converti en électricité. En principe, ce système permet un rendement très élevé. En pratique, les problèmes à régler sont les suivants : le matériau absorbant le flux solaire ne doit pas réémettre de rayonnement vers l'atmosphère (il doit donc avoir une émissivité élevée dans le visible mais faible dans le proche infrarouge), il ne doit pas y avoir de pertes thermiques dans l'air autour de l'absorbant-émetteur ni de pertes par conduction thermique vers les supports. Enfin, la cellule ne doit pas chauffer sous peine d'avoir un rendement dégradé.

L'intermittence des énergies renouvelables requiert de développer des moyens de stockage de quantités d'énergie importantes pour que la distribution ne soit pas interrompue. L'un des moyens envisagés est le *stockage d'énergie sous forme de chaleur à haute température*, celle-ci pouvant être obtenue quasiment sans perte à partir de l'électricité. Ceci requiert de fondre un matériau en le ●●●

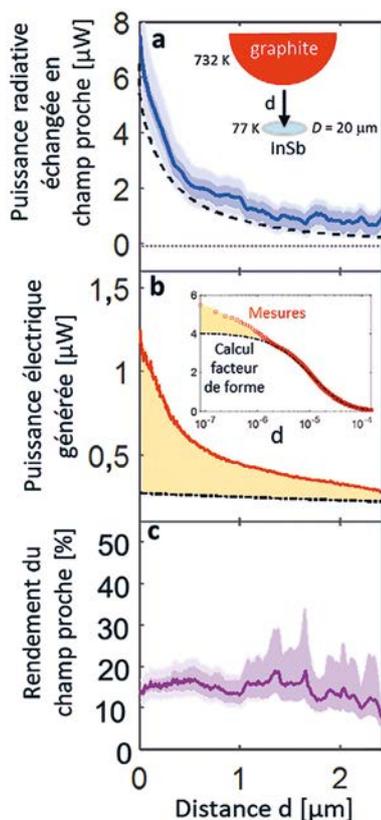


Figure 4.

Conversion thermophotovoltaïque en champ proche : puissance radiative échangée, puissance électrique générée et rendement (rapport) en fonction de la distance.

chauffant et de le stocker ensuite à haute température sous forme liquide dans une enceinte bien isolée. La fusion étant un changement d'état qui met en jeu des énergies très élevées, la possibilité de décider quand le matériau doit refroidir et donc relâcher une partie de cette énergie est une des clés du stockage. L'autre point clé est la reconversion de la chaleur en électricité. Permettre au matériau de rayonner et convertir ce flux par voie thermophotovoltaïque est l'une des voies qui est explorée, notamment en Europe par les membres du projet AMADEUS (<https://amadeus-project.eu>).

Enfin, le déploiement attendu de l'internet des objets requiert d'alimenter électriquement de nombreux dispositifs nomades (*wireless*), notamment les capteurs de consommation électrique modérée. L'alimentation

thermophotovoltaïque est envisageable dans un certain nombre de cas.

NOUVELLES APPROCHES POUR AUGMENTER LA DENSITÉ DE PUISSANCE

L'un des points limitants du thermophotovoltaïque est que la puissance rayonnée est bornée par celle du corps noir ($\varphi = \int_{\lambda=0}^{+\infty} \varphi_{CN}(\lambda) d\lambda = \sigma T_C^4$ où σ est la constante de Stefan-Boltzmann) : à 300 K, celle-ci ne vaut que 0,46 kW.m⁻². La première approche pour dépasser cette borne repose sur l'effet tunnel de photons, aussi appelé *rayonnement en champ proche*. La loi de Planck ne s'applique qu'aux ondes propagatives (optique géométrique), alors que les corps situés à des distances inférieures à la longueur d'onde échangent, via le couplage d'ondes évanescentes, des puissances bien supérieures (voir Fig. 1). Ce fait a été clarifié théoriquement dans les années 1970 et a été l'objet de nombreuses démonstrations expérimentales depuis une dizaine d'années. La figure 4 présente une application au TPV obtenue en collaboration avec l'Institut d'Electronique et des Systèmes (IES) à Montpellier. On observe une grande augmentation de la puissance radiative perdue par le corps chaud lorsque l'on approche la cellule, bien supérieure à ce que prédit la théorie macroscopique du rayonnement thermique, et la puissance électrique générée par la cellule TPV augmente parallèlement, bien plus que ne le prédit le facteur de forme macroscopique (voir insert). En divisant ces deux puissances, on

obtient un rendement de conversion en champ proche de l'ordre de 15 %. Nous avons montré qu'une densité de puissance de 7,5 kW.m⁻² peut être générée pour une différence de température proche de 650 K, du même ordre de grandeur que certains modules thermoélectriques aujourd'hui répandus [5].

Un autre moyen de dépasser la limite du corps noir est de forcer le corps chaud à émettre à une certaine longueur d'onde en y concentrant l'énergie, à la manière d'une diode électroluminescente (LED). La figure 1 présente le concept appelé *thermophotonique*, objet du projet européen TPX-Power. Il consiste à accorder la luminescence de l'émetteur thermique (LED), cette fois-ci contrôlé électriquement, au spectre que la cellule TPV peut convertir. L'intérêt du concept réside dans le fait que l'énergie électrique nécessaire pour alimenter la LED peut être issue de celle qui est produite par la cellule TPV, afin qu'il n'y ait pas besoin d'alimentation électrique extérieure. La concentration de l'énergie dans une bande spectrale limitée permet d'envisager des densités de puissance très élevées tout en maintenant un rendement proche de l'unité.

REMERCIEMENTS :

Ces travaux ont été effectués avec E. Blandre, M. Shimizu et O. Merchiers au CETHIL, D. Cakiroglu, J.-P. Perez, T. Taliencio et E. Tournié à l'IES. Ils ont reçu le soutien financier de l'ANR (projet DEMO-NFR-TPV), de l'INSA (BQR RedCav) et de l'Union Européenne (EFINED et TPX-Power). ●

RÉFÉRENCES

- [1] T. Bauer, *Thermophotovoltaics: Basic Principles and Critical Aspects of System Design*, Springer (2011)
- [2] E. Nefzaoui, J. Devillon, K. Joulain, *J. Appl. Phys.* **111**, 084316 (2012)
- [3] E. Blandre, M. Shimizu, A. Kohiyama *et al.*, *Opt. Express* **26**, 4346 (2018)
- [4] D.M. Bierman, A. Lenert, W.R. Chan *et al.*, *Nat. Energy* **1**, 16068 (2016)
- [5] C. Lucchesi, D. Cakiroglu, J.-P. Perez *et al.*, arXiv:1912.09394 (2019)

LE RAYONNEMENT THERMIQUE EN ASTROPHYSIQUE

Marc Sauvage

CEA/DRF/Irfu/Département d'Astrophysique, CEA Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex
marc.sauvage@cea.fr



Le rayonnement thermique est une source décisive d'informations pour une science de l'observation comme l'astrophysique. Dominant dans l'infrarouge lointain, il est difficile à mesurer, et nécessite le développement de détecteurs innovants et de techniques cryogéniques de pointe. Mise en œuvre à bord de satellite depuis 40 ans, la mesure du rayonnement thermique a permis de nombreuses découvertes liées à la formation stellaire et à l'évolution des galaxies.

<https://doi.org/10.1051/photon/202010541>

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

©ESA/Herschel/PACS, SPIRE/Hi-GAL Project - Acknowledgement: G. Li Causi, IAPS/INAF, Italy

Le rayonnement d'origine thermique, résultant d'une émission de type corps-noir, éventuellement modifiée par une émissivité spécifique, constitue l'essentiel de l'information qui nous provient de l'espace. Il suffit par exemple de réaliser que la plus grande fraction de l'émission des étoiles est un processus thermique lié à la température de surface des étoiles, ou de se souvenir que le rayonnement du fond cosmologique est fort justement décrit comme celui d'un corps noir à 2.7 K, vestige de l'émission thermique du plasma qui remplissait l'Univers au moment de la dernière recombinaison. Évidemment, le spectre de tout objet astrophysique présente

en général une grande somme de raies atomiques ou moléculaires extrêmement importantes pour comprendre la physique de ces objets, mais ces motifs ne contribuent en général que peu à l'énergie totale émise par ces différentes sources. Le processus d'émission thermique est donc d'une importance majeure en astrophysique.

Cela dit, comme souvent en astrophysique, des termes apparemment génériques sont utilisés dans une acception plus restreinte, et c'est le cas du rayonnement thermique, qui est très souvent un raccourci pour rayonnement thermique infrarouge. Et c'est bien dans cette acception restreinte que cet article est rédigé. Pour préciser encore les termes, le domaine infrarouge dont nous

parlons s'étend approximativement de 50 μm à 500 μm (le rayonnement de fond cosmologique est donc plutôt situé dans le domaine millimétrique et submillimétrique, il a d'ailleurs été découvert avec une technologie issue de la radio).

