

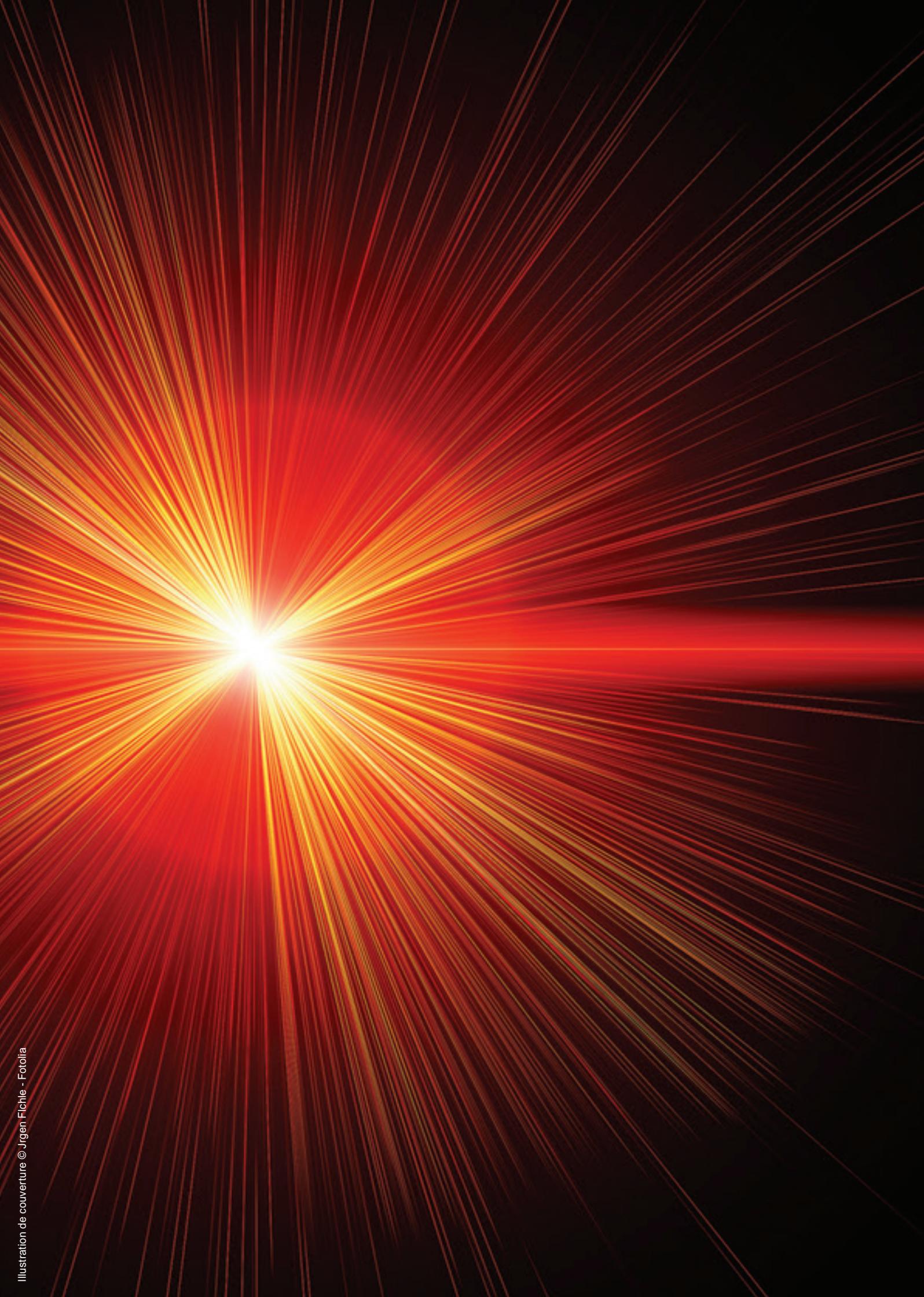
35
36

La Lettre

de l'Académie des sciences

PRINTEMPS-ÉTÉ | AUTOMNE-HIVER 2015

La lumière



ÉDITORIAL

Catherine Bréchnignac
Page 4

DOSSIER **LA LUMIÈRE**

La lumière à la conquête des extrêmes
Christian J. Bordé
Page 8



La lumière au cœur des révolutions quantiques
Alain Aspect
Page 19



La nanophotonique
Jean-Jacques Greffet
Page 28



La lumière pour découvrir l'Univers
Pierre Encrenaz, avec Françoise Combes, Anne-Marie Lagrange, Pierre Léna,
Jean-Loup Puget et Daniel Rouan
Page 31



Lasers femtosecondes
Daniel Kaplan
Page 44



Impulsions de lumière attosecondes
Anne L'Huillier
Page 47



Lasers ultrastables et horloges optiques
Sébastien Bize
Page 50



Chimie et lumière : une complicité étroite
Philippe Sautet
Page 54



L'alliance de la lumière et de la chimie pour la fluorescence en biologie
Anne-Marie Caminade
Page 59



La biophotonique, ou comment la lumière est devenue un outil diagnostique et thérapeutique
Chantal Andraud et Cyrille Monnereau
Page 65



Destination Soleil – Ou quand la lumière prend la tangente
Page 72

RETOUR SUR L'ACTUALITÉ

Création du Conseil national consultatif pour la biosécurité
Henri Korn et Jean-François Bach
Page 78

LA VIE DE L'ACADÉMIE

De nouveaux membres à l'Académie des sciences
Page 81

Éditorial



Catherine Bréchnignac

Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences

À l'occasion de l'année internationale de la lumière, *La Lettre* de l'Académie des sciences est consacrée au vaste domaine scientifique qui étudie le comportement de la lumière et cherche à en exploiter les propriétés afin d'explorer et d'améliorer le monde qui nous entoure.

Les premiers textes de cette *Lettre* sont consacrés à la question fondamentale de la nature de la lumière, de sa dualité onde-corpuscule et des propriétés particulières qui en découlent. Le *Dossier* aborde ensuite l'apport central de la lumière aux deux révolutions quantiques du 20^e siècle.

Au fur et à mesure de la lecture de la partie consacrée à la conquête des extrêmes, la lumière apparaît comme un outil extraordinaire. De la nanophotonique et ses boîtes quantiques aux progrès spectaculaires de l'optique adaptative, qui permettent de mieux appréhender l'Univers, la lumière explore vers les quatre infinis, le petit et le grand, le court et le long. Les nouvelles générations de lasers femto- et attosecondes sont désormais bien maîtrisées : il est possible de produire une puissance instantanée exceptionnelle, mais il sera aussi possible, dans un avenir proche, de visualiser le mouvement des électrons dans la matière. Grâce à ces nouveaux lasers, la lumière devient également un étalon de fréquence précieux, autorisant la mise au point de dispositifs de métrologie ultraprécis. C'est aussi grâce à cette technologie que les chercheurs sont parvenus à détecter pour la première fois, en 2015, les ondes gravitationnelles prédites il y a un siècle par Einstein.

Ce rôle central de la lumière dans le domaine de la physique s'étend à celui de la chimie. On peut notamment citer la conversion de la lumière en énergie chimique, qui est un enjeu majeur pour l'élaboration de panneaux solaires de plus en plus performants. La lumière joue également un rôle clé dans le domaine du vivant. Outre la photosynthèse, connue depuis longtemps, la fluorescence de molécules adsorbées sur une cellule dévoile les mécanismes cellulaires et il devient possible de suivre, en direct, l'action d'un

candidat médicament. En médecine, c'est la lutte contre le cancer, notamment, qui bénéficie grandement d'une meilleure maîtrise de la lumière : la thérapie photodynamique du cancer ainsi que l'utilisation de l'imagerie fluorescence lors de la résection de tumeurs en constituent deux exemples actuels.

Le dossier de *La Lettre* s'achève par une visite guidée d'un fleuron de la technologie française, le synchrotron *Soleil*. Entre recherche fondamentale publique et contrats privés de recherche finalisée, ce très grand instrument offre les conditions idéales d'exploration de la matière grâce au rayonnement électromagnétique créé par des électrons propulsés à très grande vitesse.

L'Académie des sciences a terminé l'année 2015 sur un succès pour sa mission d'expertise et de conseil : l'installation du Conseil national consultatif pour la biosécurité. Mis en place par le Premier ministre, ce Conseil est l'une des recommandations phares d'un rapport de l'Académie de 2008, et sa création a longuement été soutenue par son *Comité sciences et biosécurité*. *Retour sur l'actualité* expose les tenants et les aboutissants de ce Conseil national.

Enfin, la *Vie de l'Académie* rend honneur aux nouveaux membres de notre institution reçus solennellement sous la coupole le 16 juin 2015. Forts d'une vie entière consacrée à la recherche de haut niveau, ou encore à l'apogée de leur carrière, ils sont tous de talentueux chercheurs venant renforcer l'expertise de l'Académie et l'aider à mener à bien ses missions.

En 2016, nous avons la joie de célébrer le 350^e anniversaire de notre Académie, créée par Colbert et approuvée par Louis XIV. Trois siècles et demi plus tard, l'Académie donnera à voir l'étendue de ses missions à travers une série d'événements et de créations pour tous les publics, à découvrir sur son site internet. Ainsi, en juin 2016, huit académiciens se plieront à un exercice inédit de rétro-prospective sur 350 ans de travaux de recherche réalisés dans leur discipline, dressant à la fin quelques perspectives pour l'avenir : leurs propos feront l'objet d'un dossier dans le prochain numéro de *La Lettre*.

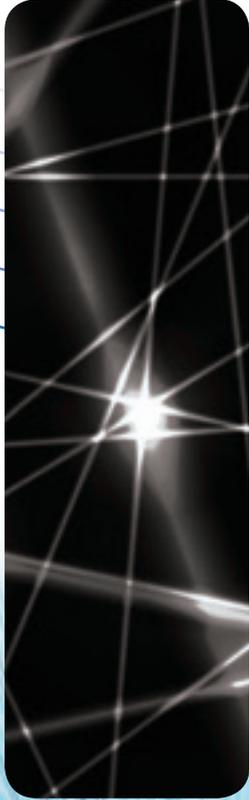
L'année internationale de la lumière s'éteint...
pleins feux sur les 350 ans de notre institution !



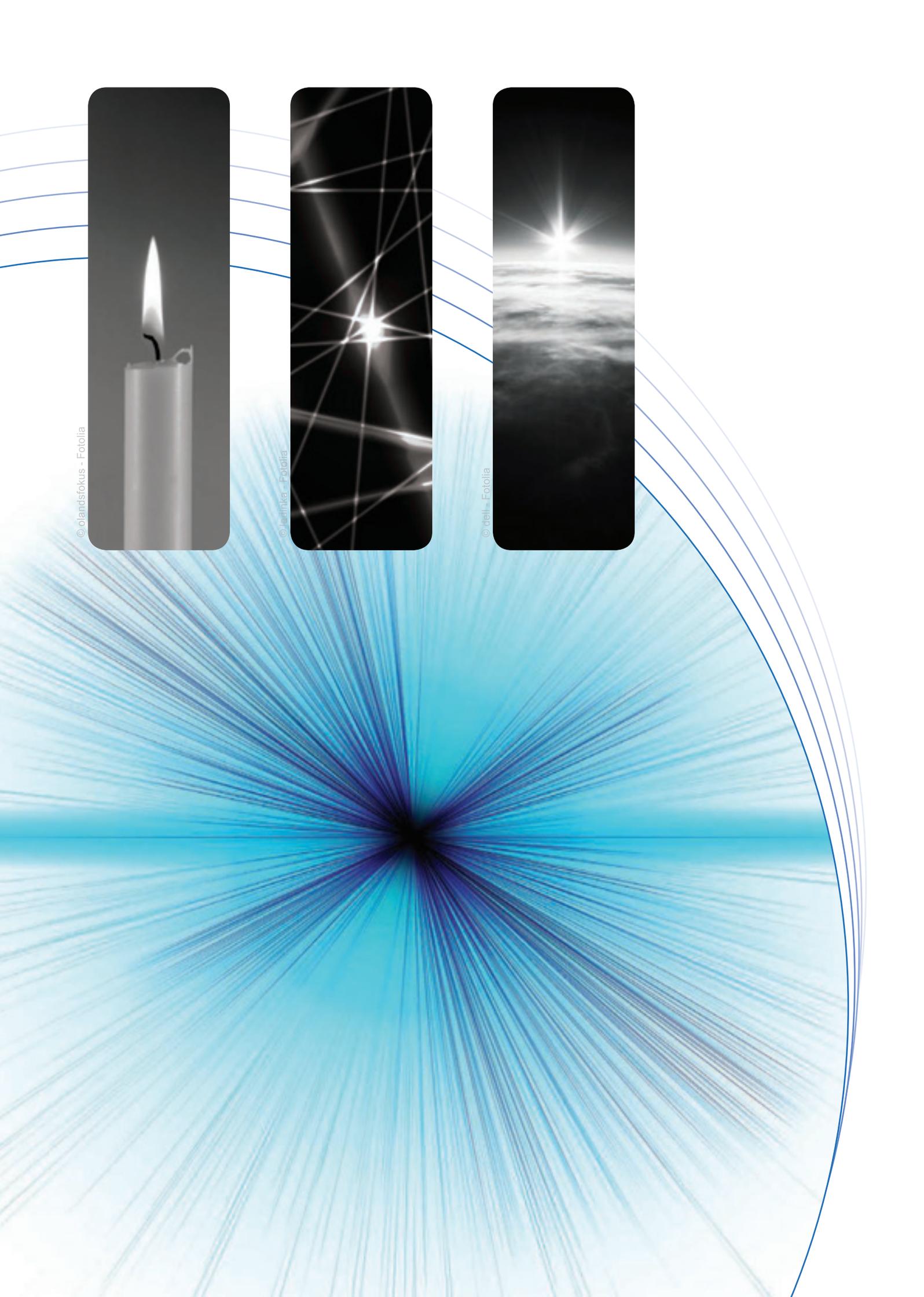
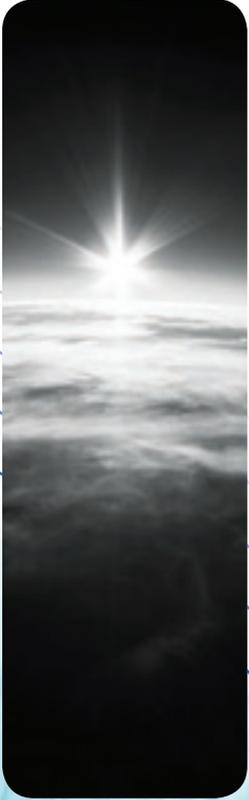
© olandsfokus - Fotolia



© ledinka - Fotolia



© dell - Fotolia



La lumière

Amplement abordée au cours de l'année internationale que lui a consacrée l'Unesco, la lumière est un domaine de recherche si vaste qu'aucun dossier ne peut, dans des proportions raisonnables, le traiter dans son intégralité. Pour *La Lettre*, l'académicien Christian Bordé a donc choisi un angle original : la lumière comme outil d'exploration des confins de l'espace et du temps que sont l'infiniment petit et l'infiniment grand, l'infiniment court et l'infiniment durable. Une conquête qui s'est accompagnée d'une révolution technologique sans précédent en physique, mais aussi en chimie et en sciences du vivant. La deuxième partie de ce dossier, coordonnée par l'académicien Philippe Sautet, expose d'ailleurs les liens étroits entre chimie et lumière dont l'exploitation permet, notamment, le développement de techniques de production d'électricité à partir d'une source inépuisable d'énergie, le rayonnement solaire, ainsi que l'émergence d'une nouvelle biologie et d'une médecine de précision. La fin du dossier, quant à elle, est consacrée à un reportage sur le synchrotron Soleil, là où les électrons sont accélérés à très grande vitesse.

La lumière à la conquête des extrêmes



© B.Eymann - Académie des sciences

Christian J. Bordé

Membre de l'Académie des sciences, Laboratoire de physique des lasers, UMR 7538 CNRS, Université Paris Nord, Villetaneuse - LNE-SYRTE, UMR 8630 CNRS, Observatoire de Paris

C'est la lumière qui nous permet de découvrir le monde qui nous entoure. Quelles sont ses limites, et donc les nôtres ? Explorer nos frontières grâce à la lumière, tel est le fil conducteur de la première partie de ce dossier. Beaucoup de terres inconnues subsistent dans notre univers physique : une liste non exhaustive de domaines au-delà de nos horizons actuels et où la lumière joue un rôle-clé sera donnée à la fin de cet

exposé introductif. Les contributions qui suivent, quant à elles, porteront sur les confins de l'espace et du temps que sont l'infiniment petit, l'infiniment grand, l'infiniment court et l'infiniment durable, élargissant ainsi le débat pascalien sur les deux infinis aux quatre dimensions de l'espace-temps. Mais d'abord, la lumière : quel est cet outil merveilleux ? Quelle est sa nature, quelles sont ses propriétés, comment l'améliorer pour mieux l'utiliser ? Qu'est ce qui est visible, qu'est ce qui ne l'est pas ? Pour toute cette discussion, nous ferons le parallèle entre lumière et gravitation, qui constituent nos deux principaux outils d'appréhension et de connaissance du monde extérieur.

Sur la vraie nature de la lumière...

La nature de la lumière a toujours été un objet de fascination pour le physicien, mais aussi de controverses entre les tenants d'une description corpusculaire et ceux d'une description ondulatoire.

Bref historique

C'est d'abord Isaac Newton (Opticks, 1704) qui va imposer la thèse d'une lumière constituée de particules. Dans l'autre camp, on trouve d'autres grands noms de la physique : Christiaan Huygens (Traité de la lumière, 1690), Thomas Young (figure de diffraction de deux fentes, 1801), Augustin Fresnel (1819), François Arago, James Clerk Maxwell



Christiaan Huygens



Augustin Fresnel

(théorie électromagnétique, 1864), Heinrich Hertz (découverte des ondes électromagnétiques, 1887). L'expérience, notamment celle de la mesure de la vitesse de la lumière dans l'eau par Hippolyte Fizeau et Léon Foucault (1850), va trancher en faveur de ce deuxième camp.

Le trouble sera ensuite jeté par la théorie de l'émission du corps noir par Max Planck, en 1900, et surtout par l'interprétation de l'effet photoélectrique développée par Albert Einstein, motif de son prix Nobel en 1921. Il fallut se résoudre à trouver une synthèse entre les deux points de vue. Cette synthèse, connue sous le nom de théorie quantique du rayonnement (électrodynamique quantique, Dirac, 1927), a ainsi introduit le concept de quanta de lumière, plus tard appelés photons.

Une interprétation courante de cette théorie a fait croire, à tort, que les photons pouvaient être des particules conservant leur identité au cours de leur propagation dans l'espace. Ce point de vue a été dénoncé et démystifié par le prix Nobel américain Willis E. Lamb (Anti-photon, 1995), qui a même parfaitement décrit l'effet photoélectrique sans photon.

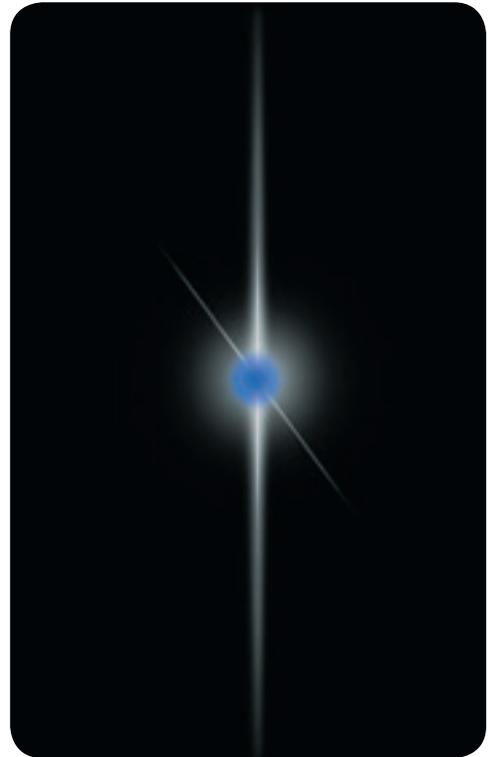


Willis E. Lamb, auteur de la théorie du laser à gaz

La lumière n'a pas de masse, c'est du mouvement « à l'état pur », elle ne correspond à aucune particule localisable. La notion de photon est donc très ambiguë, à tel point que Lamb a suggéré qu'un « permis d'utiliser cette notion devrait être attribué » ! Ce permis a bien sûr été accordé à Alain Aspect, qui nous décrira les expériences qui plaident pour la quantification du champ de rayonnement. Nous verrons plus loin comment la notion de photon peut être associée en tant que quantum d'énergie à celles de mode de propagation et d'oscillateur harmonique. Une façon plus radicale mais minimaliste de trancher le débat sur la nature du photon a été suggérée, entre autres, par Roy Glauber (pionnier de la théorie



© Sergey Nivens - Fotolia



© ledinka - Fotolia



© dell - Fotolia

quantique de la cohérence optique et prix Nobel 2005). Elle consiste à définir le photon comme étant ce qu'un photodétecteur détecte! On pourrait aussi bien dire ce qu'un atome absorbe ou émet.



©DR

Albert A. Michelson

Une autre quête, qui a longtemps occupé les physiciens, est celle de la recherche d'un milieu susceptible de propager la lumière, que depuis Descartes (*Principia philosophiae*, 1644) ils ont appelé « éther ». Les expériences de Michelson et Morley (1887) les ont conduits à y renoncer, et à accepter l'idée que la lumière, tout comme la gravitation, se propageait dans le vide sans recours à un quelconque support matériel.

Le langage du physicien aujourd'hui : un point de vue géométrique

La lumière est une oscillation dans le temps et dans l'espace d'une grandeur que les physiciens appellent un champ. Le physicien entend par là une modification des propriétés de l'espace pour la matière qui s'y trouve et qui est donc soumise à ce champ. Le champ le plus familier à notre expérience est le champ de gravitation, responsable de notre attraction par tout corps massif, et en particulier notre planète. Le champ propagé par la lumière est d'une autre nature, dite électromagnétique : c'est la combinaison d'un champ électrique et d'un champ magnétique.



© sakkmeisterke - Fotolia

Le champ électromagnétique et le champ de gravitation partagent cependant une même nature géométrique. Dans le cas de la gravitation, la géométrie de l'espace-temps est modifiée par la présence d'un objet massif, ce qui rend compte de la perturbation de trajectoire des autres objets. Dans le cas du champ électromagnétique, il nous faut étendre la géométrie de l'espace-temps à une nouvelle coordonnée, interne aux objets : les atomes et toutes les particules dotées d'une masse se comportent comme des horloges rythmant un temps propre, qui apparaît comme une dimension supplémentaire susceptible de se mélanger avec les dimensions d'espace-temps sous l'influence d'un champ électromagnétique.