SOURCES DU RAYONNEMENT THERMIQUE

L'objet astronomique à l'origine de la quasi-totalité du rayonnement thermique infrarouge ne mesure que quelques μm ou dizaine de microns et porte un nom assez peu spécifique : la poussière interstellaire. Celle-ci est composée essentiellement de carbone et de silicium, dans des états parfois cristallins mais souvent amorphes, sous forme de grains qui peuvent être recouverts de ●●●

manteaux de glace ou de composés organiques. Anecdote du point de vue de la quantité de matière qu'elle représente (dans une galaxie comme la nôtre, la poussière interstellaire constitue au mieux 1/1000^{ème} de la masse lumineuse, c'est-à-dire la masse qui peut être mesurée par le biais de son émission, au contraire de la matière noire, plus abondante, mais mesurable uniquement par son action gravitationnelle), la poussière interstellaire tire son importance de deux propriétés principales: d'une part, en évoluant à des températures situées entre la dizaine de K et 1500 K (température de sublimation), elle produit un rayonnement thermique qui couvre un vaste domaine du spectre électromagnétique, et d'autre part elle se trouve intimement mêlée à un grand nombre d'objets et de processus astrophysiques dont son émission constitue parfois l'unique trace.

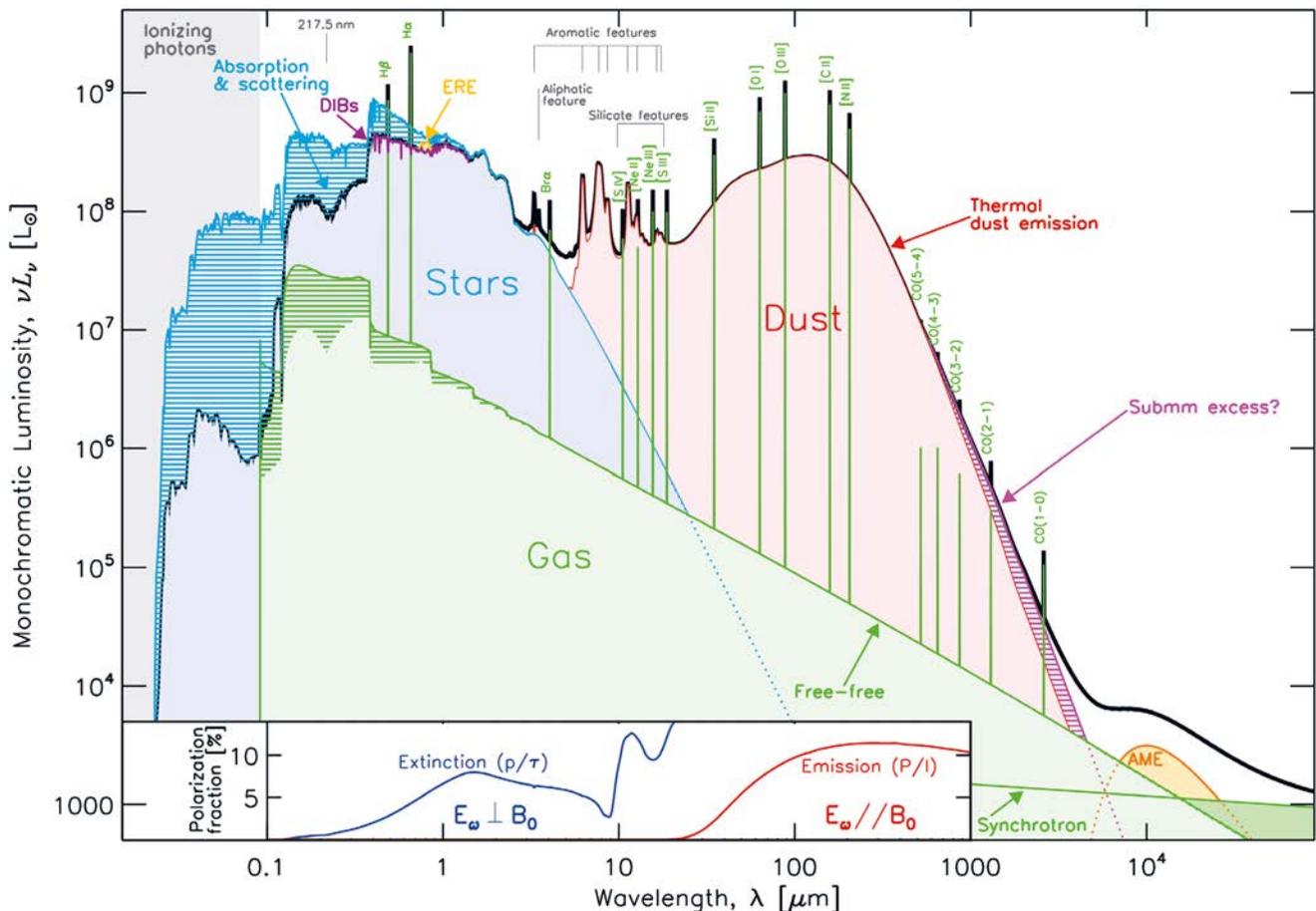
Tous les objets associés au processus de formation des étoiles et des planètes peuvent être étudiés grâce à l'émission thermique de la poussière interstellaire. Pour partir du plus vaste, la poussière est bien entendue présente dans les grands nuages de gaz dont l'effondrement engendre les nouvelles générations d'étoiles, et c'est *via* l'observation de la poussière qu'a été mise en évidence une étape clef

Figure 1.

Un modèle du spectre standard d'une galaxie montrant l'importance du rayonnement thermique: sur la droite de la figure, l'émission de la poussière ("dust") dont la majeure partie est une émission strictement thermique. Le grand massif sur la gauche ("stars") correspond à l'émission cumulée des étoiles. Si la source de cette énergie est la fusion thermonucléaire, le processus d'émission de l'énergie collectée est lui aussi thermique comme le montre l'allure générale du spectre. © F. Galliano, CEA/CNRS, communication privée.

de la formation des étoiles : la structuration des nuages interstellaires en réseau de filaments. Cette structuration universelle, visible sur la figure 2, découverte par le satellite, Herschel tire vraisemblablement son origine de processus turbulents dans lesquels gravité et champ magnétique entretiennent des rapports complexes. Elle constitue le premier pas vers la formation de régions denses et massives dans lesquelles les protoétoiles apparaissent. Du fait de la quasi-absence de source d'énergie dans ces nuages, les températures qui y règnent sont autour de 10 K ce qui fait de l'émission thermique des poussières un outil idéal pour sonder la matière.

C'est l'occasion de signaler un autre intérêt du rayonnement thermique infrarouge, à savoir sa capacité à traverser de grandes quantités de matière sans être absorbé, ce qui nous permet de recueillir des informations en provenance d'objets enfouis dans





la matière comme justement les protoétoiles. En effet, ces étoiles en formation sont tellement enfouies dans leur cocon de matière que seul le rayonnement thermique de la poussière chauffée par la dissipation de l'énergie gravitationnelle nous parvient. C'est grâce à ce rayonnement que l'on a pu identifier que les étoiles naissent le plus généralement dans des systèmes multiples, mais surtout, en combinant rayonnement thermique et interférométrie, que l'on a découvert les disques qui les entourent, par lesquels transite la matière avant de s'accumuler sur l'étoile, et dans lesquels se forment les planètes que l'on observe aujourd'hui par milliers autour d'étoiles plus évoluées, sorties de leurs nuages natals.

OBSERVER LE RAYONNEMENT THERMIQUE

Comme nous l'avons dit la physique de ce rayonnement est simple, c'est celle de l'émission du corps noir. Il va donc de soi que lorsque l'on place un détecteur infrarouge au foyer d'un télescope, celui-ci va certes recueillir le rayonnement infrarouge en provenance de l'univers lointain, mais aussi celui de tout objet situé sur la ligne de visée dont la température est telle que son émission thermique couvre le domaine infrarouge. Pour les observatoires au sol, le premier de ces objets est bien entendu l'atmosphère, en général plus d'un million de fois plus brillante que le plus brillant des objets astrophysiques, mais il faut aussi compter parmi les perturbateurs les miroirs de télescope

Figure 2.

Nuages de formation d'étoiles dans la région Vela C dans notre galaxie, cartographiés par Herschel. La couleur code la température, avec en bleu les régions les plus chaudes, où de jeunes étoiles sont en train de disperser leur cocon de matière interstellaire, et en rouge des filaments de poussière plus froids où sont en train de se condenser les futures générations d'étoiles. ©ESA/PACS & SPIRE Consortia, T. Hill, F. Motte, Laboratoire AIM Paris-Saclay, CEA/IRFU – CNRS/INSU – Uni. Paris Diderot, HOBYS Key Programme Consortium.

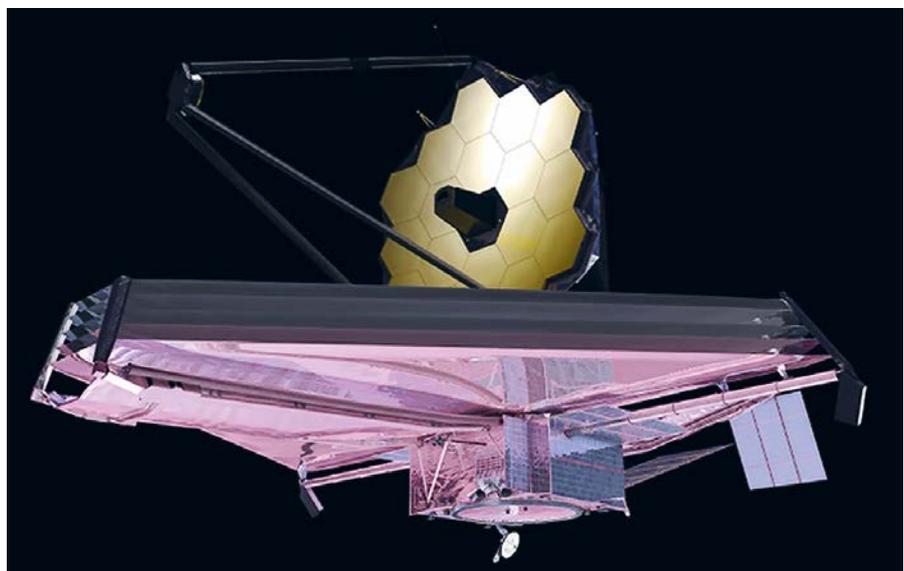
Figure 3.

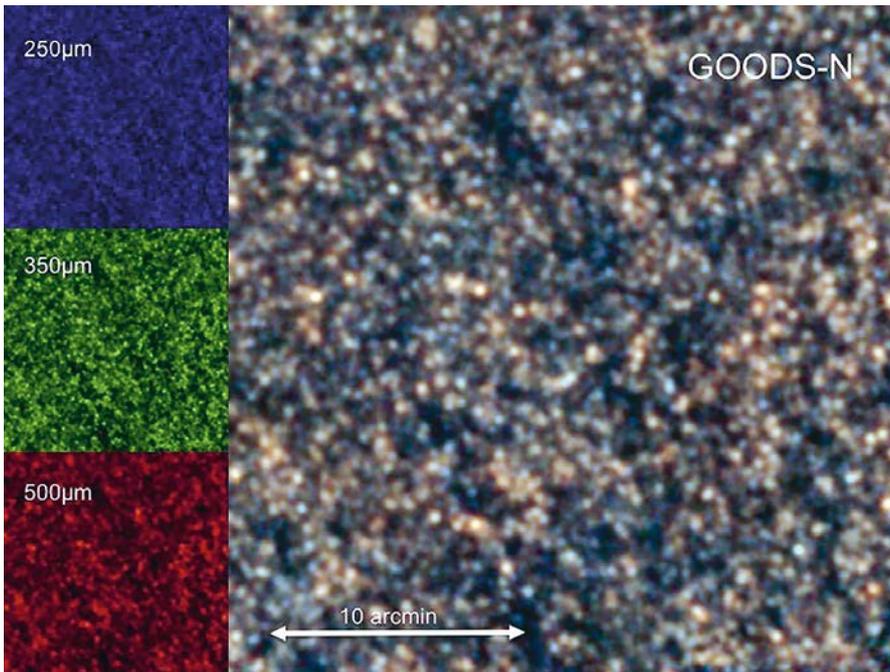
Représentation numérique du James Webb Space Telescope une fois déployé et opérationnel. Au premier plan les 5 voiles déployées (en rose sur cette figure) constituent le système d'écran en V-grooves qui protège le télescope du rayonnement solaire et permet de le maintenir à une température de 40 K en optimisant la réjection du rayonnement à l'opposé du miroir. © Northrop Grumman.

ainsi que tous les éléments optiques (miroirs, filtres...) que contient tout instrument de mesure.

Pour ces raisons, même si les premiers développements de l'observation du rayonnement thermique ont été réalisés au sol, très rapidement le spatial, ou l'aéroporté (télescope embarqué dans un avion) sont devenus des techniques de choix pour ce domaine de l'astrophysique. L'environnement spatial apporte d'emblée deux éléments clés pour le domaine infrarouge. D'une part l'absence d'atmosphère permet une bien meilleure stabilité, de longues séquences d'observations et donc la capacité de cartographier des grandes zones du ciel (ce que la forte variabilité temporelle de l'atmosphère interdit). D'autre part, la température d'équilibre dans l'espace au niveau de l'orbite terrestre (environ 150–200 K suivant l'orientation par rapport au soleil) vient déjà diminuer l'émission thermique des objets techniques nécessaires à l'observation.

Mais ces faibles températures ne suffisent pas à assurer des conditions optimales d'observation dans le domaine infrarouge et toutes les missions spatiales infrarouges ont déployé un vaste ensemble de techniques cryogéniques pour refroidir encore plus les éléments clés (télescope, instruments). Celles-ci se ●●●





divisent en deux branches, passives et actives. Les techniques passives consistent à optimiser le refroidissement par rayonnement du satellite au moyen d'écrans interposés entre les éléments clefs du satellite et le soleil, en jouant sur les propriétés d'absorption et de réflexion des matériaux ainsi que sur la géométrie 3D des écrans pour maximiser les pertes thermiques. Un exemple tout à fait spectaculaire de cette stratégie est le JWST avec sa structure déployable d'écrans qui permet d'atteindre pour le télescope de 6 m de diamètre une température de 40 K.

Pour atteindre des températures plus basses (et on verra que les détecteurs les plus sensibles nécessitent des températures inférieures au K), l'observation spatiale infrarouge demande d'embarquer des systèmes cryogéniques actifs. Le plus simple d'entre eux est évidemment le cryostat et, par exemple, l'observatoire spatial Herschel a embarqué un cryostat de 2000 L d'hélium liquide pour maintenir ses instruments à une température aux alentours de 2 K par la vaporisation contrôlée de l'hélium. La suite de la descente en froid est en général assurée par des

Figure 4.

Une image d'un champ profond observé par l'instrument SPIRE du satellite. Sur cette image, dont la taille angulaire correspond à peu près à celle de la pleine Lune, chaque point est une galaxie distante. Par effet de décalage spectral dû à l'expansion de l'univers, les sources les plus rouges correspondent aux galaxies les plus distantes. C'est en analysant ce type d'images que l'on a pu établir l'histoire des galaxies sur pratiquement les 2/3 de la durée d'existence de l'Univers. © ESA/SPIRE Consortium/HerMES Key Programme Consortium.

machines à cycle fermé, comme dans le cas d'Herschel un cryo-réfrigérateur développé au CEA.

La cryogénie est donc une technique essentielle pour l'observation infrarouge, et avec le développement de détecteurs innovants, l'un des postes les plus critiques du développement d'un satellite infrarouge, du fait des contraintes de poids, de puissance qui limitent les capacités des systèmes, et de la difficulté de gérer les problèmes de thermique dans le vide. Jusqu'ici tous les observatoires spatiaux infrarouges ont eu une durée de vie limitée par la quantité de fluide cryogénique qu'ils ont pu emporter pour assurer les premiers

« étages » du refroidissement (la masse totale du satellite étant, elle, limitée par la capacité du lanceur). Par exemple l'observatoire Herschel a eu une durée de vie de 4 ans, quand des observatoires dans le domaine X, dont le seul consommable est le gaz qui sert à manœuvrer le satellite, peuvent avoir des durées de vie de plusieurs décennies. Étant donné l'investissement conséquent que représente une mission spatiale (plus d'un milliard d'Euros pour Herschel), maximiser la durée de vie des satellites infrarouges représente un intérêt considérable et c'est pour cela que des systèmes en cycle fermé sont aujourd'hui activement développés.

DÉTECTER LE RAYONNEMENT THERMIQUE

Dernier intermédiaire dans l'observation du rayonnement thermique, ou premier suivant le point de vue que l'on choisit d'adopter : le détecteur. Un grand nombre de technologies ont été développées pour mesurer le rayonnement infrarouge thermique mais la complexité de cette tâche vient du fait qu'aux alentours de 50–100 µm, la technologie des photoconducteurs a cessé d'être efficace, alors que les technologies radios, et en particulier la détection hétérodyne, ne sont pas encore capables de prendre le relais. C'est pour cela que la technique privilégiée est celle du bolomètre. En peu de mots, un bolomètre est un détecteur où l'on utilise l'élévation de la température d'un matériau consécutive à l'absorption du rayonnement pour mesurer la puissance de ce rayonnement. Pour mesurer ces élévations de température, le bolomètre est en général une résistance variable avec la température que l'on place dans un circuit pour pouvoir transformer les variations de température en variations de tension. Cette résistance doit aussi être connectée à un bain thermique pour que la puissance absorbée puisse être évacuée et éviter que le bolomètre ne sature. Évidemment, puisque l'on parle de puissance absorbée dans

le domaine infrarouge, les quantités d'énergie portées par les photons sont extrêmement faibles, et c'est pour cette raison que les détecteurs eux-mêmes doivent être maintenus à des températures proches du zéro absolu, typiquement entre 50 et 300 mK.