Pour décrire la géométrie de l'espace-temps en présence de gravitation, il faut faire appel à dix quantités, les potentiels de gravitation, qui vont correspondre aux accélérations, rotations et autres déformations de l'espace-temps que subissent les objets. Parmi ces déformations, on trouve également des ondes comparables à la lumière et qui se propagent à la même vitesse : les ondes gravitationnelles. Pour compléter cette géométrie en présence de champs électriques et magnétiques, quatre potentiels supplémentaires se révèlent nécessaires : ce sont les quatre composantes du potentiel-vecteur électromagnétique qui couplent les quatre coordonnées d'espace-temps et l'espace interne aux objets.



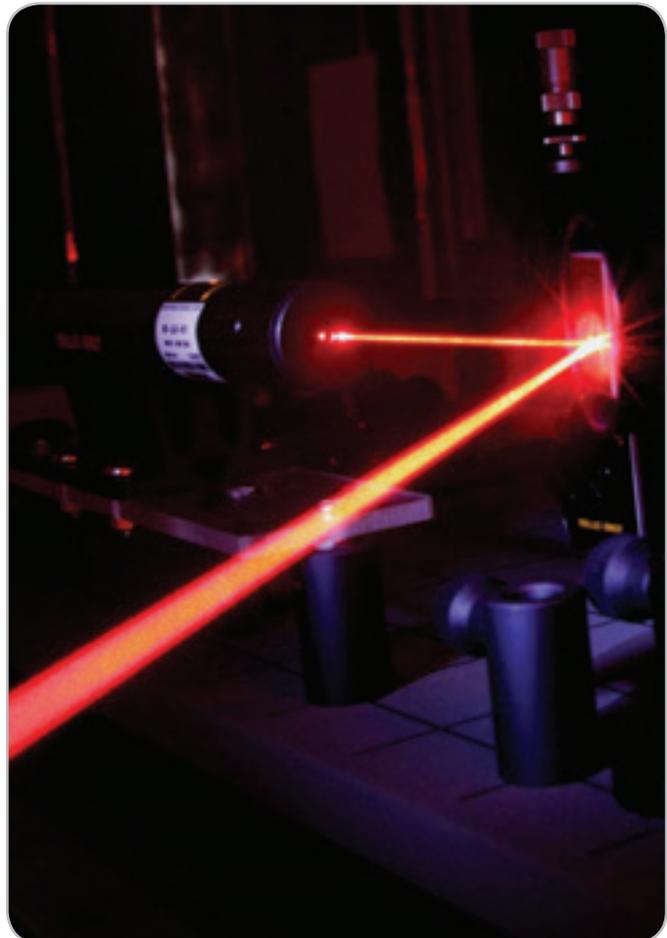
© mercava2007 - Fotolia

Quand les atomes parlent aux atomes : émission et réception de lumière

Pour produire cette modification de l'espace désignée par champ électromagnétique, il faut que la matière contienne des sources pour ce champ, que l'on qualifie de charges. Ainsi, les électrons libres, tout comme ceux contenus dans les atomes et les molécules, pourront engendrer une onde lumineuse à condition que leur mouvement ait les bonnes caractéristiques. Dans un atome, par exemple, ce mouvement devra correspondre à un changement d'orbite des électrons autour du noyau atomique. Inversement, le champ électromagnétique pourra altérer le mouvement des charges qu'il rencontre, et ainsi exciter un atome contenant ces charges par absorption de lumière, ou encore stimuler son émission.

Propriétés essentielles de la lumière

Quelle que soit sa nature, toute oscillation possède une *phase*, c'est-à-dire un angle qui repère sur un cercle où en est l'oscillation dans son évolution périodique entre maximum et minimum. Dans le



© Laboratoire de physique des lasers, Villetaneuse - Sébastien Forget

En haut, une source de lumière classique. Le spectre est très large, s'étalant sur tout le visible et au-delà vers le proche infrarouge et le proche ultraviolet. Il est donné par la loi de Planck à partir de la température du gaz ou du filament. La lumière est émise dans 4π stéradians à partir d'une surface importante, ce qui donne une étendue géométrique très supérieure à l'étendue de cohérence. C'est donc une source temporellement et spatialement très peu cohérente qu'on ne pourra vraiment focaliser ni dans le temps ni dans l'espace.

En bas, un laser à hélium-néon émettant une lumière visible quasi monochromatique dans une étendue géométrique proche de l'étendue de cohérence, donc temporellement et spatialement très cohérente. Le laser permet ainsi d'obtenir soit une tache focale de surface très réduite (limitée par le carré de la longueur d'onde), soit une divergence de faisceau très faible, que l'on peut réduire à volonté en augmentant la taille du faisceau.

cas de la lumière, cette phase comporte une partie *temporelle*, proportionnelle à la *fréquence* de l'onde, et une partie *spatiale*, déterminée par un vecteur, le *vecteur d'onde* inversement proportionnel à la longueur d'onde.

L'onde est monochromatique si la fréquence est unique, elle est plane si elle est guidée par un vecteur d'onde unique. En général, un faisceau lumineux contient de nombreuses composantes qui diffèrent par leurs fréquences et la direction de leurs vecteurs d'onde, avec des phases additionnelles variées : ces différentes contributions sont les *composantes de Fourier*. La phase temporelle détermine pour l'essentiel les propriétés spectrales de l'onde, alors que la phase spatiale conditionne sa propagation.

Comme toute onde, la lumière possède la propriété remarquable de pouvoir *interférer* avec elle-même : lorsque deux faisceaux se combinent, les crêtes de l'un peuvent se superposer aux crêtes de l'autre - on a alors un renforcement mutuel (interférence constructive) -, ou coïncider avec les creux de l'autre - ce qui aboutit à une destruction mutuelle (interférence destructive). La succession de franges claires et sombres qui en résulte constitue une figure d'interférence. Suivant le parcours de chacun des faisceaux et leur phase relative, on pourra ainsi mesurer une toute petite différence de trajet optique : c'est le principe de l'interférométrie, dont l'un des pionniers est Albert A. Michelson, prix Nobel en 1907.

La lumière produite par les sources habituelles est incohérente : ses composantes de Fourier ont des phases aléatoires, et la figure d'interférence est alors brouillée pour toute différence de marche notable entre les deux trajets optiques, alors que la lumière émise par les lasers est extrêmement cohérente et permet d'obtenir des interférences pour de grandes différences de marche.

Spectre de Fourier de la lumière

De manière générale, le spectre de Fourier de la lumière satisfait les inégalités suivantes :

- Pour la partie temporelle de la phase, le spectre est d'autant plus large que l'impulsion lumineuse est plus courte :

$$\text{Largeur spectrale} \times \text{Durée de l'impulsion lumineuse} \geq 1 / 2\pi,$$

où l'égalité correspond à une onde monochromatique dont l'amplitude est modulée par une enveloppe

- Pour la partie spatiale de la phase, la divergence d'un faisceau est d'autant plus importante qu'il est plus focalisé, c'est-à-dire que la tache focale est plus réduite :

$$\text{Étendue géométrique} = \text{Angle solide} \times \text{Surface du faisceau} \geq (\text{Longueur d'onde } \lambda)^2,$$

où λ^2 correspond à l'étendue de cohérence, au sein de laquelle un faisceau peut toujours interférer avec lui-même.

De plus, au cours de leur propagation, les impulsions lumineuses s'étalent dans le temps et dans l'espace, par le phénomène de diffraction. La géométrie d'une onde peut toujours être décomposée en structures simples telles que des ondes planes ou des ondes sphériques : on parle alors de modes de propagation élémentaires, imposés par les composants optiques qui engendrent la forme du faisceau. Ainsi, dans une cavité constituée par deux miroirs sphériques, on pourra sélectionner des modes dits gaussiens avec une amplitude transverse simplement donnée par une forme de Gauss pour le mode fondamental (que multiplie un polynôme pour les modes d'ordre supérieur) et un front d'onde sphérique adapté aux miroirs de la cavité.

Chacun de ces modes d'oscillation de la lumière constitue un oscillateur dont les vibrations peuvent être excitées. La mécanique quantique appliquée à cet oscillateur harmonique va imposer une nature quantifiée à cette excitation, sans qu'il s'agisse pour autant de particules en tant que telles : l'énergie emmagasinée par l'oscillateur croît par incréments égaux appelés quanta. C'est le seul sens que l'on puisse donner à la notion de photon.

La cavité optique qui vient d'être évoquée est précisément celle mise en œuvre dans un laser. Celui-ci produira donc naturellement des ondes selon un mode gaussien dont l'étendue sera l'étendue de cohérence pour le mode fondamental. Un ensemble d'atomes est installé dans cette cavité dans un état interne excité, ce qui les rend plus disposés à émettre de la lumière qu'à en absorber. Cette émission est stimulée par le champ qui s'établit graduellement dans la cavité à partir d'un bruit initial d'émission de lumière de nature spontanée. Sa fréquence est imposée par la longueur de la cavité pour satisfaire une condition d'interférences constructives lors des allers et retours de la lumière dans la cavité optique. La lumière ainsi engendrée est donc temporellement et spatialement cohérente, et va donc satisfaire l'égalité dans les deux relations précédentes.



La pureté spectrale et l'étendue optique de la lumière des lasers sont parfaitement contrôlables. Comme la vitesse de la lumière est imposée, sa longueur d'onde est *ipso facto* parfaitement définie et le faisceau de lumière devient une règle graduée. Associée au phénomène d'interférences, elle devient un instrument de mesure universel pour :

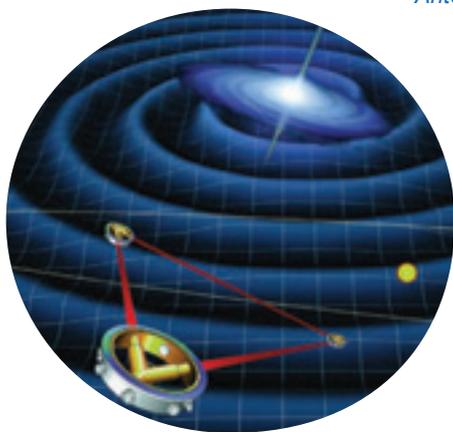
- la mesure des longueurs et des distances, soit par interférométrie, soit au moyen d'impulsions laser courtes (ce qui a été utilisé pour mesurer la distance Terre-Lune). En



© poliki - Fotolia

1972, la mesure très précise de la fréquence et de la longueur d'onde d'un laser à Hélium-Néon a permis de déterminer la vitesse de la lumière avec une incertitude suffisamment faible pour que la 17^e Conférence Générale des Poids et Mesures (1983) redéfinisse le mètre en adoptant une valeur précise pour la vitesse de la lumière dans le vide : « *Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299 792 458 seconde* »

- la mesure du mouvement par l'effet Doppler, la mesure des champs gravito-inertiels, celle de la température, etc. ;
- la spectroscopie à ultra-haute résolution et la connaissance extraordinaire qu'elle apporte de la vie intime des atomes et des molécules ;
- la détection des ondes gravitationnelles : si l'existence d'ondes gravitationnelles analogues aux ondes lumineuses a déjà été évoquée, nous n'avons pas les « yeux » pour les voir. Elles n'agissent en effet pratiquement pas sur la structure interne des objets et ne font que déformer l'espace sur leur passage. La lumière, et spécifiquement l'interféromètre de Michelson, aide à détecter cette infime déformation de la géométrie : il s'agit de mesurer un changement de longueur des bras de l'interféromètre inférieure au picomètre (10^{-12} m), sachant que ces bras mesurent des kilomètres, voire des millions de kilomètres pour les projets spatiaux tels que LISA (*Laser Interferometer Space Antenna*).



© Graphique réalisé par la NASA

L'interféromètre spatial LISA

L'enjeu est considérable pour fonder une nouvelle astronomie permettant de remonter aux premiers instants de l'Univers ou d'enregistrer la coalescence des trous noirs*. Paradoxalement, c'est la lumière qui nous donne accès à l'invisible !

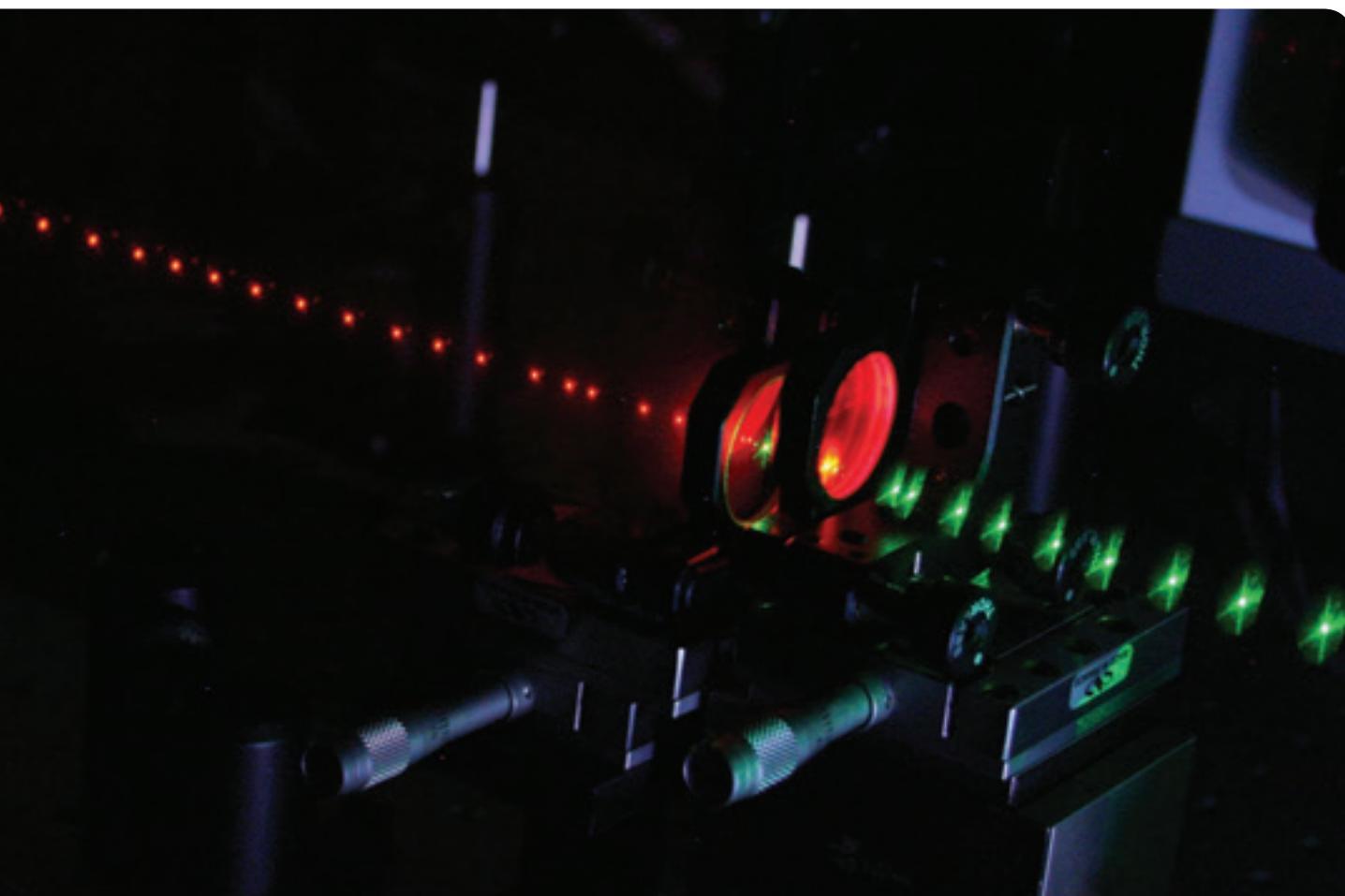
*

Peu après l'écriture de ces lignes, plusieurs événements de ce type ont été détectés, entre septembre et décembre 2015, par les deux interféromètres Ligo. Les trous noirs impliqués ont des masses de plusieurs dizaines de masses solaires et se situent à une distance de plusieurs centaines de Mpc (1 pc = 1 parsec \approx 3,26 années-lumière). Collaboration Ligo-Virgo, à paraître dans la revue *Physical Review Letters*.



Laser organique solide en cavité verticale externe (vue générale)

Le colorant organique utilisé dans cette expérience est du pyrrométhène 579, qui absorbe dans le bleu-UV et émet dans l'orange (autour de 600 nm). Le laser de pompe, visible au fond, est un laser Néodyme:YAG déclenché (nanoseconde), doublé puis triplé en fréquence pour obtenir le faisceau à 355 nm (qui apparaît en bleu ici). Le laser fonctionne en régime impulsionnel, ici à une fréquence de 10 Hz. La cavité laser, visible au centre de la photo, est simplement composée de deux miroirs, l'un concave, faisant office de miroir de sortie, l'autre plan. Le milieu amplificateur, constitué de molécules de pyrrométhène 597 dispersées dans une matrice transparente polymère (du PMMA), est déposé à la tournette pour former une couche fine (20µm) sur une lame de verre (placée au milieu de la cavité, entre les deux miroirs). La photographie est prise avec un temps de pose long en balayant un papier le long des faisceaux laser : les points que l'on voit sont les spots apparaissant sur le papier au cours de son déplacement (on est en régime impulsionnel). Il n'y a aucun post traitement numérique sur l'image.



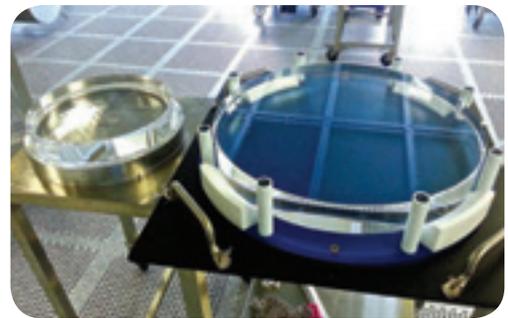
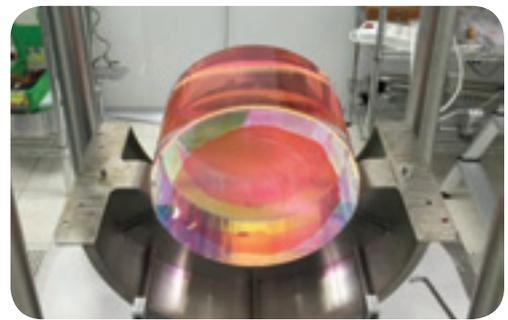
Laser organique solide en cavité verticale externe (gros plan)

Le colorant organique utilisé dans cette expérience est la rhodamine 640, qui absorbe dans le vert et émet dans le rouge (autour de 630 nm). Le laser de pompe, à droite, est un laser Néodyme:YAG déclenché (nanoseconde), doublé en fréquence pour obtenir le faisceau à 532 nm. Le laser fonctionne en régime impulsionnel, ici à une fréquence de 10 Hz.

La lumière pour explorer les quatre infinis

Les quatre infinis considérés dans ce dossier correspondent aux quatre cas limites des inégalités du spectre de Fourier :

- l'infiniment petit et la plus haute résolution spatiale : l'angle solide occupé par un faisceau laser peut être élargi sans perte de cohérence spatiale, de sorte que la surface de la tache focale peut être réduite à λ^2 , ce qui correspond à une focalisation extrême. C'est la limite de résolution décrite par Ernst Abbe en 1873, puis raffinée par Lord Rayleigh en 1896. Jean-Jacques Greffet explique dans son article comment repousser cette limite de la longueur d'onde et permettre ainsi l'exploration de dimensions spatiales nanométriques ;
- l'infiniment grand et l'exploration de l'Univers par les astronomes : à l'inverse, augmenter le diamètre d'un faisceau permet de réduire sa divergence et de résoudre angulairement des points sources très éloignés. C'est toute la démarche des astronomes lorsqu'ils augmentent la taille de leurs télescopes, organisent leur mise en phase ou corrigent les fronts d'onde grâce à l'optique adaptative. La cohérence spatiale des faisceaux lumineux est ici encore le facteur primordial. Les exploits récents des astronomes seront décrits par Pierre Encrenaz et ses confrères : gravitation et lumière s'y retrouvent avec les mirages gravitationnels, les trous noirs, la matière noire et les découvertes de la mission Planck sur la cosmologie primordiale, qui nous seront présentées par Jean-Loup Puget. La croissance des toutes premières galaxies échappant à l'appétit vorace des trous noirs massifs nous sera exposée par Françoise Combes. L'aventure toute récente de l'imagerie directe des exoplanètes nous sera contée par Anne-Marie Lagrange, pionnière du domaine. Elle fait appel aux progrès les plus récents de l'optique adaptative et de la coronographie détaillés respectivement par Pierre Léna et Daniel Rouan ;
- l'infiniment court et la plus haute résolution temporelle : augmenter la largeur spectrale d'une source cohérente permet de fabriquer des impulsions de plus en plus courtes. C'est la démarche qui nous est proposée par Daniel Kaplan, avec les lasers femtosecondes, et par Anne L'Huillier, pour voir la dynamique interne des atomes au moyen des impulsions de lumière attosecondes. Les impulsions courtes donnent accès aux grandes puissances instantanées et à bien des applications : l'optique non linéaire, la génération d'harmoniques et les mélanges de fréquences, l'accélération de particules chargées par la lumière, etc.;
- l'infiniment long et le temps atomique : la largeur spectrale des lasers peut au contraire être extraordinairement réduite pour obtenir un rayonnement quasi monochromatique dont la phase temporelle se conserve sur des durées extrêmement longues. La fréquence peut être facilement asservie à une fréquence atomique parfaitement stable et reproductible, et constituer ainsi une horloge optique très stable pour garder le temps *ad vitam aeternam*. Il s'agit d'une spécialité du SYRTE, à l'Observatoire de Paris, qui nous sera présentée par Sébastien Bize. À noter que, sans violer les inégalités de Fourier, le spectre peut être très large tout en étant constitué par un peigne de composantes très étroites, individuellement quasi monochromatiques et de fréquences très bien contrôlées. C'est ce qui est réalisé dans les lasers femtosecondes à modes verrouillés en phase, qui permettent le raccordement direct des fréquences optiques et des fréquences microondes et leur mesure très précise (prix Nobel 2005 de Hall et Haensch).