Les deux instruments d'imagerie à bord d'Herschel, SPIRE et PACS, fonctionnaient avec des bolomètres, comme l'instrument HFI à bord du satellite Planck.

Il existe plusieurs types de bolomètres qui se distinguent principalement par la technologie utilisée pour réaliser l'élément dont les propriétés vont varier avec la température. Un des moyens de réaliser un « thermomètre » très sensible est de le réaliser dans un matériau supraconducteur à très basse température (c'est la lignée technologique des Transition Edge Sensors). En maintenant ce thermomètre à une température proche de sa transition, l'absorption d'une très faible quantité d'énergie suffit à faire sortir le matériau de son état supraconducteur et donc faire varier très sensiblement sa résistance. Évidemment la mise en œuvre de ces technologies de détection est bien plus complexe que ces quelques lignes de description, ce qui fait des « caméras » qui ont équipé les satellites infrarouges et submillimétriques des chefs-d'œuvre de technologie.

UN RÉSULTAT SCIENTIFIQUE MAJEUR

Il y a évidemment une injustice flagrante à ne retenir de presque 40 ans d'exploration spatiale de l'émission infrarouge thermique qu'un seul résultat obtenu par le dernier représentant en date de cette lignée, le satellite Herschel, mais l'exhaustivité est bien entendu inatteignable, et le lecteur intéressé pourra par exemple consulter le document produit par l'ESA à la fin de la mission Herschel (<https://sci.esa.int/web/herschel/-/61336-herschel-science-and-legacy-brochure>).

Ce résultat concerne l'évolution des galaxies. Pour l'astrophysicien, étudier l'évolution des galaxies c'est établir l'histoire de la formation des étoiles dans les galaxies, ainsi que recenser les populations de galaxies (par type, taille ou masse) au fil du temps.

Comment l'émission thermique des poussières interstellaires se retrouve-t-elle associée à ce genre d'étude ? La raison profonde est que la poussière interstellaire agit un peu comme un calorimètre pour les galaxies : diffuse dans toute la galaxie, elle absorbe une partie du rayonnement produit par les étoiles, et sa luminosité est en quelque sorte une mesure de l'intensité de ce rayonnement, et donc de la population stellaire de la galaxie. Comme celle-ci, aux échelles de temps considérées, est dominée par les étoiles jeunes et massives, à l'échelle des galaxies, le rayonnement de la poussière est statistiquement un bon indicateur du taux de formation d'étoiles. Ainsi le satellite Herschel a procédé à des cartographies profondes de l'univers, détectant les galaxies dont l'émission se produisait alors que l'Univers n'avait qu'une fraction de son âge actuel. Ces études ont permis d'établir avec certitude que l'époque du maximum d'activité de formation d'étoiles dans l'univers a été atteinte il y a environ 10 milliards d'années, mais surtout, grâce à la capacité d'Herschel à distinguer des détails fins, que même à cette époque, la plus grande partie des étoiles se formaient dans des galaxies où les conditions physiques étaient proches de celles qui règnent actuellement dans la Voie Lactée, et non au sein de quelques grandes collisions de galaxies comme on le pensait jusque dans les années 2000.

CONCLUSION

Quatre décennies de collecte et d'interprétation des informations transportées par le rayonnement thermique infrarouge en provenance de l'Univers nous ont permis une compréhension fine des processus de formation des étoiles, des planètes, et de l'évolution des galaxies. Mais comme bien souvent en recherche, la compréhension ouvre sur de nouvelles questions, et pour cela il nous faudra affiner nos moyens d'étude, par exemple en augmentant la résolution spatiale à l'aide de plus grands miroirs ou d'interféromètres, ou en exploitant d'autres propriétés de l'émission thermique comme sa polarisation, intimement liée à la présence de champ magnétique dans les objets astrophysiques, lui-même au cœur de la structuration de la matière dans l'Univers. ●

Laser Optics
When Size Matters

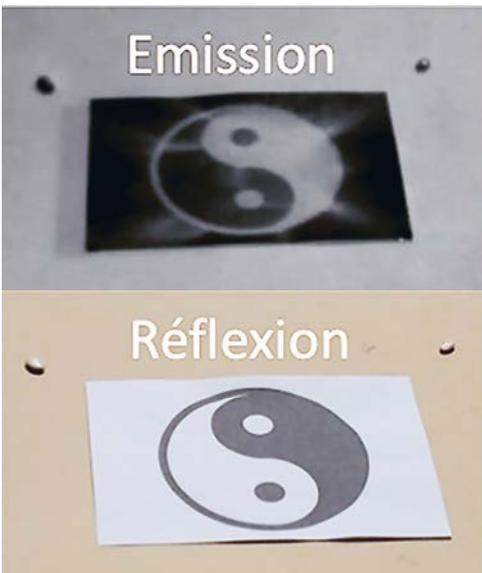


Large custom laser optics with highest damage threshold.

LA LOI DE KIRCHHOFF

Jean-Jacques GREFFET

Université Paris-Saclay, Institut d'Optique Graduate School, CNRS, Laboratoire Charles Fabry, 91127 Palaiseau, France
jean-jacques.greffet@institutoptique.fr



L'incandescence est le phénomène d'émission de rayonnement par des corps chauffés. L'aptitude d'un corps à émettre de la lumière a été reliée à son absorptivité par Kirchhoff. Ce texte retrace l'évolution de cette loi depuis son introduction en 1860 dans le cadre de l'optique géométrique, les développements qui ont suivi lorsqu'elle a pu être revisitée dans un cadre d'électromagnétisme stochastique, aux échelles nanométriques et enfin dans des situations hors équilibre telles que des semiconducteurs pompés électriquement.

<https://doi.org/10.1051/phys/202010546>

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

L'incandescence est souvent associée à l'éclairage par filament incandescent. Avant d'être une technologie d'éclairage, le rayonnement du corps noir a longtemps été une énigme scientifique. L'étude thermodynamique du rayonnement a conduit Planck à introduire sa célèbre constante h . Aujourd'hui, les mesures du rayonnement émis par les étoiles ou du fond cosmologique continuent à jouer un rôle essentiel en astrophysique et en cosmologie. À de plus petites échelles de taille, le rayonnement thermique nous a réservé de nombreuses surprises avec l'avènement des nanosciences. Nous avons appris à le rendre spectralement étroit, directionnel et à augmenter les flux d'énergie bien au-delà de celui d'un corps noir.

Dans tous ces exemples, la loi de Kirchhoff est le concept de base utilisé pour décrire l'émission. Le but de cet article est de présenter un bref aperçu historique de la formulation de la loi de Kirchhoff qui date de 1860 puis de montrer comment cette loi a été comprise, réinterprétée et généralisée plusieurs fois.

LA LOI DE KIRCHHOFF : UN APERÇU HISTORIQUE

En 1860, G. Kirchhoff a publié dans Poggendorf Annalen, un article intitulé « Sur la relation entre la puissance radiante et la puissance absorbée de différents corps pour la lumière et la chaleur ». Une traduction anglaise est disponible [1]. Dès le début de son article, Kirchhoff rappelle qu'à l'équilibre, la puissance totale émise doit être égale à la puissance totale absorbée du fait

de la conservation de l'énergie. La question qu'il traite est celle de l'égalité entre l'absorptivité et l'émissivité pour une fréquence, une polarisation et un angle d'incidence donnés, ce que nous pourrions appeler aujourd'hui un bilan détaillé.

Ce questionnement est notamment motivé par l'observation du doublet du sodium brillant en émission et sombre en transmission pour les deux fréquences du doublet. Dans son raisonnement, il est amené à introduire le désormais célèbre « corps noir » qui est défini comme un corps ayant une surface parfaitement absorbante à toute longueur d'onde. Il utilise des bilans d'énergie sur des systèmes comportant un corps à l'intérieur d'une enceinte qui comporte de petites ouvertures munies de polariseurs et de filtres. L'analyse des flux échangés, qui est menée dans

le cadre de l'optique géométrique, le conduit à utiliser la réciprocité de Helmholtz. La formulation de sa loi en notations modernes est :

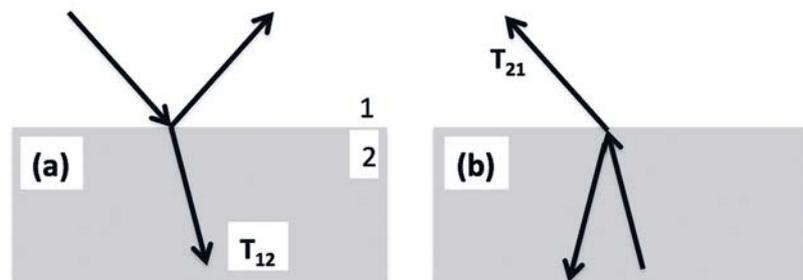
$$\varepsilon(\nu, \mathbf{u}, l) = \alpha(\nu, -\mathbf{u}, l)$$

où l'absorptivité $\alpha(\nu, -\mathbf{u}, l)$ est la fraction absorbée de la puissance incidente de fréquence ν , se propageant dans la direction $-\mathbf{u}$, et de polarisation l et $\varepsilon(\nu, \mathbf{u}, l)$ est l'émissivité du corps de température T définie par $L^\circ(\nu, \mathbf{u}, l, T) = \varepsilon(\nu, \mathbf{u}, l) L^\circ(\nu, T)$, où $L^\circ(\nu, \mathbf{u}, l, T)$ est la luminance émise et $L^\circ(\nu, T)$ est la luminance du rayonnement à l'équilibre thermodynamique à T . On voit ainsi qu'un corps noir ($\alpha(\nu, \mathbf{u}, l) = 1$) émet une luminance égale à la luminance du rayonnement d'équilibre ce qui explique que ces deux notions soient souvent interchangeables dans l'usage courant. Cette loi est illustrée par l'image du Yin et du Yang effectuée avec de la peinture noire sur du papier blanc (voir la figure en début d'article). Les zones brillantes observées en émission infrarouge avec une caméra thermique fonctionnant dans la bande 8–12 μm sont celles qui correspondent à la peinture noire qui absorbe fortement dans cette bande. Notons que lorsque Kirchhoff établit cette loi en 1860, Planck n'avait pas encore établi la luminance du rayonnement à l'équilibre. Rappelons également que le traité d'électricité et de magnétisme de Maxwell date de 1873.

L'approche adoptée par Kirchhoff repose sur des bilans d'énergie et ne donne aucun indice sur les mécanismes physiques responsables de l'émission et de l'absorption. Dans le postscriptum qui apparaît dans la traduction anglaise de l'article, Kirchhoff rapporte avoir eu une correspondance avec Stokes qui lui a suggéré une explication « mécanique » à la relation existant entre absorption et émission. Nous dirions aujourd'hui que l'émission spontanée et l'absorption sont toutes deux décrites au moyen du même élément de matrice décrivant la transition entre deux niveaux d'énergie.

Il y a donc d'un côté, le phénomène d'émission qui est de nature thermodynamique ou statistique, de l'autre un phénomène d'absorption par un corps éclairé par une onde cohérente. La loi de Kirchhoff établit un pont entre la thermodynamique et l'optique cohérente, rendu nécessaire par la conservation de l'énergie mais sans nous en fournir le mécanisme physique sous-jacent.

COMPRENDRE LA LOI DE KIRCHHOFF EN DEUX SCHÉMAS



On considère une interface séparant du vide (milieu 1) d'un milieu absorbant semi infini (milieu 2). Sur la figure (a), un rayon est partiellement transmis et partiellement réfléchi. L'énergie transmise sera absorbée dans le milieu 2 qui est semi infini. Il en résulte qu'il y a identité entre l'absorptivité du corps α et le facteur de transmission T_{12} en intensité du milieu 1 vers le milieu 2. Sur la figure (b), on représente le milieu 2 qui est à l'équilibre thermodynamique local à la température T de sorte que la matière et le rayonnement sont en équilibre. Il existe ainsi dans ce milieu un rayonnement qui peut se propager vers l'interface quand bien même ce serait sur de faibles distances si le milieu est très absorbant. Lorsqu'un rayon atteint l'interface (voir Fig.b), il est partiellement transmis et partiellement réfléchi. La partie transmise est ainsi proportionnelle au facteur de transmission T_{21} et à la luminance du corps noir à la température du corps. Le facteur de transmission T_{21} peut donc s'identifier à l'émissivité. Du fait de la réciprocité de Helmholtz, $T_{12} = T_{21}$ ce qui entraîne $\alpha = \varepsilon$. On voit ainsi pourquoi la réciprocité joue un rôle essentiel dans la loi de Kirchhoff: l'absorptivité et l'émissivité traduisent toutes deux la transmission entre l'intérieur et l'extérieur du corps émetteur.

Avec cette image, l'émissivité d'un corps est simplement le facteur de transmission de l'interface. Il est donc en principe possible de faire en sorte que ce facteur de transmission soit sélectif en fréquence ou en direction de sorte que l'on peut en principe contrôler la directivité et le spectre du rayonnement émis. En pratique cela est rendu possible en partant d'interfaces faiblement transmissives puis en les structurant de façon à faire apparaître des modes électromagnétiques de surface qui rendent possible une transmission résonante. En d'autres termes, le rayonnement émis peut devenir partiellement cohérent par filtrage du rayonnement de corps noir existant dans la matière.

Toutefois, cette remarque n'est pas suffisante pour comprendre l'origine du rayonnement thermique. En effet, le rayonnement émis dépend de la température qui est une grandeur thermodynamique.

Il y a donc d'un côté, le phénomène d'émission qui est de nature thermodynamique ou statistique, de l'autre un phénomène d'absorption par un corps éclairé par une onde cohérente. La loi de Kirchhoff établit un pont entre la thermodynamique et l'optique cohérente, rendu nécessaire par la conservation de l'énergie mais sans nous en fournir le mécanisme physique sous-jacent.

L'ÉMISSION THERMIQUE REVISITÉE AVEC L'ÉLECTROMAGNÉTISME STOCHASTIQUE

La question de l'origine physique du rayonnement thermique a été traitée par H. A. Lorentz dans son livre « *The theory of electrons and its applications to the phenomena of Light and Radiant Heat* » publié en 1916 [2]. Sa vision est la suivante: les électrons d'un métal ont un mouvement d'agitation thermique aléatoire de sorte que chaque élément de volume du métal se comporte comme une petite antenne. Le champ émis se propage dans le métal jusqu'à l'interface où il est transmis par l'interface. Dans le cas des métaux, seuls les électrons proches de la surface (quelques dizaines de nanomètres) peuvent contribuer au rayonnement émis. Pour calculer la puissance émise, il faut calculer le flux du vecteur de Poynting. Cette approche a beaucoup d'avantages. Elle permet d'entrevoir le lien entre l'absorption (effet Joule dû aux électrons) et l'émission (rayonnement des courants fluctuants dus aux électrons). Elle permet de fournir une image très simple et très concrète de la loi de Kirchhoff (voir encart). En revanche, à l'époque de Lorentz, les fluctuations thermiques de courant sont décrites dans un modèle classique qui ne permet pas de reproduire la loi de Planck.

L'ÉMISSION THERMIQUE REVISITÉE AU-DELÀ DE L'OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE

La compréhension de la loi de Kirchhoff a fait un bond avec la démonstration du théorème de fluctuation-dissipation. Ce résultat de physique statistique établi en 1951 par Callen et Welton [3] énonce que les fluctuations du courant (les sources du rayonnement) sont proportionnelles à la partie imaginaire de la permittivité du matériau, qui décrit les pertes, et au facteur de Bose-Einstein $1/[\exp(h\nu/k_B T)-1]$. Dès les années 50, Rytov a utilisé ce résultat [4] pour redémontrer la loi de Kirchhoff dans un cadre d'électromagnétisme classique parachevant le travail initié par

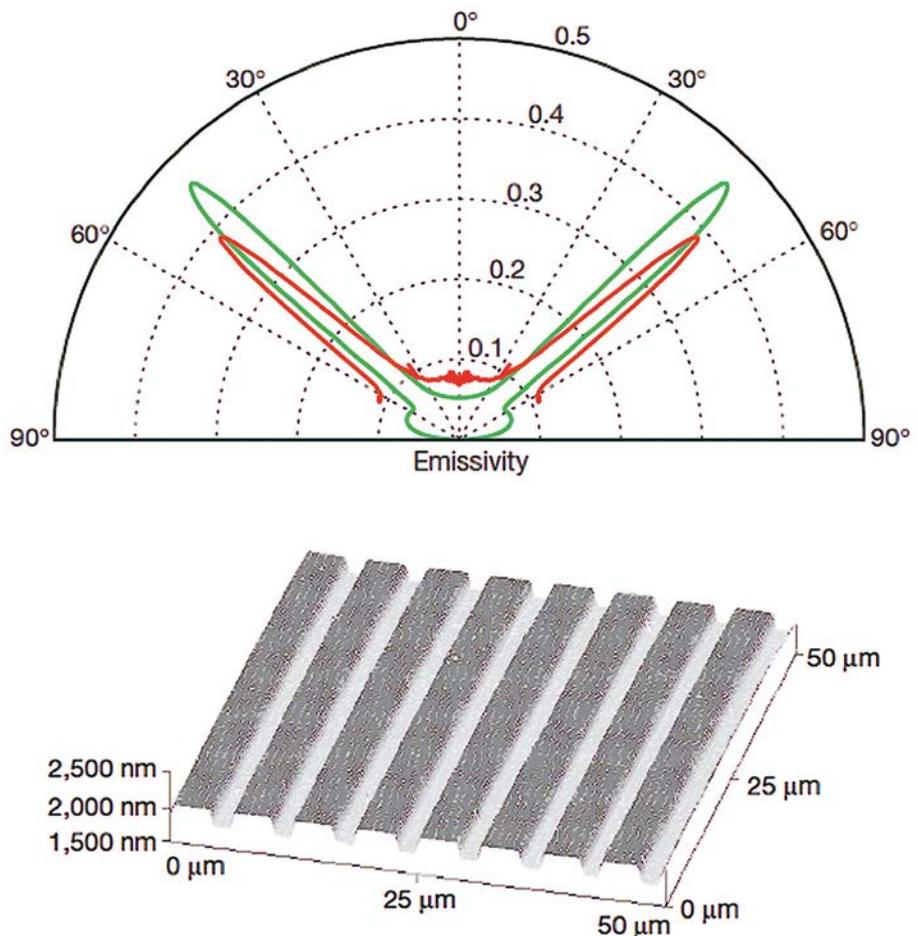
Lorentz. Il a introduit des courants aléatoires comme sources des équations de Maxwell: on parle d'électrodynamique stochastique.