Des interféromètres dans les interféromètres

L'interféromètre Virgo, projet franco-italien situé à Cascina (Italie), a été conçu et construit à partir des années 80 sous l'impulsion, en France, d'Alain Brillet. C'est l'un des instruments d'optique les plus élaborés jamais construits, à l'instar de projets analogues aux États-Unis (LIGO). Il permet de mesurer une infime variation relative de longueur induite par le passage d'une onde gravitationnelle. La structure de base est un interféromètre de Michelson géant dont le cœur est contenu dans le bâtiment central carré : une lame séparatrice inclinée à 45 degrés y divise le faisceau laser incident suivant deux directions perpendiculaires. Chacun de ces bras a une longueur de trois kilomètres, mais chacun contient une cavité résonnante de Fabry-Pérot permettant d'augmenter encore le trajet aller et retour de la lumière jusqu'à une longueur effective de plus de 200 km grâce à des réflexions multiples. Les deux faisceaux reviennent ensuite se recombiner sur la séparatrice de façon à être en opposition de phase (interférence destructive) sur un photodétecteur, qui ne verra donc de lumière que si une onde gravitationnelle vient créer une toute petite différence de marche entre les deux bras, générant un signal proportionnel à l'amplitude de l'onde gravitationnelle. L'essentiel de la lumière revient donc vers le laser source. Pour augmenter encore l'intensité de la lumière dans l'interféromètre, un miroir additionnel va recycler cette lumière en la renvoyant vers le Michelson. L'intensité de la lumière atteint ainsi plusieurs centaines de kilowatts dans les résonateurs de Fabry-Pérot à partir de seulement cent watts de puissance laser incidente. Le petit bâtiment sur la gauche contient le miroir d'extrémité d'une autre cavité Fabry-Pérot, en anneau et de longueur 144 m, servant à filtrer spatialement le faisceau laser lui assurant une cohérence spatiale optimale avant son entrée dans le Michelson.

En bas à gauche : une infrastructure hors normes.

Vue intérieure de l'un des tunnels de 3 km : on y voit le tube à vide de diamètre 1,20 m contenant le faisceau laser. Ce tube a été construit par sections de 15 m, et le métal a été traité de façon à maintenir un très bon vide.

En bas à droite : une optique de course.

La photo du haut montre un miroir de cavité Fabry-Pérot de 42 kg, suspendu par des fibres de silice collées au miroir par adhérence moléculaire pour minimiser le frottement. Les deux pièces optiques de la photo du bas sont respectivement un miroir de cavité et la séparatrice du Michelson, de diamètre 55 cm et d'épaisseur 20 cm, après dépôt des couches diélectriques semi-réfléchissantes.

D'autres horizons, et quelques perspectives...

La lumière permet également d'aborder nombre d'autres rives en partie inexplorées de la physique d'aujourd'hui, que nous ne ferons qu'évoquer rapidement :

- le vide et la création de paires de particules et d'antiparticules : le physicien sait faire jaillir des particules massives à partir du vide de matière avec de la lumière elle-même sans masse, le prix à payer étant la création simultanée d'antimatière. Inversement, matière et antimatière s'annihilent pour redonner de la lumière. Ainsi, le vide devient polarisable et non linéaire pour la lumière de forte intensité ;
- le zéro absolu, les atomes froids et la recherche des très basses températures : la lumière permet de refroidir les atomes jusqu'à des températures extrêmement basses - de l'ordre du nanokelvin - et de réaliser ainsi de nouveaux états de la matière. Elle a permis la création et la manipulation d'ondes de matière avec des propriétés de cohérence analogues à celles de la lumière des lasers ;
- les températures les plus élevées et la fusion thermonucléaire : depuis longtemps, le développement de lasers de très grande puissance laisse espérer qu'on pourra bientôt atteindre les températures et les pressions requises pour la fusion de l'hydrogène (voir le Laser Mégajoule du CEA) et concurrencer, pour la production future d'énergie, les grands tokamaks comme celui du projet international ITER ;
- la vitesse de la lumière et les tachyons : on ne sait pas accélérer une particule massive jusqu'à la vitesse de la lumière, qui reste une limite infranchissable, tout comme le zéro absolu évoqué précédemment. Lorsqu'un objet est accéléré au voisinage de la vitesse de la lumière, son temps propre ralentit de plus en plus, jusqu'à s'arrêter : c'est l'histoire du voyageur de Langevin qui, après un périple au voisinage de la vitesse de la lumière, retrouve sur Terre son frère jumeau beaucoup plus âgé que lui. Néanmoins, certains physiciens ont imaginé un monde au-delà cette vitesse, le monde des tachyons, doté de propriétés surréalistes (masse imaginaire, etc.). De façon analogue, le mouvement s'arrête au voisinage du zéro absolu. Mais les températures négatives, quant à elles, nous sont devenues familières puisqu'elles sont utilisées pour amplifier la lumière dans les lasers ;
- renverser le sens du temps, voilà un autre rêve que permet la lumière dans certains systèmes atomiques, certes encore bien limités. En revanche, renverser le sens de propagation de la lumière et lui faire parcourir le chemin qui la ramène à sa source est une réalité courante, que permet la conjugaison de phase dans un matériau non linéaire ;
- la conquête des fréquences les plus élevées avec des lasers X et γ , les communications à des vitesses et sur des distances considérables, grâce aux fibres optiques qui ont envahi notre quotidien et transfèrent à distance le temps des horloges optiques, la réalisation d'ordinateurs quantiques, d'interféromètres atomiques, etc...

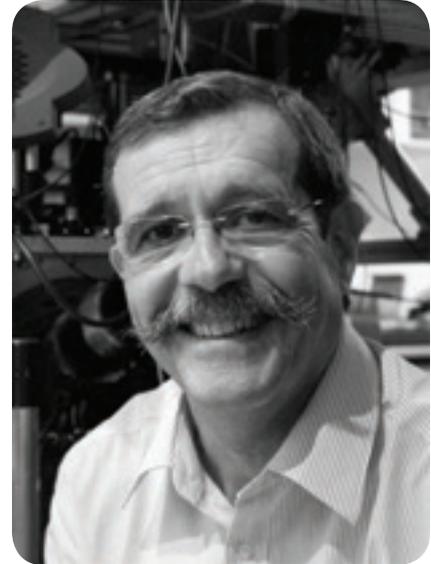
On le voit, dans les seuls domaines de la physique et de l'astronomie, les progrès de l'optique moderne permettent d'affronter avec beaucoup de succès nombre de limites rencontrées par l'homme dans son exploration de la nature.

La lumière au cœur des révolutions quantiques

Alain Aspect

Membre de l'Académie des sciences, Laboratoire Charles-Fabry, Institut d'Optique Graduate School/CNRS/université Paris-Sud, Palaiseau

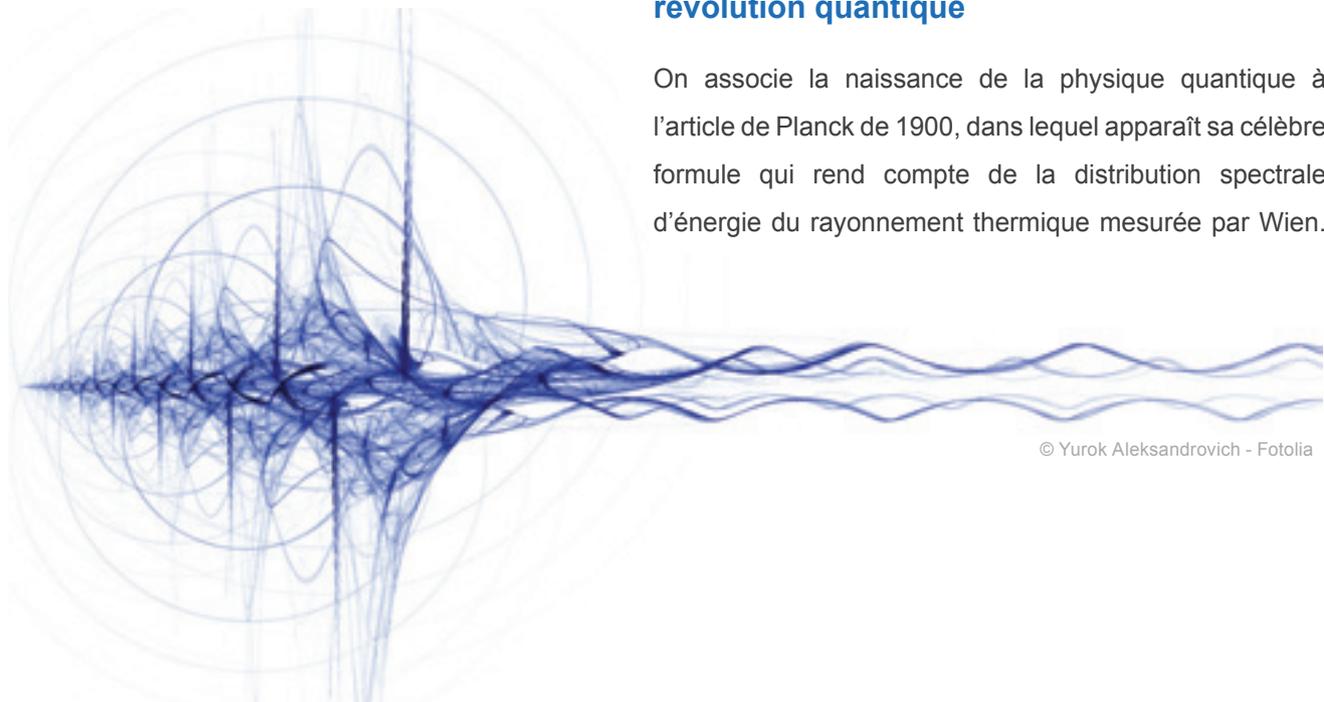
C'est avec la lumière qu'émerge la notion de dualité onde-corpuscule, comprise par Einstein dès 1909, alors qu'elle ne sera introduite pour les particules matérielles qu'en 1923, par Louis de Broglie. Ce concept est à la base de la première révolution quantique, à la fois fondamentale et technologique. La découverte en 1935 - encore par Einstein - du concept d'intrication va conduire à une nouvelle révolution quantique, lorsque le théorème de Bell et les expériences sur les photons intriqués mettront en évidence le caractère extraordinaire de l'intrication quantique. Ce sont donc encore des propriétés inattendues de la lumière qui ont conduit au développement de la deuxième révolution quantique. Aujourd'hui étendue à tous les objets quantiques naturels (atomes, ions, électrons...) ou artificiels (jonctions Josephson...), cette nouvelle révolution ouvre des perspectives technologiques fascinantes.



© Jean-François Dars - Institut d'Optique-Alain Aspect

Dualité onde-corpuscule et première révolution quantique

On associe la naissance de la physique quantique à l'article de Planck de 1900, dans lequel apparaît sa célèbre formule qui rend compte de la distribution spectrale d'énergie du rayonnement thermique mesurée par Wien.

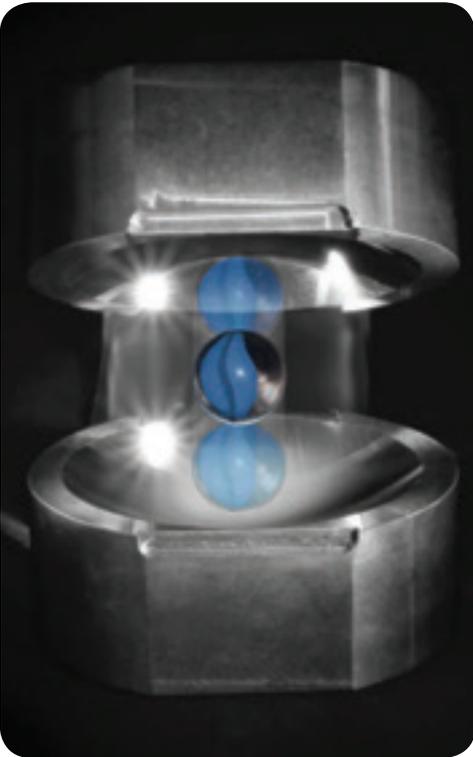


© Yurok Aleksandrovich - Fotolia

© M. Gove - Fotolia



© Michel BRUNE/LKB/CNRS Photothèque



© Tomasz Zajda - Fotolia



Tous les efforts des plus grands physiciens de l'époque pour comprendre ces observations avaient échoué, et Planck dut avoir recours à une hypothèse radicale : les échanges d'énergie entre lumière et matière se font non pas de façon continue, comme l'électrodynamique classique le décrit, mais par grains élémentaires d'énergie proportionnelle à la fréquence de la lumière.

C'est une hypothèse encore plus révolutionnaire que va faire Einstein dans un article de 1905 : non seulement les échanges entre lumière et matière se font de façon discontinue, par paquets élémentaires, mais le rayonnement lui-même est formé de grains élémentaires d'énergie, des *LichtQuanten*, dont la valeur E_q s'exprime à l'aide de la constante h introduite par Planck, et est proportionnelle à la fréquence ν de la lumière ($E_q = h\nu$). L'année 1905 est une année miraculeuse pour Einstein, qui vient de découvrir la relativité restreinte, ce qui l'amène à conclure que les quanta de lumière ont également une quantité de mouvement, qui vaut $p = h\nu/c$. Cette hypothèse des quanta de lumière est reçue négativement par les physiciens de l'époque (voir l'excellent livre « Einstein and the quantum », par A. Douglas Stone, *Princeton University Press*, 2013). Il faut bien dire que mis à part quelques observations de Hertz sur l'effet photoélectrique, peu de faits expérimentaux requièrent la quantification du rayonnement. Il faudra quinze ans pour que le grand expérimentateur Millikan fasse des mesures précises de l'effet photoélectrique qui confirment, en contradiction avec son intuition initiale, la justesse de l'hypothèse d'Einstein. Et c'est en particulier pour cette explication de l'effet photoélectrique qu'Einstein recevra le prix Nobel de 1921.

La réticence des physiciens face aux quanta de lumière d'Einstein est facile à comprendre. Le 19^e siècle avait vu le triomphe du modèle ondulatoire de la lumière, développé par Young et Fresnel, contre le modèle corpusculaire de Newton, qui prévalait depuis plus d'un siècle. Étudiant les phénomènes d'interférence, de diffraction, de double réfraction, ils avaient montré qu'on ne peut les interpréter qu'en admettant que la lumière est une onde. La nature de cette onde est encore



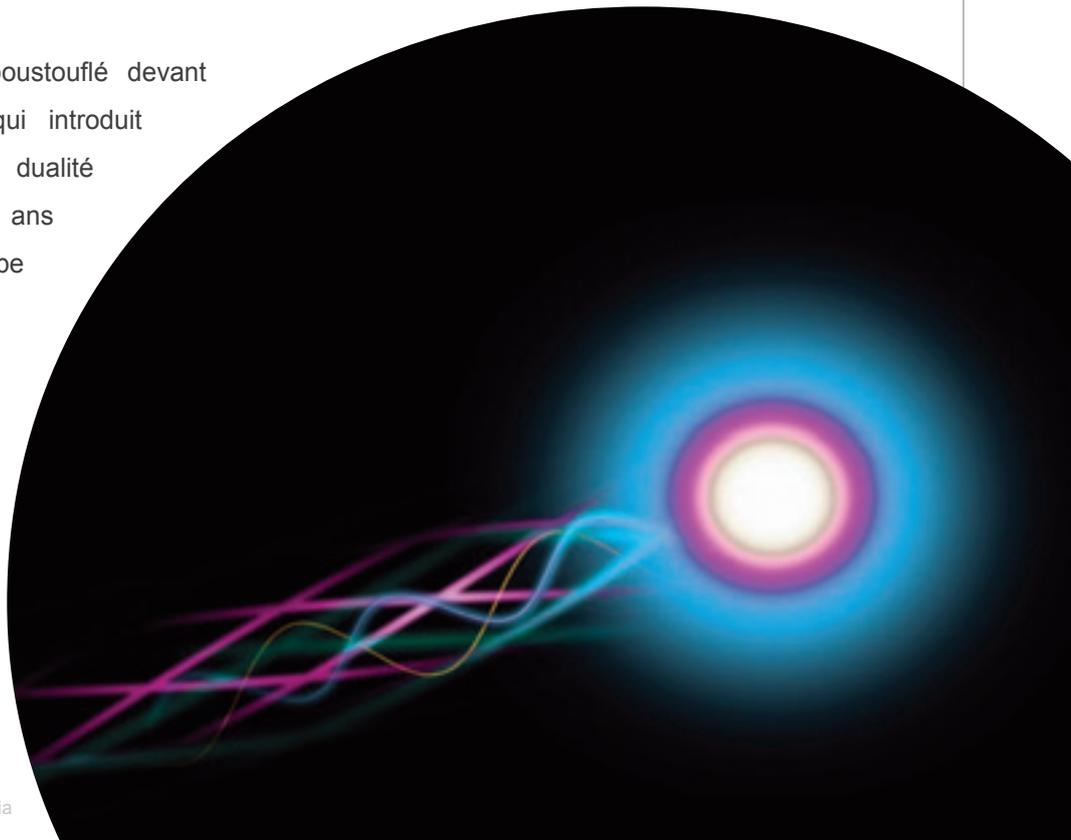
Portrait d'Albert Einstein
peint par Max Wulfart en
1921

inconnue au moment de l'extraordinaire série de mémoires de Fresnel¹, publiés entre 1815 et 1822, qui donnent une vue complète de toute l'optique classique, encore valable aujourd'hui. Le triomphe de la théorie ondulatoire de la lumière sera parachevé un demi-siècle plus tard, lorsque Maxwell découvrira la nature jusque là inconnue des ondes de Fresnel : ce sont des ondes électromagnétiques.

Le modèle corpusculaire de la lumière proposé par Einstein est antinomique avec le modèle ondulatoire, dont le succès est immense. D'où la réticence des grands physiciens de l'époque, bien résumée dans une lettre de Planck, Nernst, Rubens et Warburg, écrite en 1913 pour soutenir l'élection d'Einstein à l'Académie des sciences de Berlin. On peut y lire : « *En bref, on peut dire que parmi les grands problèmes dont la physique moderne abonde, il n'en est guère qu'Einstein n'ait marqué de sa contribution. Il est vrai qu'il a parfois manqué le but lors de ses spéculations, par exemple avec son hypothèse des quanta lumineux ; mais on ne saurait lui en faire le reproche, car il n'est pas possible d'introduire des idées réellement nouvelles, même dans les sciences les plus exactes, sans parfois prendre des risques².* »

Einstein était bien sûr conscient du problème posé par l'incompatibilité entre ses quanta de lumière et l'ensemble des comportements ondulatoires observés en optique. Il aborde cette question difficile dans une conférence donnée à Salzbourg en 1909. Après la discussion d'une incroyable « expérience de pensée » dans laquelle coexistent les comportements ondulatoires et corpusculaires, Einstein rappelle que les phénomènes d'interférence et de diffraction obligent à concevoir la lumière comme une onde, puis il continue : « *Il est [...] indéniable qu'il existe un ensemble important de faits relatifs au rayonnement qui indiquent que la lumière possède certaines propriétés fondamentales que l'on comprend beaucoup mieux en adoptant le point de vue de la théorie Newtonienne de l'émission de la lumière que celui de la théorie ondulatoire. C'est pourquoi je pense que la prochaine étape du développement de la physique théorique nous fournira une théorie de la lumière que l'on pourra interpréter comme une sorte de fusion de la théorie ondulatoire et de la théorie de l'émission de la lumière.* »

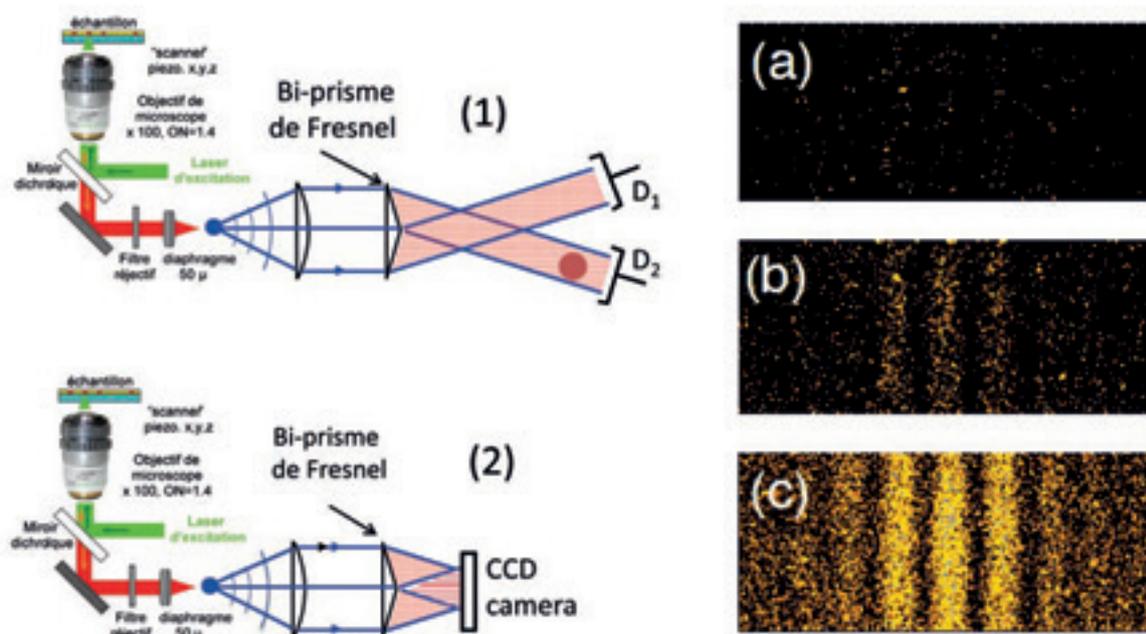
Comment ne pas être époustoufflé devant cette lucidité d'Einstein, qui introduit explicitement la notion de dualité onde-corpuscule, quatre ans avant que Bohr ne développe son modèle d'atome quantifié, qui ne trouvera sa justification que dans la dualité onde-corpuscule des électrons, proposée en 1923 par Louis de Broglie. C'est donc en réfléchissant aux



propriétés de la lumière qu'Einstein a dégagé le concept fondamental à la base de la première révolution quantique, formalisé dès 1925 par Schrödinger, tandis que Heisenberg invente la « mécanique des matrices ». Avec la synthèse de Dirac, qui montre l'équivalence des deux approches, la mécanique quantique moderne est née. En moins de deux décennies, elle va donner une description profonde et quantitative des propriétés de la matière et de la lumière, ainsi que de leurs interactions : les phénomènes d'absorption et d'émission. Au-delà de la compréhension de phénomènes qui avaient résisté aux physiciens classiques, elle conduira, après la seconde guerre mondiale, à l'invention de nouveaux dispositifs, le laser et le transistor, qui ont bouleversé notre société autant que le fit l'invention de la machine à vapeur, deux siècles plus tôt.