Ce nouveau cadre permet d'étendre considérablement la portée de la loi de Kirchhoff. Il montre que l'approximation de l'optique géométrique initialement utilisée dans son raisonnement n'est nullement nécessaire. Dès lors, la loi de Kirchhoff peut s'appliquer à des situations pour lesquelles il y a de la diffraction. Ainsi, il a été montré que la loi de Kirchhoff reste valable pour des particules plus petites que la longueur d'onde bien que la notion de réflectivité d'un rayon sur la surface n'ait plus de sens [4]. On montre que le rayonnement s'exprime en fonction de la section efficace d'absorption prolongeant ainsi naturellement la loi de Kirchhoff.

On peut également concevoir des réseaux ou des métasurfaces résonantes présentant des résonances d'absorption très étroites

Figure 1.

Emission thermique directionnelle par un réseau de SiC (voir schéma). Rouge: mesure de l'émission à 11,26 μm; Vert: calcul de de 1-R. Figure adaptée de [5] avec permission de Nature Springer.



On peut également concevoir des réseaux ou des métasurfaces résonantes présentant des résonances d'absorption très étroites angulairement ou spectralement ce qui conduit donc à de l'émission de rayonnement thermique très directionnelle (spatialement cohérente, ou très monochromatique (temporellement cohérente)

angulairement ou spectralement ce qui conduit donc à de l'émission de rayonnement thermique très directionnelle (spatialement cohérente, Fig. 1) [5] ou très monochromatique (temporellement cohérente, Fig. 2) [6].

Une autre conséquence de ce formalisme est la capacité à étudier le rayonnement thermique en champ proche qui possède des propriétés très différentes du spectre rayonné en champ lointain. Ceci sort du cadre de la loi de Kirchhoff qui traite de l'émission et de l'absorption d'ondes propagatives. En effet, en champ proche, l'échange d'énergie se fait *via* des modes non radiatifs (champs décroissant en $1/r^3$ ou ondes évanescentes suivant le point de vue adopté). Dans ce cadre, les flux radiatifs par unité de surface peuvent dépasser de plusieurs ordres de grandeur le flux radiatif σT^4 émis par un corps noir.

LA LOI DE KIRCHHOFF ET LA LUMINESCENCE

Bien que historiquement cantonnée à la description du rayonnement thermique, la loi de Kirchhoff est en mesure de décrire les processus d'électroluminescence et de photoluminescence. Une généralisation de cette loi est couramment utilisée pour décrire la lumière émise par des diodes électroluminescentes (LEDs) [7]. Ceci n'est pas surprenant puisque l'émission de lumière par un semiconducteur est une recombinaison radiative électron-trou suivie d'une propagation dans le dispositif. La différence entre le rayonnement thermique, l'électroluminescence et

la photoluminescence est la façon de promouvoir un électron de la bande de valence à la bande de conduction tandis que le processus de recombinaison radiative est le même tant que les électrons et les trous sont thermalisés. Il est également possible de généraliser la loi de Kirchhoff à un corps pour lequel différents sous-systèmes sont à des températures différentes [7].

CONCLUSION

La loi de Kirchhoff a 160 ans et son champ d'application continue de s'étendre. Elle s'applique maintenant à la conception de nouvelles sources de lumière combinant des métamatériaux et des émetteurs quantiques tels que des boîtes quantiques, à la modélisation de l'émission de lumière par des semiconducteurs en cavité ainsi qu'à la compréhension de nouveaux régimes d'émission de lumière tels que les condensats de photons de Bose-Einstein [7]. ●

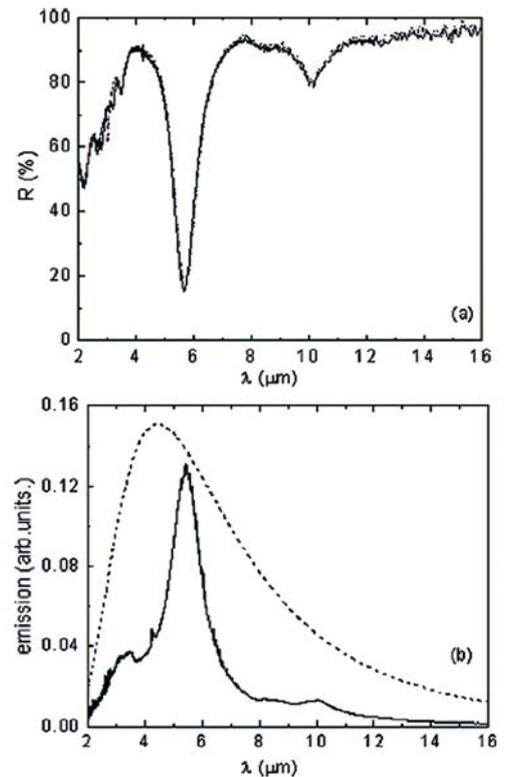
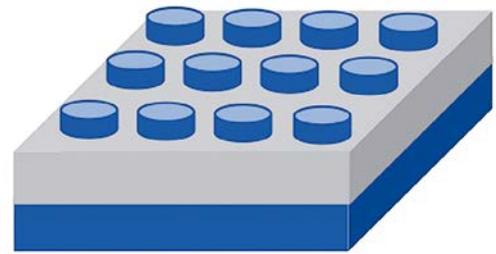


Figure 2. Métasurface composée d'un miroir d'aluminium recouvert de résonateurs plasmoniques présentant un pic d'absorption, (a) : réflectivité, (b) : spectre d'émission. Figure adaptée de [6] avec permission de AIP Publishing.

RÉFÉRENCES

- [1] G. Kirchhoff, *Phil. Mag.* S. 4. **20**, 1 (1860)
- [2] H.A. Lorentz, *Theory of Electrons and its applications to the phenomena of light and radiant heat*, (B.G. Teubner, Leipzig, 1916)
- [3] H.B. Callen, T.A. Welton, *Phys.Rev.* **83**, 34 (1951)
- [4] S.M. Rytov, Y.A. Kravtsov, and V.I. Tatarskii, *Principles of Statistical Radiophysics vol. 3.* (Springer-Verlag, Berlin, 1989)
- [5] J.J. Greffet, R. Carminati, K. Joulain *et al.*, *Nature (London)* **416**, 61 (2002)
- [6] I. Puscasu, W. Schaich, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 233102 (2008)
- [7] J.J. Greffet, P. Bouchon, G. Bruçoli, F. Marquier, *Phys.Rev.X* **8**, 021008 (2018)

ACHETER UNE CAMÉRA INFRAROUGE

Isabelle Ribet^{1,2}

¹ ONERA-DOTA, 91761 Palaiseau cedex – France, ² IOGS, 91120 Palaiseau – France



Les caméras infrarouges sont utilisées dans des domaines très variés: surveillance, déperditions thermiques, vision industrielle, domotique, voire même détection de personnes fiévreuses dans le contexte de crise sanitaire actuel... Pour couvrir des besoins aussi variés, il existe sur le marché tout un éventail de produits commerciaux, allant du petit module de vision thermique pour smartphone (poids ~100g et prix ~200€) à la caméra refroidie très haute performance (poids de plusieurs kilos, prix allant jusqu'à plus de 100.000€).

<https://doi.org/10.1051/photon/202010550>

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

L'infrarouge est un domaine spectral très large, couvrant les longueurs d'onde comprises entre 0,8 μm et 300 μm . Trois sous-bandes spectrales, correspondant aux fenêtres de transmission atmosphérique, s'avèrent particulièrement intéressantes pour les applications mentionnées ci-dessus : la bande SWIR (pour ShortWave InfraRed, comprise entre 1 et 2.5 μm), la bande MWIR (pour MidWave InfraRed, comprise entre 3 et 5 μm) et la bande LWIR (pour LongWave InfraRed, comprise entre 8 et 12 μm).

ANATOMIE D'UNE CAMÉRA INFRAROUGE

On retrouve dans une caméra infrarouge les mêmes éléments que dans un caméscope numérique : un

objectif, une matrice de détecteurs (appelée FPA pour Focal Plane Array) et des cartes électroniques de pilotage et de remise en forme des signaux. Mais l'analogie s'arrête là. En effet,

l'objectif est réalisé avec des matériaux spécifiques à l'infrarouge, tels que le germanium (Ge) ou le sélénure de zinc (ZnSe). La matrice de détecteurs, quant à elle, doit utiliser un autre matériau absorbant que le silicium, qui n'est plus sensible au-delà de 1,1 μm . Les semiconducteurs candidats ne manquent pas, d'où l'existence d'un nombre important de filières technologiques, chacune ayant ses avantages et ses inconvénients.

Figure 1.

Exemples de caméras infrarouge commerciales : a) module pour smartphone ; b) caméra thermique compacte portable ; c) caméra thermique refroidie hautes performances. Crédit photo : © FLIR.



PRINCIPALES FILIÈRES DE DÉTECTEURS INFRAROUGE

On distingue deux grandes familles de détecteurs infrarouge : les détecteurs quantiques et les détecteurs thermiques.

Détecteurs quantiques : Dans les détecteurs quantiques, l'absorption d'un photon induit une transition électronique. Les alliages de semi-conducteurs les plus utilisés sont : l'InGaAs (sensible entre 0,9 et 1,7µm (bande SWIR), l'InSb (sensible entre 3 et 5µm (bande MWIR)), les multipuits quantiques GaAs/AlGaAs (sensibles autour de 9 µm (bande LWIR)), les super-réseaux (sensibles en bande MWIR et/ou LWIR) ou encore l'HgCdTe (sensible, selon sa composition, en bande SWIR, MWIR et/ou LWIR). Pour obtenir l'ensemble des pixels qui constituent le circuit de détection (CD), ces matériaux peuvent être utilisés dans une structure de type photovoltaïque (photodiode) ou à barrière. Une fois le signal électrique généré, il doit être lu et remis en forme : c'est le rôle du circuit de lecture (CL), réalisé en silicium et en technologie CMOS. La connexion mécanique et électrique entre le CD et le CL, constitués de semi-conducteurs différents, constitue une étape technologique complexe appelée hybridation.

Elle peut par exemple être réalisée par l'intermédiaire de microbilles d'indium (voir Fig. 2). L'une des particularités des détecteurs quantiques est que la plupart d'entre eux nécessitent d'être refroidis pour s'affranchir du courant d'obscurité (courant prenant naissance en l'absence d'éclairement incident et limitant la dynamique et le rapport signal à bruit). La température de fonctionnement requise dépend de la bande spectrale considérée : de la température ambiante à 200 K en bande SWIR, de 150 K à 80 K en bande MWIR, et de 80K à 50 K en bande LWIR. Ce refroidissement est généralement obtenu grâce à une machine à froid (voire avec un simple élément Peltier pour les températures de fonctionnement les plus élevées). Cela complexifie la

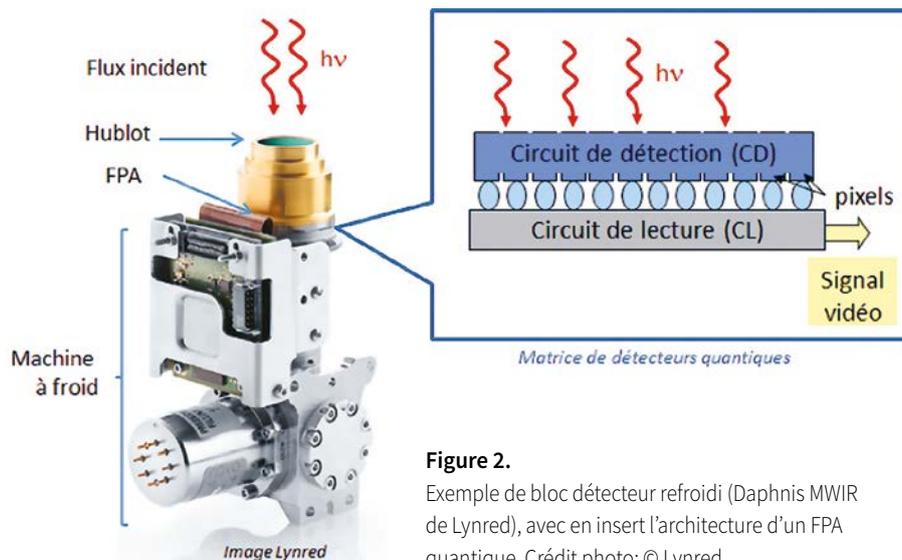


Figure 2. Exemple de bloc détecteur refroidi (Daphnis MWIR de Lynred), avec en insert l'architecture d'un FPA quantique. Crédit photo: © Lynred.

mise en œuvre de ces détecteurs, mais permet en retour d'accéder à de hautes performances.

Détecteurs thermiques : Les détecteurs thermiques constituent la deuxième grande famille de détecteurs infrarouge. Leur principe de fonctionnement est différent, puisque c'est l'échauffement induit par le flux de photons incidents sur une fine membrane qui fait varier un paramètre physique du matériau la constituant (par exemple, la résistance électrique dans le cas des microbolomètres). Contrairement à leurs concurrents quantiques, ils ne nécessitent pas de refroidissement (certains sont stabilisés en température par un élément Peltier ou TEC (pour ThermoElectric Cooler). Même si leurs performances sont en constante évolution, elles restent un peu en retrait face aux détecteurs quantiques. En revanche, les détecteurs thermiques sont plus petits, plus légers, et donc plus faciles à intégrer dans une caméra.

CRITÈRES DE CHOIX D'UNE CAMÉRA INFRAROUGE

Le premier critère à prendre en compte est le format du FPA, qui peut aller de 80×60 pixels (modules de première génération pour smartphones) à plus de 1000×1000 pixels (caméras hautes performances).

Ces formats restent bien inférieurs à ce qui se fait dans le domaine du visible où on dispose aujourd'hui de matrices de plusieurs centaines de millions de pixels. Cela est directement lié aux difficultés de réalisation technologique des détecteurs infrarouges. Le nombre de pixels requis dépend de l'application : par exemple, si on veut faire l'image d'une zone de 0.5m×0.5m avec une résolution millimétrique, il faudra un format supérieur à 500×500 pixels. Notons que pour une caméra donnée il est généralement possible de choisir entre plusieurs objectifs, de longueurs focales différentes. Une fois la matrice de détecteurs fixée, c'est en effet la longueur focale qui détermine le champ total vu par la caméra (souvent appelé FOV pour Field Of View, et exprimé en degrés).

Se pose ensuite la question de la bande spectrale : SWIR, MWIR ou LWIR ? Il est important de comprendre que l'origine du rayonnement n'est pas la même dans ces trois bandes : en SWIR, le signal infrarouge vient majoritairement de la réflexion de l'éclairage ambiant, comme dans le visible. Le contraste observé dans une image SWIR provient donc des différences de facteur de réflexion, et les images sont assez similaires aux images noir et blanc données par un appareil photo numérique,

à part quelques inversions de contraste parfois spectaculaires (les cheveux et la végétation apparaissent blancs). La bande SWIR peut également être intéressante pour sa robustesse en conditions de visibilité dégradées (applications marines par exemple). Dans les bandes MWIR et LWIR (infrarouge dit « thermique »), le signal infrarouge vient majoritairement de l'émission propre des objets. Il est donc directement lié à leur température, ce qui permet de faire de la thermographie infrarouge. La loi du corps noir prédit que les objets à température ambiante émettent un maximum de rayonnement dans la bande LWIR, alors que la bande MWIR est, en principe, mieux adaptée à des scènes contenant des points chauds (feux de forêt, départ de missile...). Attention tout de même à la transmission atmosphérique en bande LWIR, qui sera vite dégradée en présence de vapeur d'eau. Mais surtout, ne pas oublier que le choix de la bande spectrale impactera aussi les conditions de mise en œuvre (besoin en cryogénie)... et le prix !