Et pourtant, même si l'on maîtrise le formalisme mathématique qui en rend compte, la dualité onde-corpuscule reste un grand mystère conceptuel, comme le souligne Richard Feynman dans son célèbre cours de physique, publié en 1963 : « *In this chapter we shall tackle immediately the basic element of the mysterious behavior in its most strange form. We choose to examine a phenomenon which is impossible, absolutely impossible, to explain in any classical way, and which has in it the heart of quantum mechanics. In reality, it contains the only mystery. We cannot make the mystery go away by 'explaining' how it works. We will just tell you how it works. In telling you how it works we will have told you about the basic peculiarities of all quantum mechanics.* »

Si personne ne doutait plus de la validité du concept, il fallut pourtant attendre le milieu des années 1980 pour qu'une expérience utilisant la lumière en donne une illustration directe³. Cette expérience, réalisée dans le cadre de la thèse de Philippe Grangier, utilisait la première « source de photons uniques » jamais



Version moderne de l'expérience de Grangier-Aspect, réalisée en 2005 à l'ENS de Cachan, dans l'équipe de Jean-François Roch⁴

Le faisceau de lumière constitué de photons uniques est dilaté et envoyé sur un bi-prisme de Fresnel, de telle sorte que la moitié haute du faisceau est déviée vers le détecteur D2, tandis que la partie basse est déviée vers le détecteur D1 (1). Si l'on a un seul corpuscule, il passera soit dans le prisme du haut et sera détecté par D2, soit dans le prisme du bas et sera détecté par D1, mais il n'y aura aucune détection simultanée par D1 et D2. Cette absence de détection en coïncidence par D1 et D2 permet de vérifier que l'on a bien affaire à une source de photons uniques. Si l'on insère maintenant, à l'intersection des deux faisceaux, un détecteur CCD, caméra très sensible qui permet de voir l'arrivée de chaque photon (2), on constate que les photons vont s'accumuler dans des « franges brillantes », qui ne sont autres que les franges d'interférence que Fresnel avaient observées grâce à son dispositif. Les images de droite montrent la construction progressive des franges d'interférence, photon par photon : elles sont obtenues respectivement au bout de 20 secondes (a), 200 secondes (b) et 2 000 secondes (c). Une vidéo montrant la construction de ces franges est disponible par exemple sur <http://www.lcf.institutoptique.fr/Alain-Aspect-homepage>.

construite, à notre connaissance. Les techniques d'optique quantique moderne permettent aujourd'hui de produire assez simplement de telles sources.

La deuxième révolution quantique : intrication et objets quantiques uniques

L'intrication est une propriété quantique dont le caractère extraordinaire a été découvert par Einstein et ses collaborateurs Boris Podolsky et Nathan Rosen : elle est au cœur du fameux « article EPR », publié dans le journal *Physical Review* en 1935. Pour deux particules dans un état intriqué, le formalisme quantique prévoit des corrélations extrêmement fortes entre certains résultats de mesure, même lorsque les particules sont suffisamment éloignées l'une de l'autre pour ne pas pouvoir interagir. Pour expliquer de pareilles corrélations, la science classique propose que les deux objets aient des propriétés identiques avant la mesure, à l'instar des ressemblances physiques ou des profils médicaux analogues des vrais jumeaux, que l'on attribue à l'identité de leurs patrimoines génétiques. Adoptant un raisonnement de ce type à propos des particules intriquées, l'article EPR suggérait que le formalisme de la mécanique quantique doit être complété. Bohr s'opposa immédiatement à cette conclusion, affirmant qu'il était impossible de compléter le formalisme quantique sans lui faire perdre sa cohérence interne. Le débat dura pendant le reste de la vie des deux savants, sans aboutir à une conclusion, et sans susciter beaucoup d'intérêt de la part des physiciens, qui utilisaient quotidiennement avec succès le formalisme quantique. Il faut dire que le désaccord portait uniquement sur l'interprétation, et que le formalisme lui-même n'était remis en cause ni par Einstein, ni par Bohr.



© Photo IOGS / Alain Aspect

Source de paires de photons intriqués de l'Institut d'Optique, en 1982

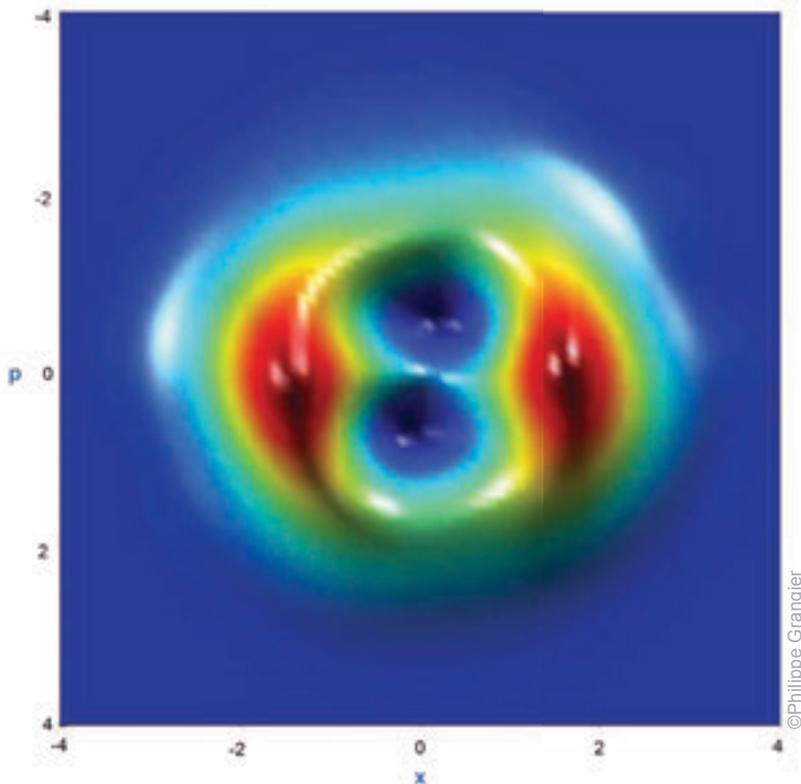
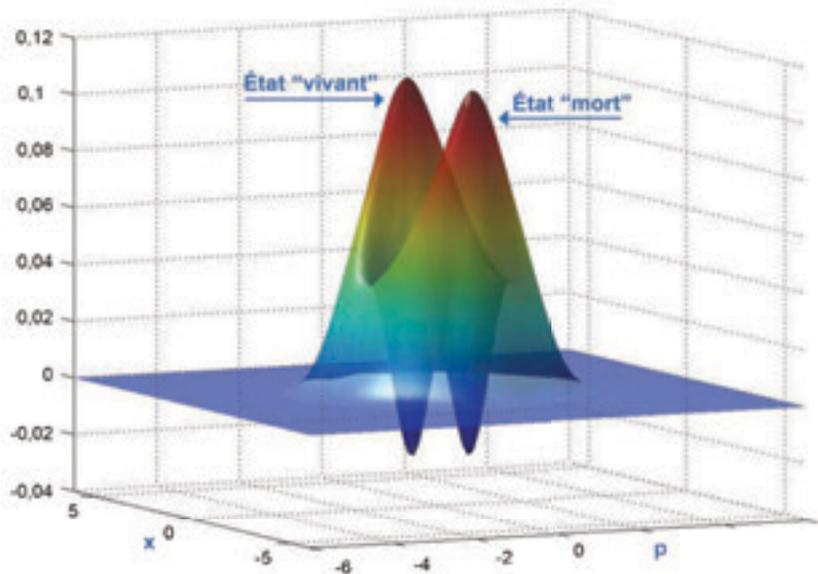
Cette source, qui resta la meilleure pendant plus d'une décennie, était un ensemble complexe comportant un jet atomique excité par un système de trois lasers parfaitement contrôlés. Les sources modernes sont constituées d'un simple cristal excité par un seul laser.

La situation évolua en 1965 lorsque John Stewart Bell, un théoricien irlandais travaillant au CERN, découvrit qu'adopter le point de vue d'Einstein aboutissait à une contradiction avec certaines prévisions du formalisme quantique relatives aux particules intriquées. Il devenait donc possible de trancher entre les deux points de vue, en réalisant une expérience dans une situation où ils donnaient des prévisions contradictoires.

On découvrit rapidement que de telles situations étaient très rares, et c'est une fois de plus la lumière qui offrit la situation la plus claire pour trancher expérimentalement. Dès 1972, John Clauser et Stuart Freedman réalisèrent une première expérience utilisant des paires de photons intriqués émis par désexcitation d'atomes de calcium : ils trouvèrent un résultat en accord avec la physique quantique, et en désaccord avec les inégalités de Bell découlant du point de vue d'Einstein. Remarquable exploit expérimental, cette expérience restait pourtant assez éloignée des schémas idéaux, les « expériences de pensée », sur lesquels portaient les discussions théoriques, et c'est pourquoi une nouvelle série d'expériences fut conçue et réalisée à l'Institut d'Optique, alors à Orsay. Les résultats, publiés en 1981-82, étaient beaucoup plus précis et, surtout, avaient été obtenus dans des schémas beaucoup plus proches des expériences de pensée. La conclusion était claire : il fallait renoncer à la vision « réaliste locale » du monde, défendue par Einstein. On ne pouvait plus affirmer qu'un objet localisé dans l'espace temps possède en lui l'ensemble des propriétés - sa réalité physique - qui déterminent les résultats des mesures que l'on effectue sur lui. Une paire intriquée constitue un tout inséparable, dont les propriétés ne se résument pas à la somme de propriétés de ses composants.

Au-delà de l'importance conceptuelle de ce résultat, ces expériences allaient attirer l'attention des physiciens sur le caractère extraordinaire de l'intrication, ignoré jusque là par la plupart d'entre eux, à l'exception notable de Schrödinger. Ce dernier avait immédiatement souligné l'importance de la propriété découverte par Einstein et ses collègues en 1935, et utilisé pour la première fois le mot *entanglement* - intrication, en français - pour la décrire⁵. Un témoignage remarquable de cette prise de conscience tardive de l'importance de l'intrication peut être trouvé dans un article de 1982 où Feynman écrit, après avoir cité la violation des inégalités [de Bell]⁶ : « *I've entertained myself always by squeezing the difficulty of quantum mechanics into a smaller and smaller place, so as to get more and more worried about this particular item. It seems to be almost ridiculous that you can squeeze it to a numerical question that one thing is bigger than another. But there you are - it is bigger than any logical argument can produce, if you have this kind of logic.* » Ainsi, plus de vingt ans après avoir affirmé, comme nous l'avons vu plus haut, que la dualité onde-corpuscule était le seul mystère de la mécanique quantique, Feynman mettait en relief le deuxième mystère quantique, l'intrication. Et dans le même article, il tirait la conclusion qu'aucun ordinateur classique ne pourrait jamais simuler un tel phénomène dès lors qu'il mettrait en jeu un nombre assez grand de particules. Il fallait donc avoir recours à un calculateur quantique : l'idée d'ordinateur et de simulateur quantique était née. Dès lors, il n'était pas illégitime de parler de deuxième révolution quantique^{7,8}.

La deuxième révolution quantique vise à utiliser l'intrication quantique pour réaliser des calculs ou des mesures qui apparaissaient hors de portée des méthodes les plus avancées connues vers 1970. En



Lumière visible dans un état « chat de Schrödinger »

Le champ oscille en même temps avec deux phases distinctes, comme le montre la densité de quasi-probabilité dans l'espace des phases (document Philippe Grangier). Un tel état évoque le chat de Schrödinger qui est en même temps vivant et mort, une conséquence étrange de l'intrication quand on l'applique à des objets macroscopiques.

fait, cette deuxième révolution quantique utilise un deuxième ingrédient, lui aussi apparu seulement dans le dernier quart du 20^e siècle : la possibilité d'observer, piéger et manipuler des objets quantiques individuels, qu'il s'agisse d'ions, d'atomes, de photons ou d'électrons. Cette possibilité apparaissait absurde aux physiciens des années 1950, comme le montre cet extrait d'un article de Schrödinger⁹ : « *We never experiment with just one electron or atom or (small) molecule. In thought-experiments we sometimes assume that we do; this invariably entails ridiculous consequences as, e.g., that a spherical de Broglie wave, which is supposed to represent 'one' electron, moving in an 'unknown' direction, suddenly collapses into a small wave parcel, when 'that' electron is detected at a definite spot. Nothing of the sort happens if the number 'one' is not ascertained, but may as well be zero or two or three...* » Un peu plus loin, il ajoute : « *It is fair to state that we are not experimenting with single particles, any more than we can raise Ichthyosauria in the zoo.* »

Et pourtant, on expérimente aujourd'hui avec des objets quantiques uniques dans tous les domaines de la physique. Pour s'en tenir à la lumière, on peut citer les expériences de photons uniques présentées plus haut, ou celles dans lesquelles des paires de photons sont soumises au test des inégalités de Bell : on y étudie les corrélations dans chaque paire individuelle, de même que l'étude des corrélations entre jumeaux n'a d'intérêt que si l'on s'intéresse aux deux jumeaux issus d'une même mère. Pour revenir aux photons individuels, un exemple spectaculaire est celui des expériences de l'équipe de Serge Haroche,





© Michel Brune/LKB/CNRS Photothèque

Miroirs de la boîte à photons de l'École normale supérieure, où ont été enregistrées la vie et la mort d'un photon unique

Les miroirs sont en cuivre et recouverts par une mince couche de niobium. Ils sont refroidis à une température proche du zéro absolu.

dans lesquelles on a pu, par exemple, suivre l'évolution d'un photon microonde stocké dans une cavité, de sa naissance jusqu'à sa mort.

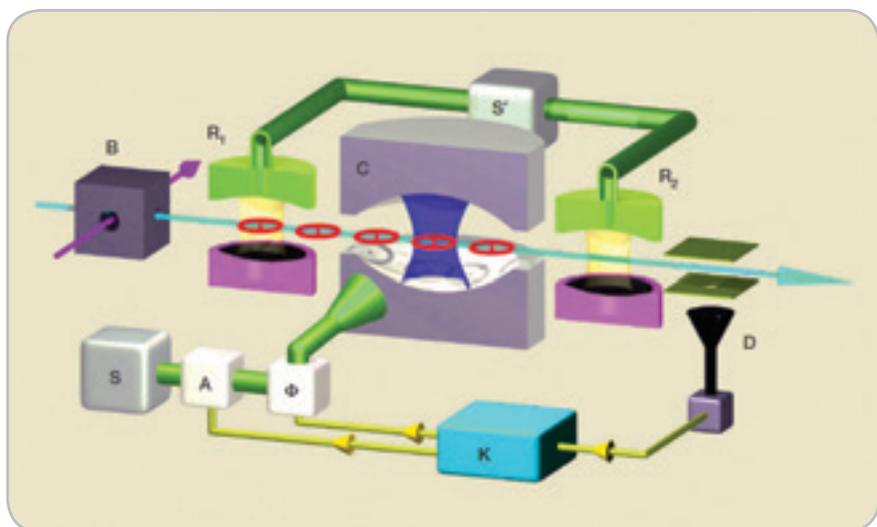
Une deuxième révolution quantique technologique ?

Aussi étonnantes qu'elles soient, en fait parce qu'elles sont étonnantes, ces expériences nous aident à mieux comprendre les mystères quantiques et stimulent notre imagination pour inventer de nouvelles méthodes d'ingénierie quantique, notamment pour la lumière et ses photons. Combinées aux développements parallèles dans le domaine des atomes, des ions, des semiconducteurs, des supraconducteurs, etc., ces méthodes seront peut être à la base d'une nouvelle révolution technologique, aboutissant à une transformation de la société comme la première révolution quantique a conduit à la société de l'information et de la communication.

La cryptographie et la métrologie quantique passent déjà des laboratoires de recherche fondamentale à la R&D et à la production commerciale. On peut imaginer qu'il en sera de même pour certains simulateurs quantiques. La question d'un ordinateur quantique digital reste ouverte, et personne ne peut dire si la quête d'un tel instrument, qui serait exponentiellement plus rapide que les ordinateurs actuels, débouchera. Mais il s'agit d'un problème passionnant dans lequel sont engagés les meilleurs laboratoires, et une chose est certaine : la lumière continuera d'être au cœur de cette recherche.

Dispositif permettant de contrôler les photons microondes au niveau individuel

Les atomes de Rydberg, représentés par les cercles rouges, traversent la boîte à photons C et effectuent une mesure non destructive de l'état du champ microonde permettant de corriger ce champ en contrôlant, à l'aide du circuit K, l'amplitude A et la phase Φ du champ correcteur.



© Michel Brune

1. Mémoires consultables sur www.academie-sciences.fr/pdf/dossiers/Fresnel/Fresnel_publi.htm
2. Cité dans *Albert Einstein, Œuvres choisies, 1 Quanta, Seuil/CNRS, page 36*
3. Grangier P, Roger G, Aspect A. Experimental-evidence for a photon anticorrelation effect on a beam splitter - A new light on single-photon interferences. *Europhysics Letters* 1986 ; 1 : 173-9. *Je peux témoigner de l'enthousiasme de Feynman lorsque je lui décrivis cette expérience, qui était en cours en 1984.*
4. Jacques V, Wu E, Tourny T, Treussart F, Aspect A, Grangier P, Roch JF. Single-photon wavefront-splitting interference - An illustration of the light quantum in action. *European Physical Journal* 2005 ; D 35 : 561-5E.
5. Schrödinger E. Discussion of probability relations between separated systems. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 1935 ; 31 : 555-63
6. Feynman RP. Simulating Physics With Computers. *International Journal Of Theoretical Physics* 1982 ; 21 : 467-889
7. Alain Aspect. John Bell and the second quantum revolution. In *Bell JS. Speakable and unspeakable in quantum mechanics: Collected papers on quantum philosophy*. Cambridge university press, 2004
8. Dowling JP, Milburn GJ. Quantum Technology: the second quantum revolution. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London - A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 2003 ; 361 : 1655-74
9. Schrödinger E. Are there quantum jumps, part II. *The British Journal for the Philosophy of Science* 1952 ; 3 : 233-42



La nanophotonique



© DR

Jean-Jacques Greffet

Laboratoire Charles-Fabry, Institut d'Optique Graduate School, CNRS, Université Paris-Sud, Orsay

Le terme nanophotonique, apparu il y a une quinzaine d'années, désigne les développements de l'optique à l'échelle du nanomètre. Pourquoi cette échelle joue-t-elle un rôle particulier ? Pourquoi parle-t-on de nanosciences, et jamais de kilosciences ou de millisciennes ? Les lois physiques décrivant le comportement de la matière sont en fait valables pour des objets dont la taille est supérieure à quelques nanomètres, mais cessent très souvent de l'être en deçà : cela ouvre un champ

de recherche pour comprendre ce qui régit les phénomènes à ces échelles où les effets quantiques deviennent importants. Cela ouvre également un champ d'applications technologiques puisque les nanosystèmes, étant régis par des lois différentes, sont susceptibles d'offrir de nouvelles fonctionnalités. Il est impossible de citer toutes les ruptures de paradigme qui sont intervenues depuis une quinzaine d'années, mais trois exemples illustrent bien le caractère interdisciplinaire de la nanophotonique.

L'imagerie super-résolue

L'un des premiers résultats obtenus dans le domaine de la nanophotonique concerne ce que l'on appelle la limite de diffraction. Depuis Ernst Abbe, on sait que l'on ne peut pas faire d'image de microscopie optique permettant de séparer des objets séparés par des distances inférieures à la longueur d'onde. Cette limite, appelée limite de résolution, a été



© Jean-Jacques Greffet

Monument commémorant la découverte, par Abbe, de la limite de résolution d des microscopes optiques (Iéna, Allemagne)

formalisée par Abbe : elle est gravée dans le marbre à Iéna, en Allemagne, où se trouve un monument à sa mémoire. Elle est aussi restée gravée dans l'esprit des physiciens comme une limite fondamentale.

Pourtant, il suffit de percer un trou très petit devant la longueur d'onde dans un écran opaque, puis de l'éclairer, pour disposer d'une tâche de lumière dont la taille ne dépend que de celle du trou, et non de la longueur d'onde. En déplaçant cette tâche de lumière au plus près de deux petits objets très proches, il est possible de les éclairer séparément et successivement, et ainsi de construire une image point par point. Si l'idée de principe a été publiée (et oubliée) plusieurs fois au cours de l'histoire, ce n'est qu'au milieu des années 80 que les groupes de Pohl, puis de Lewis, ont réussi à effectuer des images optiques super-résolues en tirant parti des techniques instrumentales développées lors de l'invention du microscope à effet tunnel. De fait, il faut pouvoir déplacer de quelques nanomètres un trou de quelques nanomètres en restant à quelques nanomètres des objets ! Le développement rapide de cette nouvelle microscopie optique - appelée microscopie optique de champ proche - a ouvert les esprits sur la nature très relative du caractère fondamental de la limite de résolution.

Ces techniques ont été suivies par l'avènement, dans les années 2000, de techniques de microscopie super-résolue travaillant en champ lointain. Fondées sur des principes très différents tirant parti d'effets non linéaires ou non stationnaires de la fluorescence de molécules, elles ont été introduites par Hell, Moerner et Betzig, récompensés par le prix Nobel de chimie en 2014.