Les performances d'une caméra thermique sont généralement évaluées à travers sa NETD (pour Noise Equivalent Temperature Difference ou différence de température équivalente au bruit), qui est la plus petite différence de température qu'il est possible de distinguer. Les caméras thermiques atteignent des NETD de 20-40 mK, contre 15-30 mK pour les

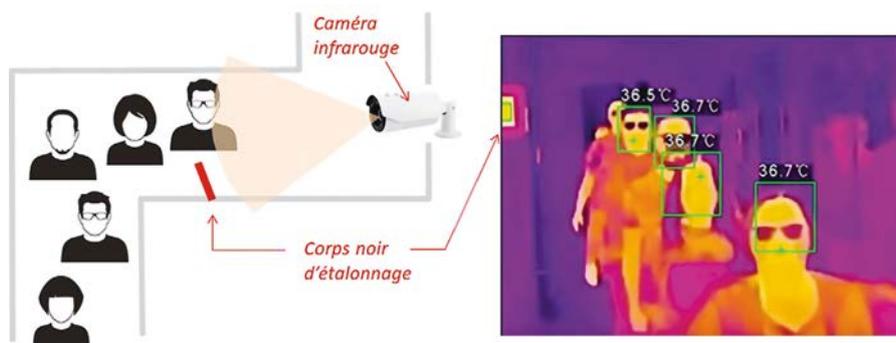


Figure 3. Depuis 2003, des caméras thermiques sont utilisées dans les aéroports pour repérer des personnes fiévreuses.

caméras quantiques. Il est important de souligner que la NETD correspond à une mesure relative (différence de température) et ne représente pas la justesse avec laquelle il sera possible de faire une mesure de température absolue. Cette dernière est en effet plus complexe et nécessite de prendre en compte le fond instrumental. C'est la raison pour laquelle l'utilisation de caméras thermiques pour détecter les personnes fiévreuses n'est pas aussi simple qu'il y paraît, et requiert généralement l'utilisation d'un corps noir d'étalonnage dans le champ de la caméra (voir Fig. 3).

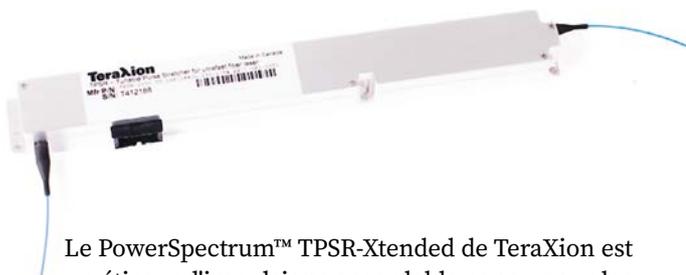
Pour les applications mettant en jeu des phénomènes rapides, la cadence image est également un paramètre de première importance.

Les cadences typiques des caméras non refroidies vont de 30 Hz à 60 Hz, contre 30 Hz à 1 kHz pour les modèles refroidis. Ces derniers bénéficient souvent d'un mode fenêtrage, qui peut permettre d'augmenter la cadence d'acquisition (mais en perdant en résolution).

Selon les applications, d'autres critères peuvent entrer en ligne de compte, notamment la taille, la masse et la puissance électrique consommée (SWaP en anglais, pour *Size, Weight and Power*). À ce niveau, l'avantage est clairement aux filières non refroidies, qui proposent les caméras portables les plus compactes. Si la caméra doit être intégrée dans un environnement sévère (essais en vol, par exemple), il faudra également porter attention à l'indice de protection (IP). Enfin, bien évidemment, reste le critère du prix : comptez de quelques centaines d'euros à 30 000 € pour une caméra non refroidie, et de 20 000 € à plus de 100 000 € pour une caméra refroidie. ●

MARQUE	PRODUITS	INFOS	DISTRIBUTEURS EN FRANCE
Flir	toutes caméras du SWIR au LWIR, quantiques ou thermiques	info@flir.fr	France infrarouge, Alliance Vision, Distrame, Digikey Electronics, ES France, Exavision...
Infratec	toutes caméras du MWIR au LWIR, quantiques ou thermiques	web@InfraTec.de	DB Vib Technologies
Xenics	toutes caméras du SWIR au LWIR, quantiques ou thermiques	sales@xenics.com	Stemmer Imaging, Elvitec, Laser 2000
Raptor	caméras SWIR	sales@raptorphotonics.com	OptoPrim France
Photonic Science	caméras SWIR	info@photonic-science.co.uk	Photonic Science Sales / Marketing - France
Jenoptik	Caméras LWIR thermiques	www.jenoptik.com/contact	JENOPTIK Industrial Metrology France
Fluke	Caméras LWIR thermiques portables	forms.fluke.com	Distrame, ES France
EHD imaging	caméras SWIR	info@ehdimaging.de	Distrame
Optris	caméras SWIR, LWIR	Luc.Lagorce@optris.com	WIN Sensor, ARM, Media Mesures, Tableau mis en forme Cap Instrumentation, LR Mesures, Acoris, Souplet Automatismes, BFC DEXIS - Automatismes

ÉTIREUR D'IMPULSIONS ACCORDABLE

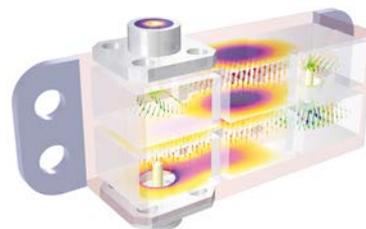


Le PowerSpectrum™ TPSR-Xtended de TeraXion est un étireur d'impulsions accordable conçu pour les lasers à haute énergie nécessitant un étirement de l'impulsion considérable avant la chaîne d'amplification. Ce nouvel étireur d'impulsions est conçu à partir de la technologie FBG et possède une capacité d'étirement de l'impulsion jusqu'à 50 % plus grande que son prédécesseur. Il permet ainsi d'augmenter l'énergie par impulsion du même facteur et équivaut à une fenêtre d'étirement totale allant jusqu'à 2 400 ps.

www.teraxion.com

Module de simulation optique et électromagnétique

Sortie de la version 5.6 de COMSOL Multiphysics®. Le Module RF et le Module Wave Optics proposent une nouvelle option pour les analyses paramétriques avec port, qui permet des calculs plus rapides des matrices de paramètres S, de transmission et de coefficient de réflexion. Pour les structures périodiques au sein des métamatériaux et des dispositifs plasmoniques, un nouvel outil de tracé de la polarisation facilite considérablement l'évaluation et la visualisation des ondes transmises et réfléchies.



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

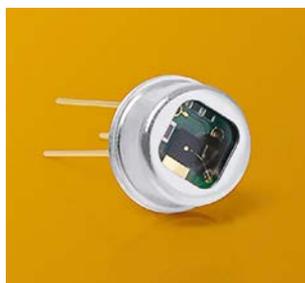
Plateforme laser pour la spectroscopie THz dans le domaine temporel



Le TeraFlash pro de TOPTICA, une plateforme laser THz temporelle, établit de nouvelles performances en termes de dynamique, de bande spectrale et de vitesse de mesure. Le système atteint désormais une dynamique de crête de 100 dB et une bande spectrale de plus de 6 THz. Le système acquiert 60 traces/s à une vitesse de balayage de 50 ps, ou 95 traces/s à 20 ps. La nouvelle version « Dual » permet le fonctionnement simultané de deux émetteurs et/ou deux récepteurs.

www.toptica.com

Détecteurs Pyroélectriques Stables en Température



Les détecteurs pyroélectriques au tantalate de lithium (LTO) de la série LT3111 de LASERCOMPONENTS sont particulièrement adaptés à la spectroscopie infrarouge à transformée de

Fourier (FTIR). Par rapport à d'autres matériaux, le LTO est extrêmement stable en température et robuste. Par conséquent, les détecteurs ne nécessitent pas de refroidissement supplémentaire par élément Peltier, même à hautes températures.

www.lasercomponents.fr

CAMÉRA POUR LA GAMME INFRAROUGE SWIR

La caméra C-RED 2 Extended Range (ER) est une caméra infrarouge à ondes courtes (1300 nm – 2200 nm) très sensible, basée sur un réseau de détecteurs



ER-InGaAs 640×512 pixels. La C-RED 2 ER offre une fréquence d'image allant jusqu'à 600 Hz et peut être refroidie jusqu'à -55°C pour des performances optimisées. La caméra offre des cartes de correction intégrées ainsi que des corrections à la volée sans dégradation de la résolution spatiale de l'image, ni perte de vitesse.

www.first-light-imaging.com

MESURES DE PUISSANCE & ÉNERGIE LASERS

LASERPOINT

Nouveau site en français
<https://www.laserpoint.eu/fr/>

Capteurs Très
Haute Vitesse
BLINK HS



Capteurs
Thermopiles
& Photodiodes



Garantie 3 ans

Haute Tenue au Flux 12 kW/cm^2 | Puissance du μW jusqu'à 12 kW | Cadences $10 \text{ Hz} - 1 \text{ MHz}$



Electroniques de mesure



Calorimètres



Sondes portables



Capteurs OEM

ÉQUIPEMENT DE NANOPositionnement

ACTUATEURS PIÉZOÉLECTRIQUES | PLATINES DE TRANSLATION, ROTATION, SCANNERS
MISE AU POINT DE MICROSCOPE | NANOPositionnement XYZ



RÉSOLUTION nm & SUB-nm



piezosystemjena
incredibly precise