La plasmonique

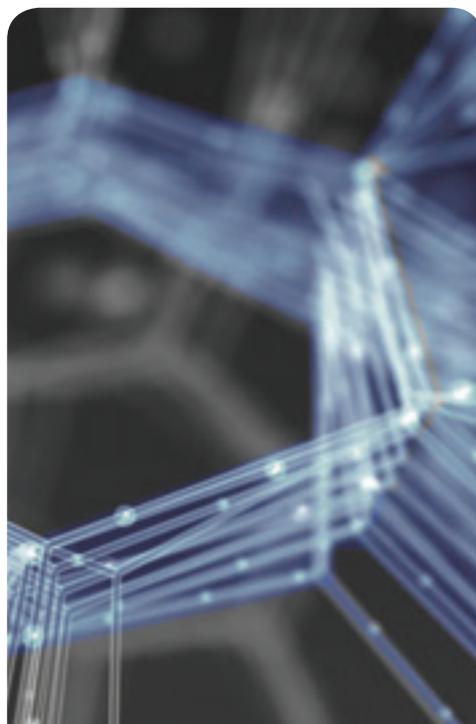
L'un des enjeux essentiels pour l'avènement de la microscopie de champ proche a été de confiner le champ à des échelles inférieures à la longueur d'onde. Cela est utile pour pouvoir réaliser des images, mais aussi pour pouvoir créer des champs intenses avec très peu d'énergie, pour



© Inok - Fotolia



© ARTO - Fotolia



© ake78 (3D & photo) - Fotolia

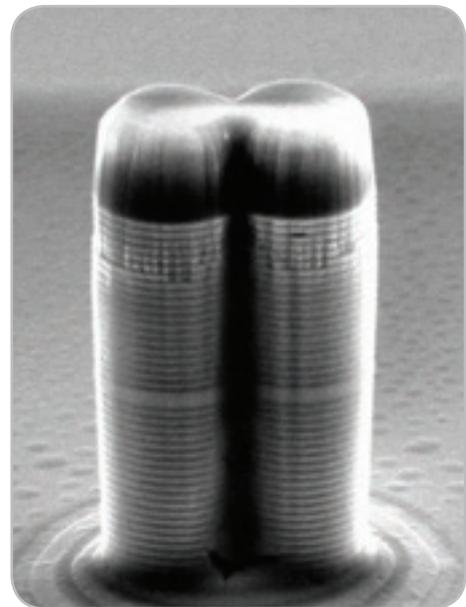
faire du stockage d'information à haute densité ou, encore, pour chauffer localement. L'idée est de réaliser une sorte d'entonnoir à lumière qui pourrait collecter la lumière incidente et la concentrer sur une surface environ mille fois plus petite. C'est très exactement ce que fait une antenne de télévision qui collecte le champ incident et l'envoie dans un fil dont la taille est très inférieure à la longueur d'onde.

Pour parvenir à ce résultat dans le domaine optique, un moyen est d'utiliser une petite sphère métallique, de quelques nanomètres de diamètre, dans laquelle les électrons peuvent osciller en phase. Ce mouvement de balancier a lieu dans la gamme des fréquences optiques, de sorte qu'un champ lumineux incident peut exciter de façon résonante ce mode appelé plasmon de surface. Cela fonctionne un peu comme un entonnoir, car l'énergie de l'onde incidente se trouve captée par la particule et concentrée au voisinage de la nanoparticule. On parle plus généralement de nanoantennes. La future génération de disques durs utilise ce type d'antennes pour chauffer le support magnétique sur une zone dont la taille est d'environ 20 nm.

De nouveaux matériaux

Le développement des techniques de nanofabrication a eu un impact considérable sur l'optique. On peut maintenant fabriquer des métamatériaux, c'est-à-dire des matériaux composites se comportant comme des matériaux homogènes ayant des propriétés que l'on ne trouve pas dans la nature, telles que des indices de réfraction négatifs. Ces matériaux sont, par exemple, constitués d'un ensemble périodique de spires métalliques sectionnées, qui se comportent comme des petits circuits RLC avec une fréquence de résonance dans le visible ou l'infrarouge. Cela ouvre des perspectives pour la mise au point de composants optiques sans aberrations et ultraplats.

Il est par ailleurs devenu possible de réaliser de véritables atomes artificiels, appelés boîtes quantiques. En ajustant leur forme ou leur taille, elles absorbent ou émettent de la lumière à la fréquence souhaitée. Ce sont des nanoparticules de semiconducteurs que l'on peut fabriquer soit par synthèse chimique, soit par épitaxie, c'est-à-dire par dépôt de matériaux, monocouche atomique par monocouche atomique. L'insertion de tels émetteurs uniques dans des micropiliers qui servent de cavités résonantes permet de réaliser des sources qui émettent des photons un par un à la demande. Certaines de ces boîtes sont des émetteurs de lumière très robustes, qui commencent à être utilisées pour les écrans d'affichage.



Micropiliers (diamètre 3 micromètres) utilisés pour créer des états quantiques de la lumière

© Pascale Senellart, Laboratoire de photonique et nanostructures, CNRS



La lumière pour découvrir l'Univers

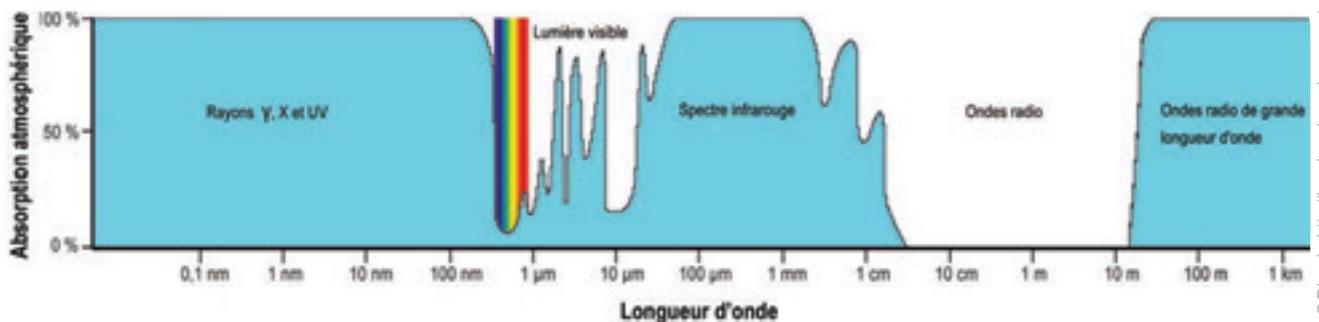


Pierre Encrenaz, avec Françoise Combes, Anne-Marie Lagrange, Pierre Léna, Jean-Loup Puget et Daniel Rouan*

Membres de l'Académie des sciences

L'atmosphère de la Terre a deux effets sur le rayonnement émis par un astre que l'on voudrait observer, depuis le sol, avec des détecteurs adaptés à sa longueur d'onde d'émission. D'une part, l'absorption par l'atmosphère est totale à certaines longueurs d'onde. D'autre part, le front d'onde émis par l'astre est perturbé par les inhomogénéités en température et teneur en vapeur d'eau présente dans les différentes couches de l'atmosphère. Les progrès de la recherche scientifique et technologique permettent de compenser de mieux en mieux ces effets et d'améliorer, ainsi, les capacités d'observation des astronomes. Avec, à la clé, des découvertes essentielles sur l'Univers...

Pour s'affranchir de l'absorption totale à certaines longueurs d'onde, il faut utiliser des ballons stratosphériques ou des satellites en orbite basse (300 km) - où l'atmosphère résiduelle de la Terre est presque nulle -, des satellites géostationnaires (à 36 000 km de la Terre), voire des satellites envoyés autour des planètes du système solaire.



À certaines longueurs d'onde, l'absorption des signaux par l'atmosphère est totale

© Nmedia - Fotolia



© destina - Fotolia



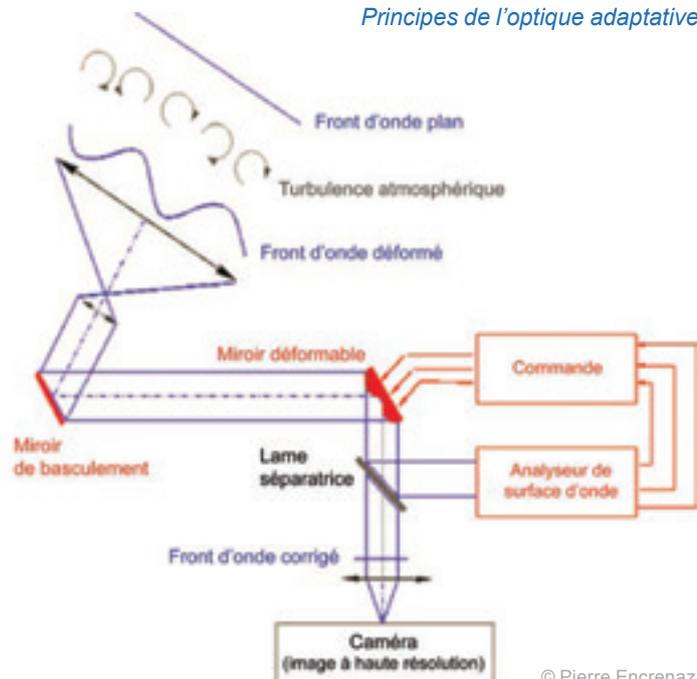
© mozZz - Fotolia



Quant aux perturbations atmosphériques, les techniques de compensation sont différentes selon la nature du signal observé. Pour les longueurs d'ondes radio, le déphasage entre les signaux reçus par plusieurs radiotélescopes est corrigé par la mesure de la quantité de vapeur d'eau précipitable dans la ligne de visée, grâce à un hygromètre spectral infrarouge. On peut également faire interférer les signaux reçus par des radiotélescopes distants de plusieurs milliers de kilomètres les uns des autres (Amérique, Australie, Europe, Inde), obtenant ainsi une résolution spatiale très élevée, équivalente à celle d'un télescope de très grande dimension, que l'on ne saurait mécaniquement construire. Dans les domaines visible et infrarouge, l'optique adaptative permet de corriger le fameux phénomène de scintillation des étoiles - l'image de l'étoile est étalée et fluctue sur la rétine de l'observateur ou la caméra du télescope - et de tirer parti de la résolution spatiale potentielle de télescopes optiques désormais de plus en plus grands (jusqu'à près de 40 m de diamètre).

La résolution spectrale des différents capteurs permet, grâce à leur spectre d'émission ou d'absorption, de détecter la présence et d'identifier des atomes (hydrogène, carbone, azote, fer, etc.), molécules et grains de poussière : c'est ainsi que l'on connaît plus de 200 molécules situées dans les nuages interstellaires - là où vont se former les étoiles - de notre Galaxie, plus de 80 dans la coma des comètes, ainsi que la composition des poussières interstellaires et circumstellaires.

Principes de l'optique adaptative



© Pierre Encrenaz

Les apports de l'optique adaptative

L'œil humain est un merveilleux organe, qui possède une faculté étonnante, celle d'adapter son ouverture (iris) à l'intensité de la lumière reçue, de modifier la distance focale de sa lentille (cristallin), pour obtenir sur la rétine l'image avec une mise au point optimale, et de laisser au cerveau, enfin, le soin de corriger une image en mouvement permanent pour obtenir une vision stable.

De façon analogue et depuis une trentaine d'année, les astronomes sont parvenus, par l'optique adaptative, à améliorer considérablement les images fournies par les télescopes terrestres aux longueurs d'onde de la lumière visible ou infrarouge. Celles-ci sont en effet fortement dégradées par l'agitation atmosphérique - effet de *seeing* - qui limite leur résolution, ou piqué. En implantant, dès les années 1990, un dispositif adaptatif sur l'un des télescopes de 8,2 m de diamètre du *Very Large Telescope* (VLT) européen (Chili), le piqué des images a été amélioré d'un facteur 20 environ. En outre, un tel dispositif permet la combinaison interférométrique de la lumière issue de plusieurs de ces quatre télescopes, ce qui a permis de gagner un nouveau facteur 10 sur la résolution, qui peut alors atteindre 2 millisecondes d'angle. La seule limitation au piqué provient alors du diamètre du télescope (limite de diffraction) ou, s'agissant de l'interféromètre, de la distance maximale entre les télescopes combinés. La nouvelle génération de télescopes géants en construction (*Extremely Large Telescope*, *ELT*), atteignant un diamètre de 39 m pour le projet européen au Chili (opérationnel vers 2024), ne serait pas concevable sans optique adaptative. Les raffinements de cette technique sont multiples : il est ainsi possible de créer des étoiles artificielles en inscrivant, à l'aide d'un puissant laser, des points lumineux sur une couche de sodium atmosphérique, vers 90 km d'altitude. Quand aucune étoile naturelle suffisamment brillante n'est disponible dans la direction visée, alors l'étoile artificielle permet la mesure des perturbations atmosphériques et leur correction par l'optique adaptative.

Deux des résultats les plus spectaculaires obtenus ces dernières années avec le VLT européen, grâce à l'optique adaptative, sont la découverte et la confirmation de l'existence d'une exoplanète autour de l'étoile β Pictoris, ainsi que la mise en évidence de la présence d'un trou noir massif (3,7 millions de fois la masse du Soleil) au centre de notre Galaxie.

Après les premiers prototypes des années 1990, les systèmes d'optique adaptative ont considérablement gagné en complexité, ainsi qu'en performances. Ainsi, l'instrument SPHERE, qui a été installé en 2014 sur le VLT, donne déjà de premiers résultats remarquables, avec notamment la récente découverte d'un extraordinaire phénomène autour de l'étoile *AU Microscopii*, située à 32 années-lumière du Soleil, connue pour posséder en orbite autour d'elle un disque de poussières et de gaz susceptible de former des exoplanètes. Ce disque, observé avec SPHERE et qui se présente vu par la tranche, a révélé de rapides et mystérieuses oscillations jamais observées ailleurs .

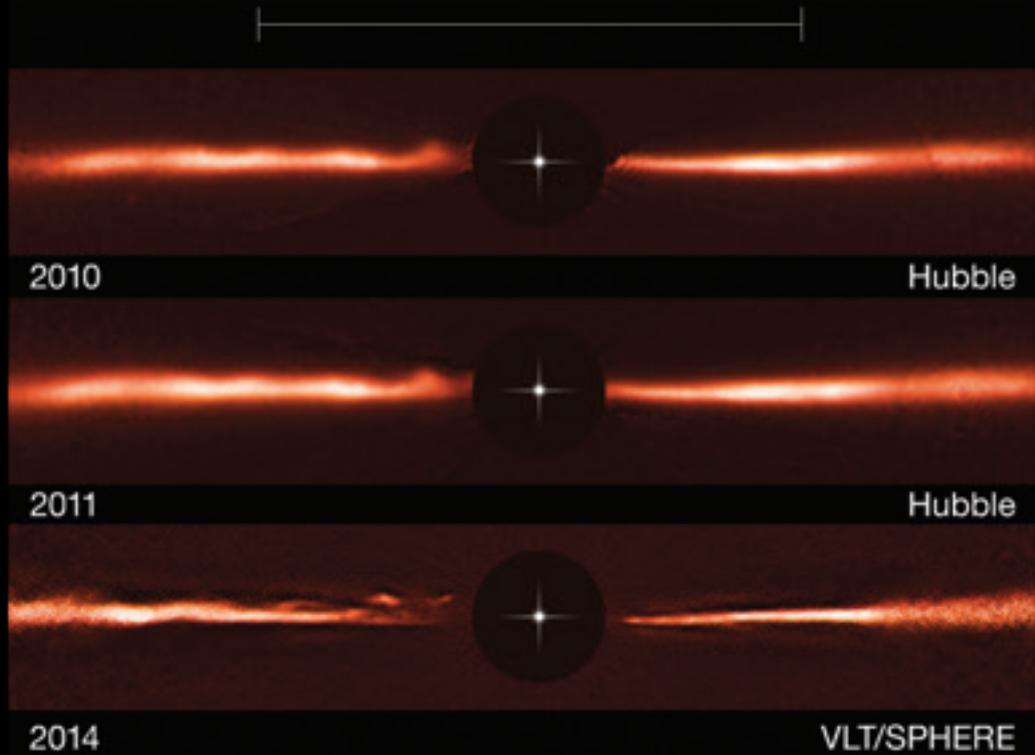
L'optique adaptative est loin d'avoir atteint ses limites. Née en astronomie, elle est désormais utilisée en ophtalmologie et en microscopie, forçant habilement la lumière reçue à livrer toutes les informations qu'elle contient.





Une étoile artificielle pour piloter l'optique adaptative

À partir de Yepun, l'un des quatre télescopes de 8,2 m du VLT, un faisceau laser est envoyé vers le ciel afin d'inscrire précisément une « étoile » sur la couche ionosphérique, et disposer ainsi d'une source de lumière artificielle précieuse pour faire fonctionner l'optique adaptative. La Voie lactée, ici dans la direction du trou noir de la constellation du Sagittaire, apparaît dans toute sa splendeur.



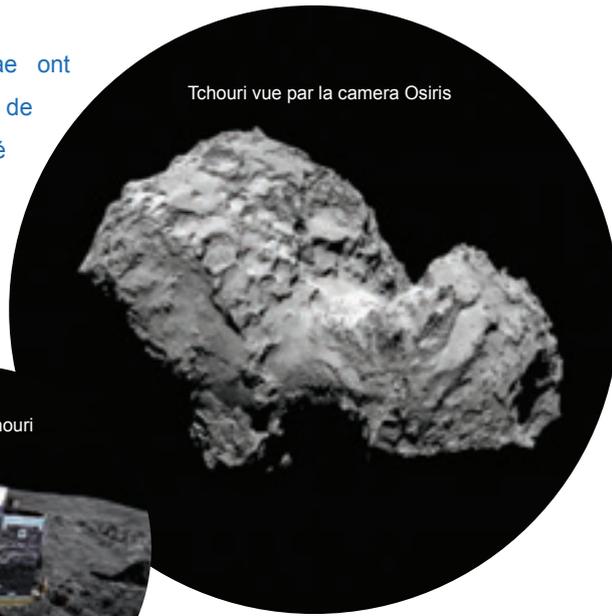
Oscillations du disque d'AU Microscopii révélées par l'optique adaptative

Le disque de l'étoile AU Microscopii (au centre, cachée par un disque occulteur), successivement observé par le télescope spatial Hubble, puis par l'instrument SPHERE installé sur le *Very Large Telescope* européen. La résolution de cette dernière image est d'environ 0,2 unité astronomique. La barre supérieure donne l'échelle, soit 60 unités astronomiques, diamètre de l'orbite de la planète Neptune dans le système solaire. Voir aussi la vidéo sur <https://www.eso.org/public/news/eso1538/>

- La sonde Rosetta et son acométisseur Philae ont révolutionné la connaissance de la structure de la comète Churyumov-Gerasimenko (porosité de 75 %) et de sa composition : rapports isotopiques des molécules sublimées lors du rapprochement avec le Soleil, intermittence des jets d'éjection, composition des poussières éjectées, etc. la mesure du mouvement par l'effet Doppler, la mesure des champs gravito-inertiels, celle de la température, etc. ;



Philae sur Tchouri



Tchouri vue par la camera Osiris

© ESA

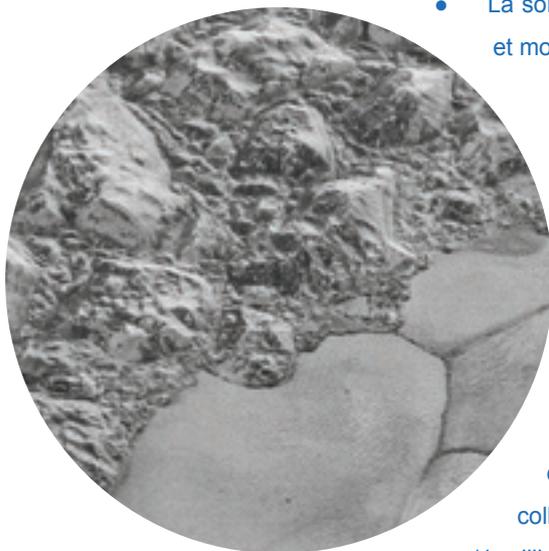
La sonde Rosetta à la découverte de la comète Churyumov-Gerasimenko, dite Tchouri

- Les observations de Titan, la plus grosse lune de Saturne, ont montré des îles mystérieuses apparaissant et disparaissant en quelques mois, ainsi que des dunes de centaines de kilomètres de long qui prouvent l'existence de vents très réguliers... au moins par le passé, puisqu'aucune vague n'a encore été observée à la surface des lacs et des mers découverts depuis 2005.



- Des jets moléculaires de glace et de vapeur d'eau ont été détectés sur Cérès, un objet transneptunien - i.e., situé au-delà de Neptune - de plus de 1 000 km de diamètre, et sur Encelade, autre lune de Saturne, démontrant l'existence d'océans sous la croûte de leur surface.

- La sonde *New Horizons* a permis d'observer les glaciers et montagnes de Pluton.



Pluton vue par la sonde New Horizons

- Les observations du satellite Herschel ont montré que le diamètre de l'astéroïde Apophis, et donc sa masse, sont plus élevés (+ 20 % et + 60 %, respectivement) que ne laissaient prévoir les mesures réalisées depuis le sol. Les forces non gravitationnelles (pression de radiation solaire, différence de réflectivité à sa surface, etc.) qui influent sur la trajectoire d'Apophis sont donc différentes de ce qui était annoncé, et la probabilité de collision avec la Terre beaucoup plus faible que prévue (1 millionième au lieu de 3 %) : en janvier 2029, Apophis devrait ainsi passer à 28 000 km de la Terre, au lieu des 14 000 km initialement envisagés.

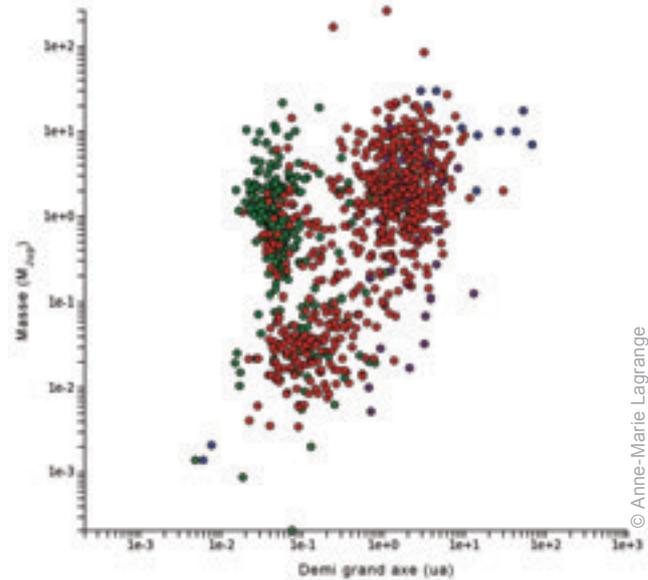
© NASA/JHUAPL/SwRI

Des observations jusqu'aux confins de l'Univers

Exoplanètes

En 1995, la découverte d'une planète autour d'une étoile semblable au Soleil a marqué le début d'un nouveau champ de recherche, l'exoplanétologie, c'est-à-dire l'étude des planètes en orbite autour d'étoiles autres que le Soleil. L'exoplanétologie a un lien étroit avec l'étude des disques protoplanétaires et des disques résidus de la formation planétaire, qui a débuté dans les années 80-90. Qu'elles soient telluriques ou gazeuses, on peut désormais étudier comment les planètes se forment à partir des poussières et du gaz du milieu interstellaire, et commencer à appréhender la diversité des systèmes planétaires. La détection des exoplanètes repose sur plusieurs méthodes :

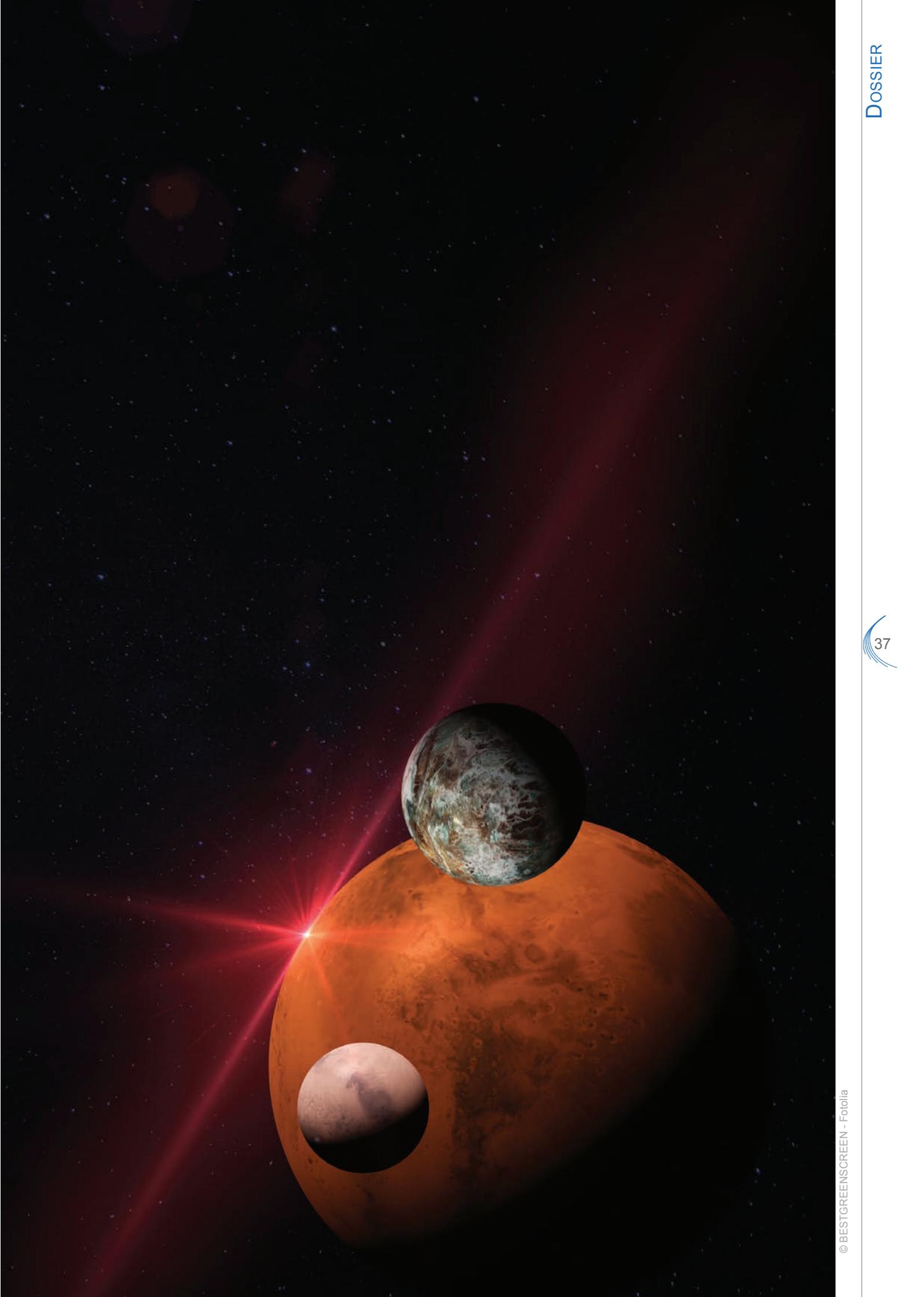
- l'analyse du signal (position, vitesse) des étoiles autour desquelles les exoplanètes tournent : on exploite le fait que planète et étoile se meuvent sous l'effet des lois de la gravitation de Newton. Les variations photométriques de l'étoile hôte, liées au passage éventuel de la planète entre l'étoile et l'observateur, qui provoque des éclipses partielles, sont également étudiées. Près de 2 000 exoplanètes ont été détectées par ces méthodes, toutes sur des orbites proches - moins de 5-6 unités astronomiques (ua) - de leur étoile (ua = distance entre la Terre et le Soleil, soit 149 597 871 km) ;



Exoplanètes détectées par différentes méthodes

Plusieurs familles de planètes sont visibles : planètes géantes très proches de leur étoile (Jupiters chauds), planètes de masse intermédiaire entre celle de la Terre et celle de Neptune (super Terres et mini Neptunes), qui n'ont pas d'équivalents dans le système solaire, planètes géantes lointaines ou très lointaines

- l'analyse de la lumière d'un astre très lointain : lors du passage d'un système étoile/planète entre cet astre lointain et l'observateur, l'éclat de l'astre lointain va connaître une amplification particulière, phénomène prévu par la théorie d'Einstein de la gravitation ;
- l'analyse, enfin, de la lumière des planètes elles-mêmes, grâce à l'imagerie directe. Toutefois, les planètes se trouvant, vues de la Terre, très proches angulairement de leur étoile et beaucoup moins brillantes, l'imagerie directe requiert l'utilisation de coronographes pour occulter la lumière de l'étoile. De plus, il est indispensable de corriger au préalable les perturbations du signal engendrées par la traversée de l'atmosphère terrestre, grâce à l'optique adaptative. Encore peu d'exoplanètes ont été imagées, mais beaucoup devraient l'être dans les années à venir. L'imagerie, en permettant d'observer des planètes évoluant à plusieurs ua de leur étoile, est très complémentaire des méthodes indirectes.



Grâce à ces observations, on sait que les systèmes planétaires extrasolaires ne sont pas rares dans l'Univers. Environ 5 % à 10 % des étoiles semblables au Soleil abriteraient des planètes géantes et, plus encore, des planètes telluriques. Les planètes détectées ont des propriétés orbitales (demi grand-axe, excentricité, inclinaison) bien plus variées que l'exemple du système solaire ne nous laissait prévoir. Cette diversité ne s'explique qu'en faisant appel à plusieurs scénarios de formation des géantes, et en admettant qu'une fois formées, les planètes évoluent de manière importante, soit par interaction avec le disque dans lequel elles naissent au cours des premiers millions d'années, soit par interaction dynamique avec d'autres planètes. Ces interactions pourraient ainsi expliquer la présence de planètes géantes très près de leur étoile, ou encore sur des orbites très inclinées, alors qu'elles se sont formées dans le disque, à quelques *ua* de leur étoile. On commence également à appréhender la diversité des intérieurs et des atmosphères planétaires.

Cette diversité entrevue est sans doute loin d'être entièrement explorée : les moyens actuels n'ont pas encore permis de détecter beaucoup de planètes géantes à des distances comparables aux orbites des planètes géantes du système solaire, ni de trouver des planètes telluriques au-delà de quelques fractions d'*ua*. Nous sommes ainsi incapables aujourd'hui de détecter un système analogue à notre système solaire, s'il existe. Cependant, les nouveaux télescopes et autres instruments vont permettre de poursuivre l'exploration de la diversité et de la formation des planètes et, de façon plus générale, de l'évolution des systèmes planétaires.

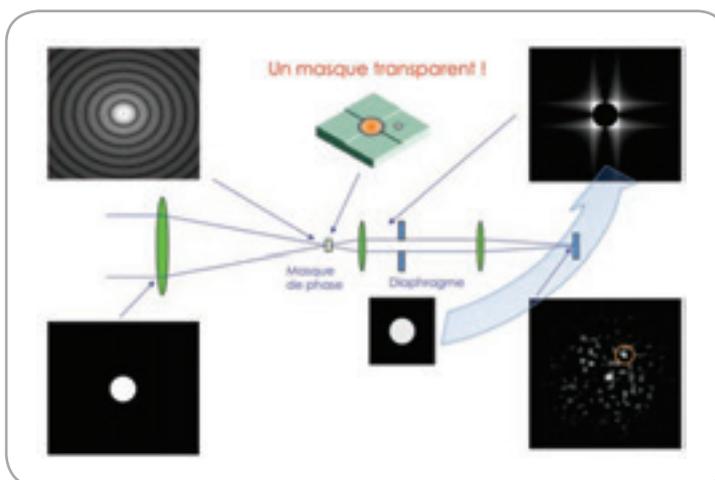


Pour observer la couronne solaire hors des périodes d'éclipse totale, l'astronome et académicien français Bernard Lyot a inventé un procédé permettant de réduire considérablement la lumière du disque solaire, diffractée et diffusée par les défauts de l'optique. Sa solution ? Combiner deux masques spécifiques, l'un dans le plan image, et l'autre dans le plan pupille du télescope.

La coronagraphie stellaire moderne, qui cherche à faire l'imagerie directe de planètes extrasolaires en orbite autour d'une étoile, s'inspire de cette idée en la généralisant. De nombreuses combinaisons ont été proposées, dans les deux plans image et pupille et avec des masques de toutes natures (de phase, d'amplitude, opaque, dégradé, apodisant, asymétrique). Les performances sont désormais excellentes et s'approchent du taux de rejet de

la lumière stellaire que réclame le contraste considérable qui existe entre une planète et son étoile - 10^{10} , par exemple, pour la Terre par rapport au Soleil !

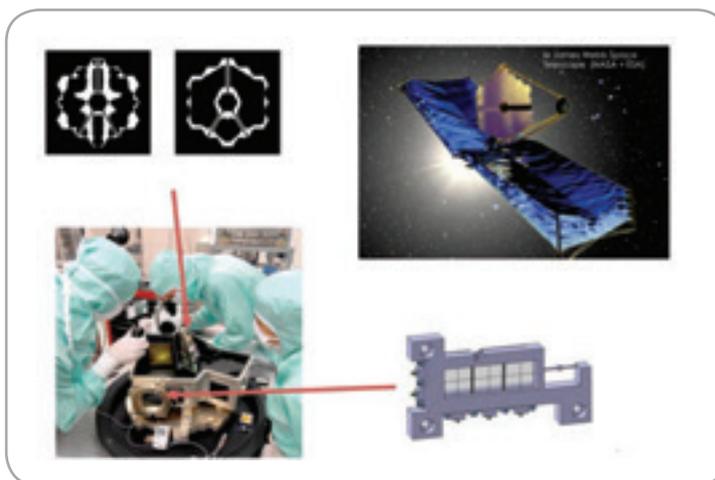
Dans tous les cas, un prérequis est l'obtention d'un degré de cohérence le plus élevé possible de la lumière, car les principes mis en jeu ont finalement tous pour objectif d'obtenir un effet d'interférence destructive sur la lumière provenant de l'étoile, tout l'art résidant, ensuite, dans le système astucieux permettant à la lumière de la planète d'échapper à cet effet. Cette cohérence est obtenue au sol grâce à l'optique adaptative, et dans l'espace grâce à des optiques de grande qualité. Un exemple de dispositif coronagraphique combinant masques en plan image et en plan pupillaire est celui du jeu de coronographes à quatre-quadrants équipant la caméra infrarouge européenne MIRI (*Mid Infrared Instrument*), installée à bord du télescope spatial James Webb, de 6,5 m de diamètre, qui sera lancé en 2018.



© Daniel Rouan

Coronographe à masque de phase quatre-quadrants

Différentes images des plans objet et pupille au long du faisceau sont indiquées. Le masque de phase (au centre) rejette à l'extérieur de la pupille géométrique la lumière de l'étoile (en haut à droite), qui est alors bloquée par un diaphragme (grande flèche incurvée). L'image d'un objet proche de l'étoile peut alors être révélée (en bas à droite : cercle orange).

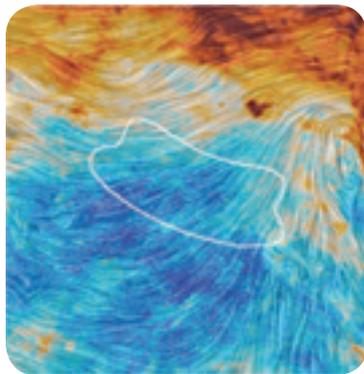
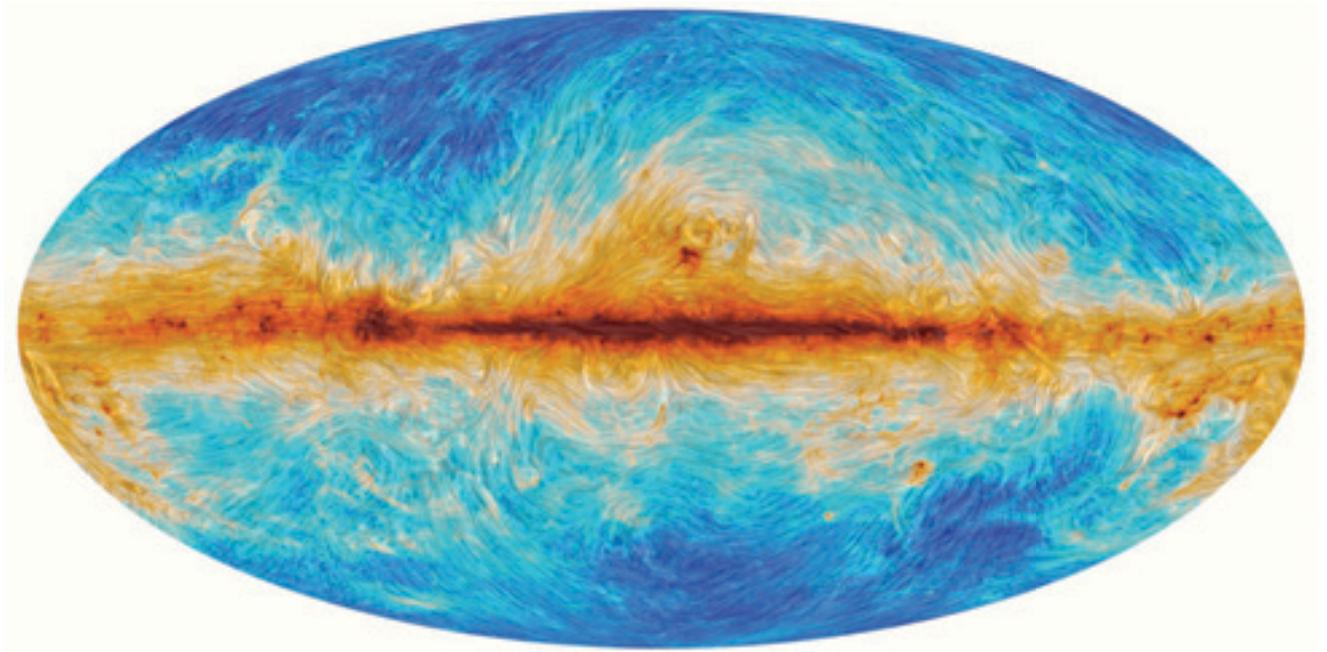


© Daniel Rouan

La caméra infrarouge MIRI sur le télescope spatial James Webb

La caméra, qui sera installée au foyer du télescope, est équipée de 3 masques coronagraphiques quatre-quadrants (en bas à droite) et de diaphragmes pupillaires dentelés (en haut à gauche). Le masque en plan image est parfaitement transparent et a la structure illustrée dans le schéma supérieur, où deux des quadrants introduisent un déphasage de π de l'onde. Quand l'étoile est exactement au centre, l'amplitude complexe s'annule, ce qui se traduit par une expulsion de toute la lumière stellaire à l'extérieur de l'image de la pupille. Un masque pupillaire opaque, très dentelé dans le cas du coronographe de MIRI, bloque alors cette lumière.

Fond cosmologique et données de Planck



© Marc-Antoine Miville-Deschenes,
ESA and the Planck Collaboration

Champ magnétique galactique

Image du ciel montrant l'intensité de l'émission des poussières interstellaires et leur polarisation, qui trace le champ magnétique de notre Galaxie (avec la voie lactée dans le plan médian).

Ci-contre, un agrandissement du champ dans lequel des équipes observant depuis le pôle Sud avait cru détecter les ondes gravitationnelles primordiales (limite du champ en blanc). On y voit la trace du champ magnétique galactique tracé par les données de Planck venant de notre Galaxie, qui domine l'émission observée.

Le fond cosmologique dans le domaine des microondes domine largement la radiation que les astronomes reçoivent de l'extérieur de notre

Galaxie. En effet, la lumière émise par l'ensemble des étoiles et des galaxies depuis leur origine ne représente que 5 % du total de cette radiation. Ce rayonnement électromagnétique microonde a été prédit pour expliquer l'abondance constante d'hélium dans les étoiles, le supposant formé par fusion thermonucléaire de l'hydrogène dans l'Univers vieux de quelques minutes seulement. Il s'agit d'un rayonnement très particulier, puisque c'est une fonction de Planck quasi parfaite à une température de 2,725 K, les écarts à cette fonction étant inférieurs à 10^{-4} .

Une propriété remarquable de ces fréquences microondes est qu'elles sont très peu absorbées dans l'Univers. Elle permettent ainsi d'apporter des informations précises sur la façon dont l'Univers primordial a été structuré par des fluctuations quantiques, qui ont engendré les anisotropies de température - de l'ordre de $1/100\,000^e$ - de ce fond cosmologique. La lumière a ainsi mémorisé une image de l'Univers en se propageant quasi librement pendant 13,8 milliards d'années. Les mesures extrêmement précises de ces anisotropies sont devenues l'un des principaux outils de la cosmologie pour mesurer les paramètres

décrivant l'Univers avec une précision de l'ordre du pourcent.

Le résultat le plus spectaculaire de la mission Planck est la vérification de trois des quatre prédictions de l'existence d'une phase d'inflation. Cette phase est celle de l'accélération initiale de l'expansion de l'Univers, et qui conforte l'hypothèse de l'origine quantique de toutes ses structures.

Cinquante ans après la découverte du fond cosmologique, la collaboration Planck a rendu publics en 2015 les résultats concernant la polarisation de ce rayonnement. Les données polarisées permettent aussi de rechercher l'existence d'un fond cosmologique d'ondes gravitationnelles. Les années 2014 et 2015 ont vu le premier épisode de cette recherche qui mobilise de nombreuses équipes dans le monde. En mars 2014, une découverte de ces ondes a été annoncée prématurément par une équipe américaine, en observation depuis le pôle Sud. Les données de Planck ont montré qu'il s'agissait « seulement » de l'émission polarisée des poussières interstellaires de la voie lactée, jamais encore observée dans un milieu aussi diffus !

Les galaxies en fonction de l'âge de l'Univers

La course vers les galaxies lointaines continue. La vitesse de la lumière étant finie, il est possible de remonter le temps : les photons émis par les galaxies lointaines mettent des milliards d'années à nous parvenir, et nous voyons les galaxies plus jeunes qu'elles ne le sont aujourd'hui, parfois telles qu'elles étaient moins d'un milliard d'années après le Big-Bang, quand l'Univers avait moins de 5 % de son âge. On s'attendrait à voir des galaxies très petites, peu évoluées, qui vont croître en masse en fusionnant avec leurs voisines. Pourtant, l'Univers jeune est riche en galaxies brillantes, des flambées de formation d'étoiles ! Il faut dire que leur disque juste formé est très riche en gaz - il y a même plus de gaz que d'étoiles - et que le gaz, parce qu'il est instable, s'effondre pour former une multitude d'étoiles, comme un feu d'artifice.

submillimétrique géant ALMA, dans le désert d'Atacama au

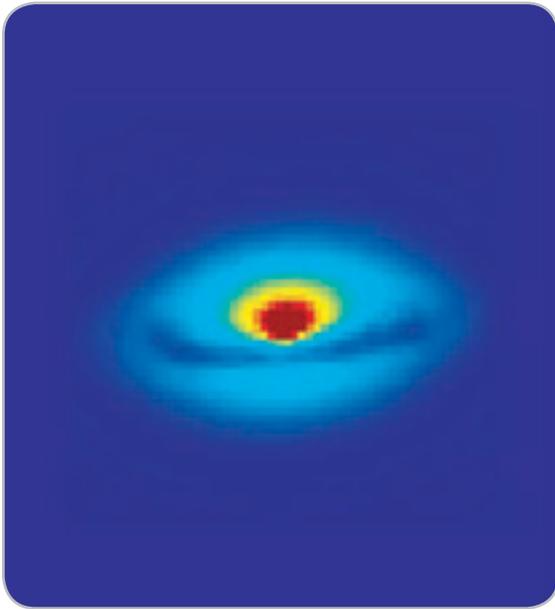


Champ profond de Hubble montrant des galaxies lointaines

© NASA/ESA

Chili, a commencé ses observations aux confins de l'Univers, et a découvert avec surprise des galaxies massives, possédant en leur centre des trous noirs d'un milliard de soleils, au moins 10 fois plus massifs qu'attendus.

S'il existe, dans notre univers local, un rapport bien établi entre la masse du trou noir dans le centre d'une galaxie et celle de son bulbe, les trous noirs du début de l'Univers semblent croître beaucoup plus vite que leur bulbe d'étoiles. Sans doute ont-ils dû prendre de l'avance et se former à partir de l'effondrement d'une superétoile de 10 000 soleils, puis avaler sans répit tout le gaz et les étoiles du voisinage. Au cours du temps, les étoiles se forment plus vite, rattrapent leur retard, et on retombe sur le rapport bien connu, masse du trou noir égale à 0,5 % de la masse du bulbe, sauf peut-être dans des cas, très rares, où les galaxies entrent dans un amas.



Noyau de la galaxie de Persée possédant un trou noir obèse (image prise par la NASA)

Les amas de galaxies se forment à peu près à la moitié de l'âge de l'Univers, par interaction et fusion entre des milliers de galaxies. Ils sont remplis de gaz très chaud - plusieurs millions de degrés -, et les galaxies tombant dans l'amas à grande vitesse sont balayées par le vent, perdent leur gaz et ne peuvent plus former d'étoiles. La masse du trou noir reste alors très grande devant la très petite masse du bulbe. C'est ainsi que des trous noirs véritablement obèses, de masse 100 fois plus grande qu'attendue, ont pu être pesés dans l'amas de Persée !

Dans un avenir proche, ALMA et le télescope spatial James Webb vont pouvoir explorer les premières

galaxies du début de l'Univers, et permettre de comprendre comment se sont formées toutes les étoiles qui nous entourent. Par ailleurs, les interféromètres à très longue base, entre les divers radiotélescopes millimétriques à travers le monde, vont constituer ce que l'on appelle l'*Event Horizon Telescope*, qui pourra résoudre des tailles minuscules autour des trous noirs supermassifs des noyaux de galaxies : il sera alors possible, enfin, de cartographier ce qui se passe autour de l'horizon de ces trous noirs, et atteindre leur ombre, là où les rayons lumineux sont définitivement avalés. Non seulement ces observations apporteront des informations sur la rotation des trous noirs, mais aussi sur les effets de gravité en champ fort.

**Affiliation des auteurs*

Françoise Combes, LERMA, Observatoire de Paris, et Collège de France ; Pierre Encrenaz, LERMA, Observatoire de Paris ; Anne-Marie Lagrange, Institut de planétologie et d'astrophysique de Grenoble ; Pierre Léna, LESIA, Observatoire de Paris ; Jean-Loup Puget, Institut d'astrophysique spatiale, université Paris-Sud, Orsay ; Daniel Rouan, LESIA, Observatoire de Paris

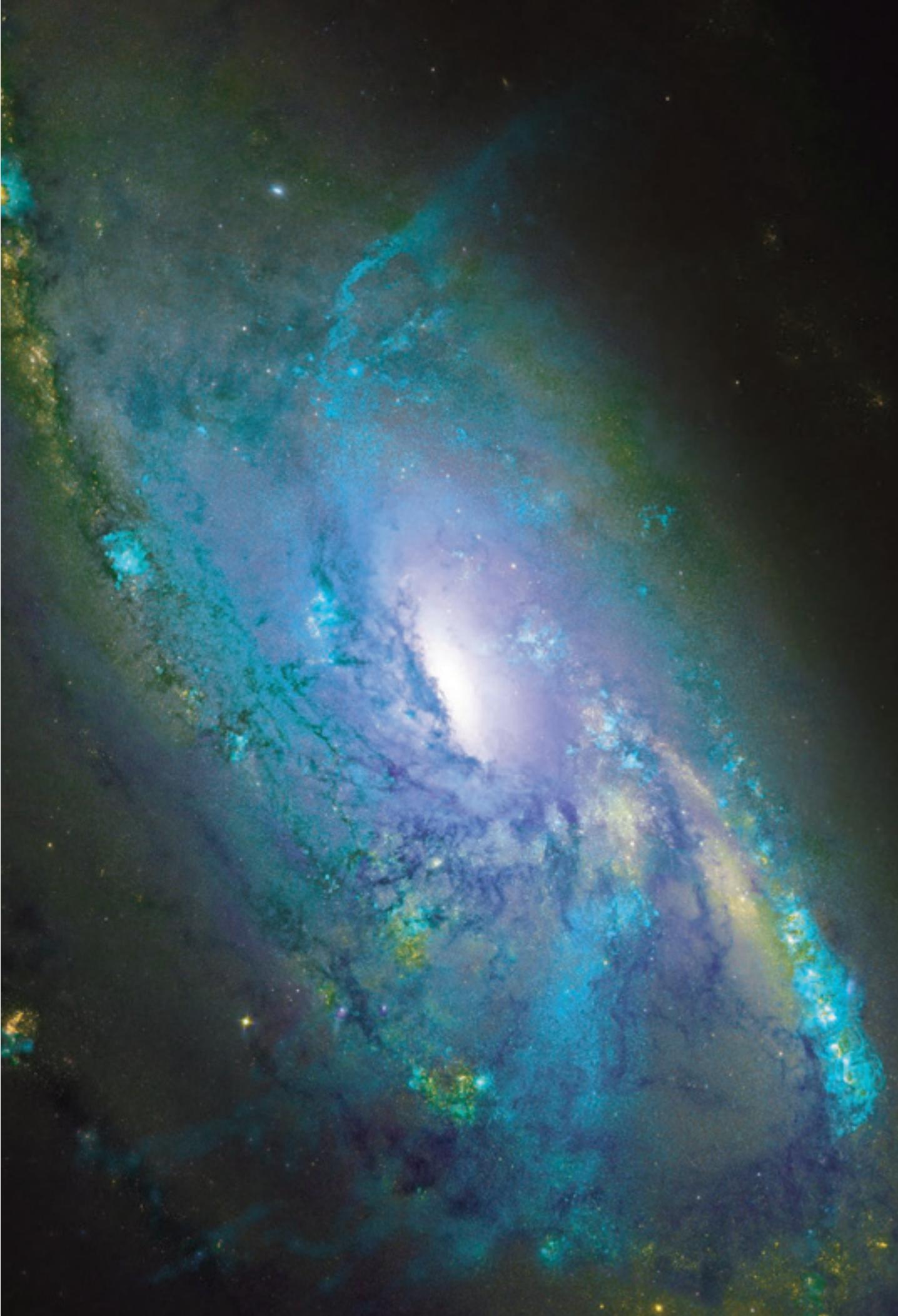


Image dans le visible de la galaxie NGC 4258 réalisée avec le télescope spatial Hubble
Le noyau de cette galaxie éjecte de la matière ionisée, qui forme deux bras anormaux bleus (en haut et en bas) dont l'émission en rayons X détectée par le satellite Chandra (NASA) est superposée à l'image visible.

Lasers femtosecondes



© B.Eymann - Académie des sciences

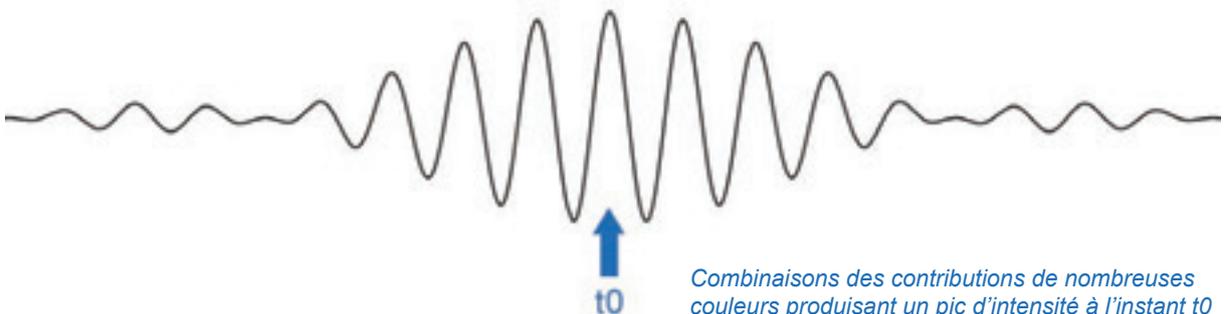
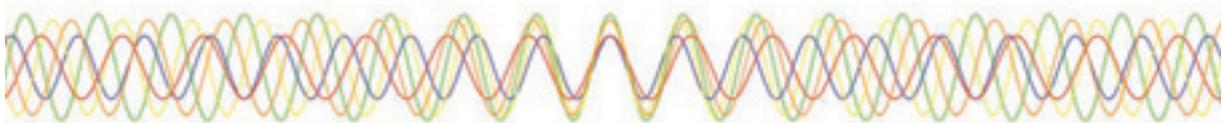
Daniel Kaplan

Membre de l'Académie des sciences, directeur de la société *Fastlite*, Valbonne

Dans l'imaginaire populaire, nourri par *Star Wars* et les lumières des discothèques, le laser produit un rayon de couleur pure se propageant en ligne droite. Si cette dernière propriété, liée à la cohérence spatiale de la lumière émise, est effectivement une caractéristique essentielle du laser, la première ne l'est absolument pas : à la différence des lasers monochromes « classiques », c'est grâce à la large palette de couleurs qu'ils émettent - leur spectre - que les lasers à impulsions courtes sont rendus possibles.

Un principe

À chaque composante colorée de la lumière du laser ultracourt correspond une onde électromagnétique. Si à un instant t_0 , toutes les composantes sont à la même phase de leur oscillation, elles s'ajoutent et produisent une lumière de forte intensité. Mais très peu de temps avant et après, ces composantes de fréquences différentes ne sont plus synchrones, et leurs combinaisons positives et négatives se s'additionnent plus. On a donc un pic d'intensité très court à l'instant t_0 .



Combinaisons des contributions de nombreuses couleurs produisant un pic d'intensité à l'instant t_0

Le procédé pour produire cet instant magique t_0 a été démontré en 1963, quelques années seulement après la réalisation du premier laser (1960). Pour produire un large spectre de couleurs, on a d'abord utilisé comme milieu laser des solutions contenant une gamme de colorants liquides, qui ont été progressivement remplacés par des matériaux solides, tels que les cristaux de saphir dopés au titane.

Des applications spectaculaires

Les lasers ultracourts sont principalement utilisés :

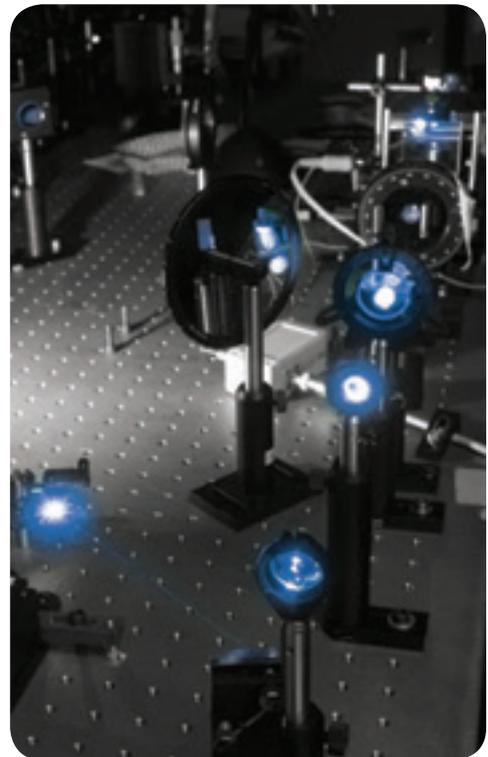
- comme « flash », afin de réaliser des instantanés (image ou phénomène physique) à l'échelle des mouvements atomiques (vibrations des atomes) ;
- comme source de puissance instantanée exceptionnelle : on peut ainsi monter sur un banc de laboratoire un laser délivrant une puissance électrique instantanée équivalant à l'ensemble de la puissance électrique produite dans le monde !

Ils ont différentes applications, pour certaines très spectaculaires :

- accélération de particules par des champs intenses photogénérés, comme par exemple la production de protons pour la radiothérapie ;
- optimisation de la fusion inertielle par laser : un laser secondaire femtoseconde aide le laser principal nanoseconde à initier la réaction, comme une allumette ;
- métrologie des fréquences optiques utilisant des trains d'impulsions de durées ultracourtes (voir p 38) ;
- usinage et chirurgie par laser : la matière est éjectée instantanément sans effet thermique. Le laser femtoseconde est ainsi une alternative au scalpel pour les opérations de la myopie.



© Oleksiy Mark - Fotolia



© ARTo - Fotolia



© Filip Falta - Fotolia

Des progrès permanents

La faible durée et la forte puissance des lasers constituent à la fois une bénédiction et un cauchemar. De fait, la traversée de tout matériau, même sous certaines conditions d'air ambiant, a pour effet de changer la phase relative des diverses couleurs (phase spectrale) et de détruire ainsi leur cohérence. Une des clés de l'émission d'impulsions courtes est donc de parvenir à un contrôle stable et précis de la phase spectrale. Par ailleurs, le comportement optique des matériaux à ces niveaux de puissance est fortement non linéaire, produisant des effets tels que la production de nouvelles fréquences, le rouge produisant ainsi du bleu.

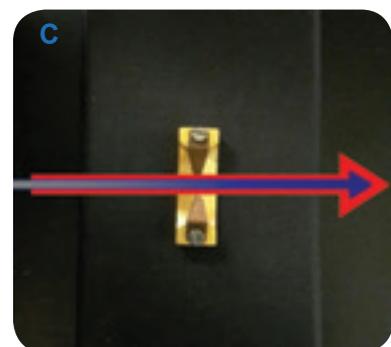
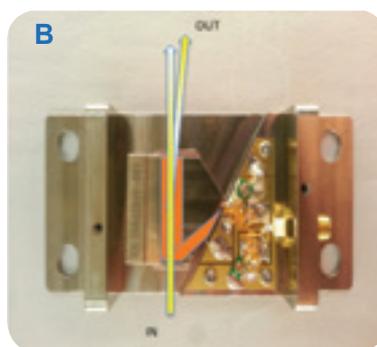
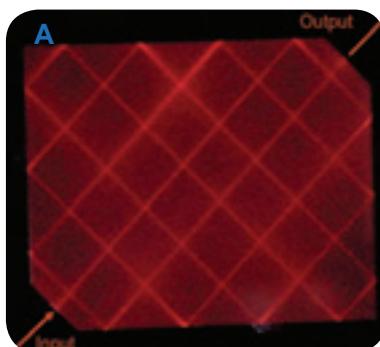


© yang yu - Fotolia

Scientifiques et industriels ont appris à gérer ces défauts : par exemple, on sait qu'il faut étaler la durée des impulsions avant amplification, puis les comprimer avec une précision extrême pour produire des impulsions de forte puissance par amplification. Malgré tout, si les lasers de durée de quelques centaines de femtosecondes sont aujourd'hui des objets simples et robustes, ils restent, pour des durées inférieures, des « bêtes » de laboratoire.

Cette situation commence à trouver son issue grâce à la combinaison d'innovations permettant notamment de réaliser les opérations de production et d'amplification dans des milieux solides, puis de transférer l'énergie des lasers robustes aux impulsions très courtes par amplification paramétrique : c'est ainsi que plutôt que de combattre la non-linéarité, on l'utilise.

Pour tous ces développements, des programmes européens tels qu'ELI (*Extreme Light Infrastructure*), qui visent l'obtention de puissances extrêmes (de l'ordre de l'exawatt, soit 10^{18} watts) aux durées femtosecondes, jouent actuellement le rôle que la Formule 1, en son temps, a joué pour le développement, en général, de l'automobile...



Exemples de manipulations de la lumière utilisées dans des lasers récents

A. Un long trajet dans un morceau de verre - obtenu ici par de multiples réflexions, comme dans un billard - permet de modifier la phase spectrale, par exemple pour allonger la durée de l'impulsion laser.

B. Une impulsion laser (IN) interagit dans un cristal de paratellurite (TeO_2) avec une impulsion acoustique (recouvrant le rayon laser jaune), produisant en sortie (OUT) une impulsion diffractée sur laquelle la phase de l'onde acoustique est « imprimée ». On peut ainsi programmer la phase spectrale des impulsions ultracourtes.

C. L'interaction, dans un petit cristal de niobate de lithium, d'une impulsion laser à très forte énergie (flèche rouge), mais à bande spectrale étroite, avec une impulsion laser plus faible (flèche bleue avec un dégradé), mais à bande spectrale très large, produit par effet non linéaire une impulsion à la fois de très forte énergie et de bande très large, qui peut alors produire une impulsion ultracourte de très forte intensité.



Impulsions de lumière attosecondes

Anne L'Huillier

Département de physique, université de Lund, Suède

Atto provient du danois *atten*, qui signifie dix-huit. Une attoseconde (as) est 10^{-18} s, soit 0,000 000 000 000 000 001 s. L'intervalle de temps le plus court produit et contrôlé par l'homme depuis le début du siècle correspond à la durée d'une impulsion de lumière de l'ordre de 100 as : c'est l'impulsion attoseconde. Cette impulsion de lumière n'est pas visible, mais se trouve dans le domaine de rayonnement ultraviolet extrême couvrant une gamme de longueur d'onde allant de quelques nanomètres à une centaine de nanomètres, ce qui équivaut à une énergie de photon comprise entre 10 et 200 eV.



© Magnus Bergström

Retour en arrière...

L'histoire commence à la fin des années 80, quand des chercheurs américains et français - du CEA - étudient le comportement d'atomes mis en présence d'un champ laser intense. En regardant la lumière

émise par ces atomes, ils ont la surprise d'observer un rayonnement constitué d'harmoniques, dont la fréquence est égale à un multiple de la fréquence du laser d'excitation, impair et d'ordre très élevé. Non seulement l'intensité de ces harmoniques ne décroît pas avec leur ordre, ce qui forme un « plateau », mais leur nombre est impressionnant, de l'ordre 3 à 33 dans les premières expériences, atteignant maintenant plusieurs centaines.

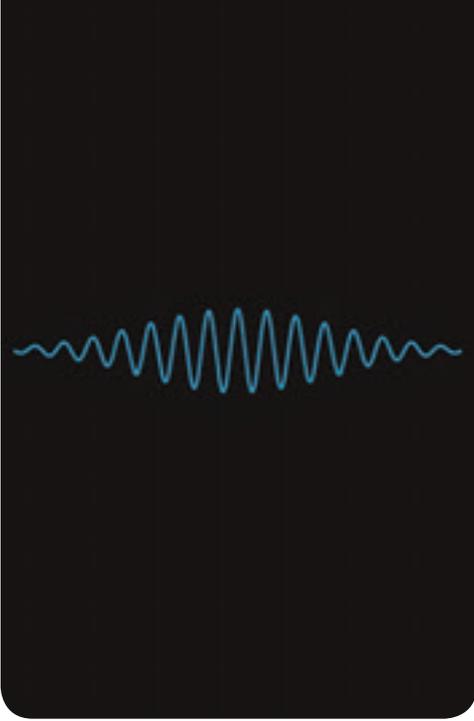
Rapidement, l'idée suivante est avancée : si les harmoniques sont émises « en phase », c'est-à-dire si toutes les ondes sont maximales simultanément,



© Éric Ramahattra

Intérieur d'une chambre à vide où sont produites les impulsions attosecondes

Impulsion attoseconde © Anne L'Huillier



Éléments optiques d'un interféromètre attoseconde © Anne L'Huillier

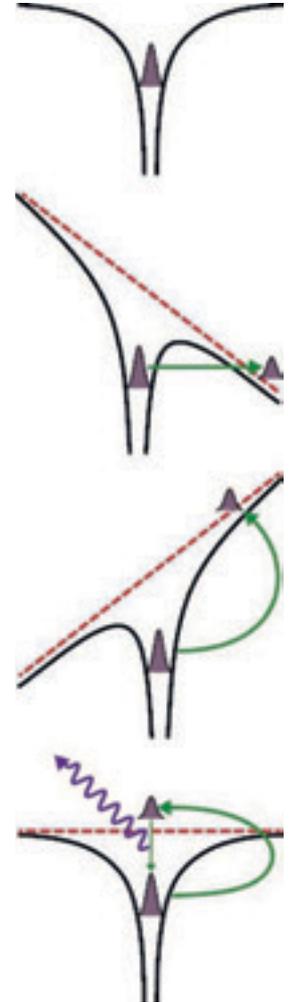


Éléments optiques d'un interféromètre attoseconde © Anne L'Huillier



leur interférence est constructive pendant un court instant, et destructive le reste du temps. Comme le nombre de ces harmoniques est élevé, et donc que la bande spectrale qu'ils sous-tendent est grande, les impulsions lumineuses formées sont de courte durée, de l'ordre de quelques dizaines ou centaines d'attosecondes. Peu de temps après, cette hypothèse est appuyée grâce à une meilleure compréhension de la physique de l'atome dans ces conditions extrêmes.

Il faudra pourtant attendre 15 ans pour démontrer expérimentalement, à l'aide d'une technique d'interférométrie, l'existence de ces impulsions ultracourtes. De nouveau une histoire française, puisque le premier train d'impulsions attosecondes est mis en évidence au *Laboratoire d'optique appliquée*, à Palaiseau. Quelques mois après, des chercheurs viennois montrent qu'il est possible de produire une impulsion attoseconde unique. Depuis, le domaine est en pleine expansion et les sources attosecondes se multiplient, en nombre comme en diversité.

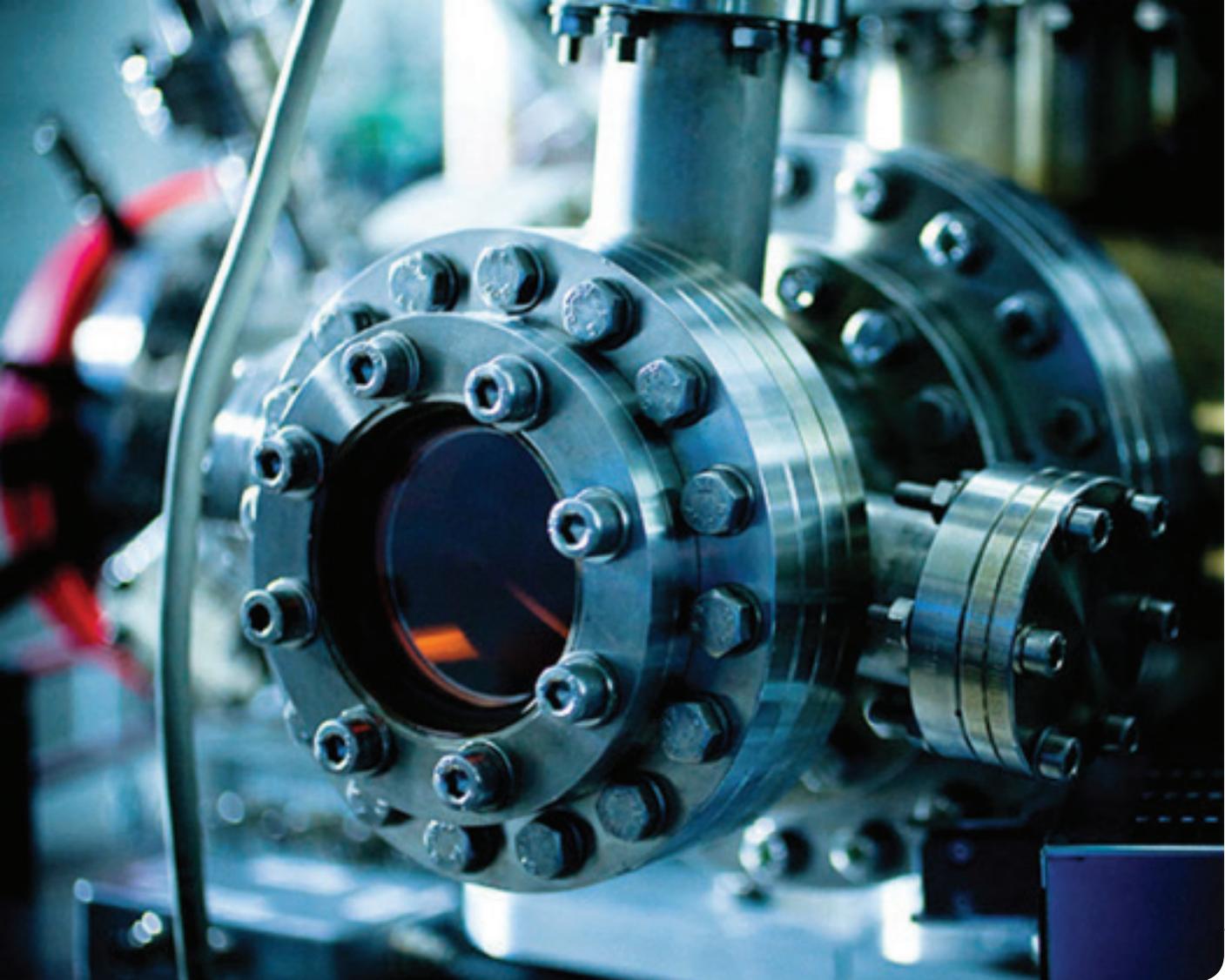


Fabriquer une impulsion attoseconde

Le champ laser (rouge) utilisé pour la production d'harmoniques induit une distorsion du potentiel atomique (noir) telle qu'un électron (violet) peut être ionisé (éjecté) par effet tunnel. Le parcours de l'électron est indiqué en vert. Libéré de l'atome mais toujours soumis au champ laser, l'électron peut revenir vers l'ion avec une énergie cinétique importante et être capturé par ce dernier. L'atome retombe alors dans son état fondamental en émettant un photon ultraviolet extrême (bleu). Tout se passe à l'intérieur d'un cycle optique du laser, c'est-à-dire une ou deux femtosecondes (10^{-15} s), et l'impulsion émise est de durée attoseconde. Ce phénomène suit les oscillations du champ laser et est répété à chaque demi-cycle optique.

Voir les électrons bouger !

Une nouvelle physique s'ouvre alors aux chercheurs, celle de la dynamique « ultrarapide » des électrons dans la matière, qui pourra permettre de mieux appréhender certains phénomènes physiques et chimiques. Le domaine spectral des impulsions attosecondes correspond à l'énergie d'excitation des électrons des couches atomiques



© Eric Ramahatra

Extérieur d'une chambre à vide où sont détectés les électrons

49

externes (les plus éloignées du noyau). Leur durée est comparable au temps caractéristique de l'effet photoélectrique - émission d'électrons par un matériau soumis à un rayonnement lumineux - ou du réarrangement du nuage électronique d'un atome ou d'une molécule après excitation. Les impulsions attosecondes jouent le rôle de flashes d'une caméra ultrarapide qui filme le mouvement des électrons dans la matière. L'absorption d'une impulsion démarre un processus (une ionisation ou une réaction chimique, par exemple), et l'absorption d'une seconde impulsion, retardée par rapport à la première, le stoppe. Les caractéristiques des particules émises varient avec le retard entre les deux impulsions et nous renseignent sur la dynamique temporelle du processus étudié.

Néanmoins, il faut se rappeler que nous sommes dans le domaine de la mécanique quantique. Les électrons en mouvement sont aussi des ondes, ou plus exactement des paquets d'onde (dualité onde-corpuscule). Les caractériser implique la mesure de leur amplitude et de leur phase. Cette dernière est rendue accessible par des techniques interférométriques utilisant des impulsions attosecondes. On se rapproche doucement d'un de nos rêves de physicien : suivre en temps réel l'évolution du nuage électronique mis en mouvement par une perturbation. Que va-t-on voir ?



Lasers ultrastables et horloges optiques



Sébastien Bize

Directeur du LNE-SYRTE, SYRTE (Systèmes de référence temps-espace), Observatoire de Paris, *PSL Research University*, CNRS, Sorbonne Universités, UPMC Univ. Paris 6, LNE

La lumière est une oscillation dans le temps et dans l'espace du champ électromagnétique. Si cette oscillation est très régulière, comme dans le cas de la lumière laser monochromatique, elle peut, comme tout phénomène physique périodique, servir à repérer une suite régulière d'événements qui réalise une échelle de temps. Les événements servant de repères sont, par exemple, les passages à la valeur zéro du champ électrique. La stabilité de la fréquence de l'oscillation de référence

détermine la performance de l'échelle de temps. Pour la lumière, la mise en pratique et l'intérêt de cette idée reposent sur la possibilité de réaliser des sources lasers dont la fréquence est extrêmement bien contrôlée et sur la capacité d'accéder de manière concrète à la phase de l'oscillation de telles sources. Au cours de la dernière décennie, ces concepts ont non seulement été démontrés, mais ils ont conduit au développement d'une nouvelle génération d'étalons de fréquence et de méthodes de comparaisons surpassant de plusieurs ordres de grandeur la génération précédente.

Obtenir une fréquence laser ultrastable

Le premier ingrédient d'un étalon de fréquence optique de performance extrême est un laser ultrastable. La méthode classique pour obtenir un tel laser consiste à stabiliser sa fréquence sur la résonance d'une cavité Fabry-Pérot, elle-même conçue pour avoir une très haute stabilité dimensionnelle. La compréhension des phénomènes physiques qui influencent cette dernière a beaucoup progressé ces dix dernières années : des géométries de cavité astucieusement optimisées permettent désormais de s'affranchir des perturbations environnementales telles que les variations de température et les vibrations.

Cela étant, les lasers ultrastables les plus performants restent limités par les fluctuations thermiques des dimensions de la cavité, un phénomène fondamental qui peut aussi être décrit comme le mouvement brownien des éléments constituant la cavité. L'amplitude de ces fluctuations dépend de la température et des propriétés de dissipation mécanique des matériaux utilisés pour les traitements diélectriques,

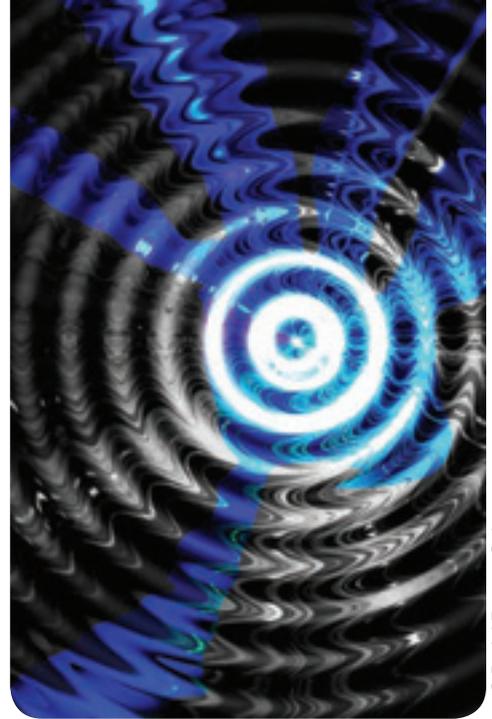
ainsi que pour les substrats des miroirs et autres pièces définissant la longueur de la cavité. Par le choix de matériaux plus favorables ou en faisant fonctionner la cavité à des températures cryogéniques, des lasers dont la stabilité relative de fréquence est inférieure à 10^{-16} à une seconde sont désormais réalisables. Pour la longueur moyenne de la cavité, cela équivaut à une stabilité dimensionnelle de l'ordre du femtomètre, soit la taille d'un proton.

Sonder une transition atomique en contrôlant les perturbations

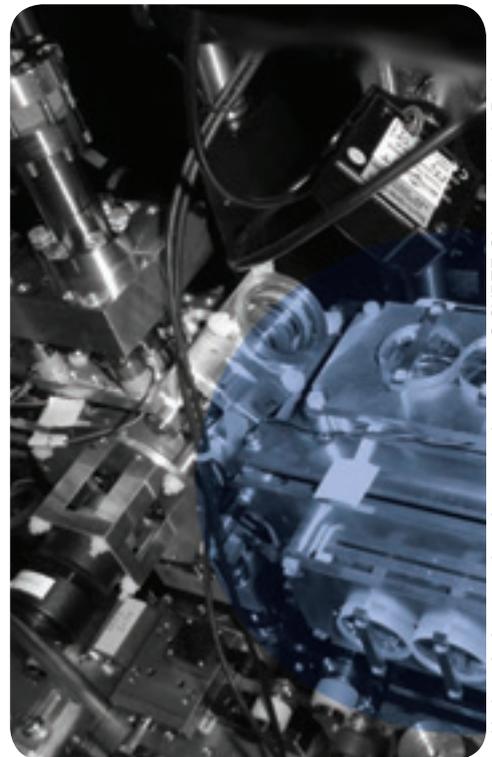
Le second ingrédient d'un étalon de fréquence optique ultraperformant est une transition atomique aux propriétés favorables et une méthode adéquate pour sonder cette transition avec le laser ultrastable.

La transition doit être intrinsèquement très étroite, presque interdite, pour permettre une spectroscopie avec des largeurs de raies de quelques Hertz seulement, voire moins, ce que permettent les meilleurs lasers ultrastables. Ramené à la fréquence optique, cela correspond à des largeurs relatives de l'ordre de 10^{-15} . La transition doit être aussi insensible que possible aux perturbations par des champs externes, tels que les champs magnétiques ou électriques statiques, le rayonnement électromagnétique thermique, également appelé rayonnement du corps noir, et, le cas échéant, tout autre champ électromagnétique (laser, radiofréquence, etc.) utilisé pour manipuler les atomes ou pouvant, pour quelque raison, interagir avec les atomes.

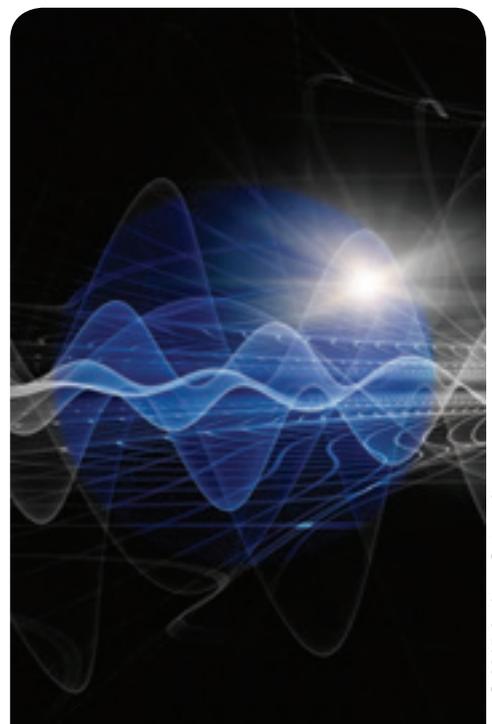
Il est souvent favorable, par ailleurs, d'interroger simultanément non pas un atome unique, mais un ensemble d'atomes. Dans ce cas, les interactions entre atomes sont une source supplémentaire de perturbation qu'il faut combattre. De même, il convient de minimiser les effets du mouvement des atomes, ceux-ci pouvant être considérables - de l'ordre de 10^{-6} en valeur relative - pour des atomes libres à température ambiante. Dans un étalon de fréquence optique ultraperformant, on utilise des atomes refroidis par laser à des températures de l'ordre du microkelvin, voire



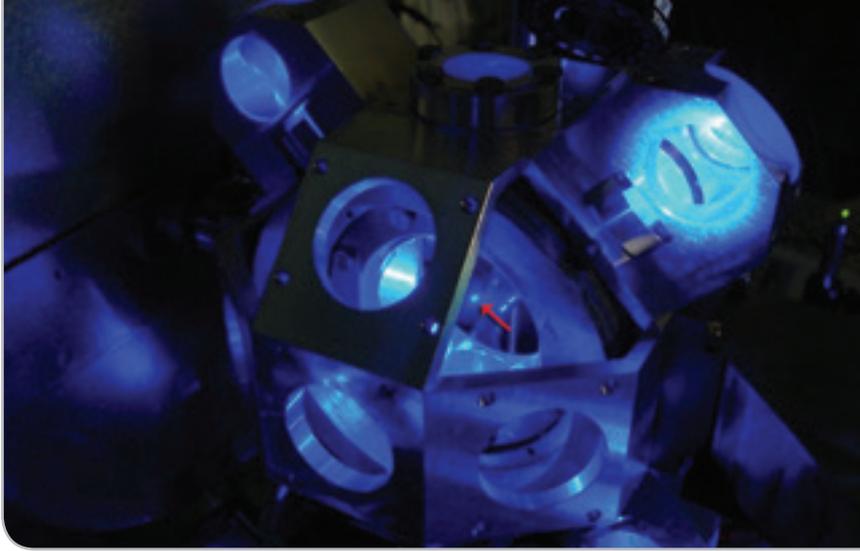
© Budai Romeo Gabor



Horloge à réseau optique à atomes de mercure © SYRTE-Observatoire de Paris



© 2015 Andrew Oistrovsky



Horloge à réseau optique à atomes de strontium (SYRTE-Observatoire de Paris)

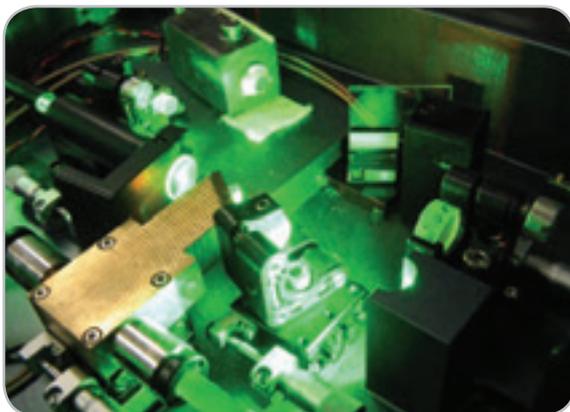
La lumière laser bleue a une longueur d'onde de 461 nm ; elle permet de capturer, refroidir et détecter un échantillon d'atomes de strontium. Le nuage d'atomes froids - d'une taille de l'ordre du millimètre - est visible sous la forme d'un point bleu légèrement diffus au centre de l'enceinte à vide (flèche rouge). Lors du fonctionnement de l'horloge, les atomes froids sont transférés dans un piège dipolaire formé par une onde laser stationnaire intense à 813 nm qui traverse le nuage verticalement. La lumière bleue est alors éteinte et la transition optique est sondée avec un laser ultrastable à 698 nm superposé au laser du piège dipolaire. La lumière bleue est ensuite rallumée pour la phase de détection. La durée totale d'un cycle d'interrogation est d'environ une seconde. Le cycle est répété de manière à acquérir en permanence l'information sur la différence de fréquence entre la transition atomique de référence et la lumière à 698 nm.

moins ; par ailleurs, les atomes sont fortement confinés à l'aide d'un piège - radiofréquence pour les ions, dipolaire pour les atomes neutres. Dans ce dernier cas, le piège dipolaire est produit par une onde laser intense à une longueur d'onde choisie pour annuler la perturbation supplémentaire qu'un tel piège introduit en général. Quand il est réalisé à l'aide d'une onde stationnaire qui forme un réseau de pièges, on parle d'horloge à réseau optique.

Au cours des dix dernières années, plusieurs transitions atomiques ont permis d'obtenir un niveau de contrôle des perturbations au niveau de quelques 10^{-18} en valeur relative. Une échelle de temps pilotée par un étalon de fréquence à ce niveau ne ferait pas plus d'une seconde d'erreur sur l'âge de l'Univers (14 milliards d'années) !

Comparer les étalons de fréquence optique à distance

L'intérêt d'une référence de fréquence ou de temps ultraperformante est décuplé dès lors que l'on peut réaliser des comparaisons à distance sans dégradation. Au cours de la dernière décennie, la possibilité de transmettre par fibre optique l'onde de fréquence ultrastable produite par les étalons de fréquence optique a été établie. Ces liens optiques fibrés cohérents, où les fluctuations du délai de propagation sont mesurées par interférométrie et compensées activement, permettent des comparaisons à mieux que 10^{-18} sur des distances de propagation par fibre optique de plusieurs milliers de kilomètres.

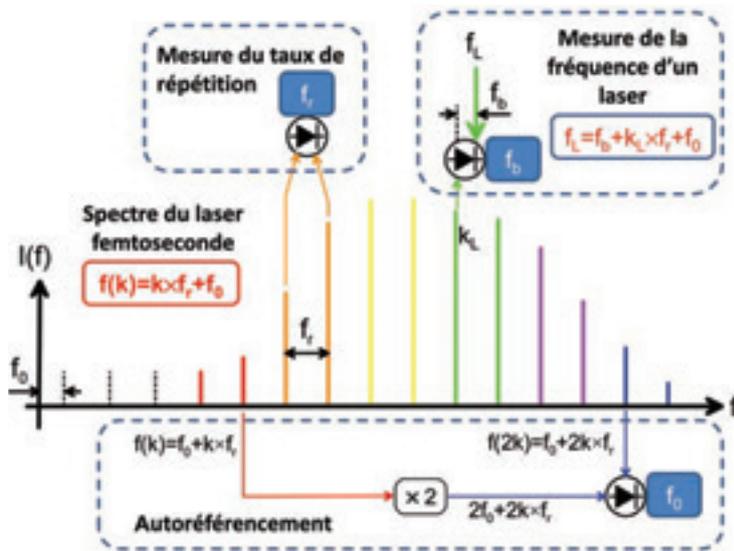


La propagation dans les fibres optiques sur de telles distances impose l'utilisation de la longueur d'onde de 1,5 micromètre. Il faut alors mettre en

Peigne de fréquence optique (SYRTE-Observatoire de Paris)

Dans cette cavité d'un laser titane-saphir femtoseconde utilisé pour la métrologie des fréquences optiques, on distingue 5 des 6 miroirs formant la cavité laser, ainsi qu'une lame de verre biseauté servant à contrôler la dispersion de la cavité. Le cristal de saphir dopé au titane est tenu dans la monture en cuivre en bas à gauche. La lumière verte est la lumière du laser qui pompe le cristal. La longueur d'onde centrale d'émission du laser femtoseconde est d'environ 850 nm. Désormais, pour la métrologie des fréquences optiques, on préfère souvent une autre technologie, nettement plus fiable, qui utilise des composants développés pour les télécommunications par fibre optique. La longueur d'onde centrale d'émission du laser femtoseconde est alors de 1,5 micromètre.

œuvre un peigne de fréquence optique faisant appel à un laser femtoseconde (voir p 32), afin de transférer la stabilité de fréquence entre cette longueur d'onde et la longueur d'onde des transitions utilisées dans les étalons de fréquence.



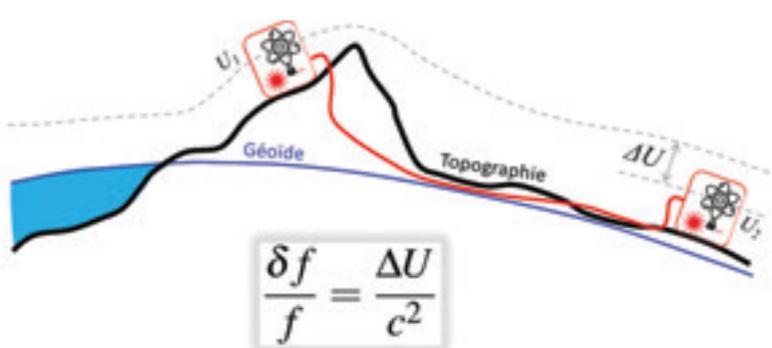
Utilisation du laser femtoseconde en métrologie des fréquences optiques

Un laser femtoseconde délivre un train d'impulsion laser avec un taux de répétition f_r . Le spectre correspondant est un peigne de fréquence espacé de f_r , auquel il faut rajouter un décalage de fréquence global f_0 . L'autoréférencement permet d'accéder à f_0 et le taux de répétition se mesure directement en détectant le train d'impulsion. La fréquence de chaque dent du peigne est alors entièrement déterminée par l'équation très simple $f(k) = k \times f_r + f_0$. Une fois f_0 et f_r connues, le peigne constitue un ensemble de références ultraprécises par rapport auxquelles on peut, en principe, mesurer autant de laser que l'on veut. L'invention et la démonstration de cette méthode sont à l'origine du prix Nobel de physique attribué à T. Hänsch et J. L. Hall en 2005.

Vers une redéfinition de la seconde et de nouvelles applications

Grâce à tous ces développements, une métrologie du temps et de la fréquence entièrement située dans le domaine optique a émergé, surpassant de plusieurs ordres de grandeurs les approches fondées sur les fréquences microondes. Cela dessine la perspective d'une redéfinition de la seconde du système international d'unité à partir de transitions optiques et de progrès importants de toutes les applications des étalons de fréquence ultraperformants.

De plus, l'amélioration considérable de la performance peut être directement à l'origine de nouvelles applications. Ainsi, une comparaison à distance d'étalons de fréquence optique à 10^{-18} permet de mesurer la différence de potentiel gravitationnel à un niveau équivalent à 1 centimètre, ce qui laisse envisager de manière concrète la géodésie chronométrique et le développement d'une nouvelle gamme d'applications des étalons de fréquence ultraperformants dans le domaine des sciences de la Terre.



© Sébastien Bize

Principe de la géodésie chronométrique

Un des aspects essentiels de relativité générale d'Einstein est la modification de la structure de l'espace-temps au voisinage des objets massifs. Une des manifestations de cette modification est le déplacement gravitationnel vers le rouge : deux étalons de fréquence identiques situés dans des potentiels de gravitation différents semblent avoir des fréquences différentes lorsqu'ils sont comparés à distance. Le terme de déplacement gravitationnel vers le rouge vient de ce que l'étalon qui se trouve dans un potentiel plus élevé semble avoir une fréquence plus basse, et ce déplacement vers une fréquence plus basse correspond à une couleur plus rouge quand l'on part d'une longueur d'onde optique visible. La différence relative entre les deux fréquences est indépendante de la nature des étalons. Elle est directement liée à la différence de potentiel de gravitation au niveau des deux horloges, comme l'indique l'équation de la figure ci-contre, qui représente deux horloges optiques distantes comparées à l'aide d'un lien optique fibré. On peut ainsi utiliser les comparaisons d'horloges à distance comme un nouvel outil de connaissance du potentiel de gravitation pour la géodésie et les sciences de la Terre. Une comparaison des fréquences avec une incertitude relative de 10^{-18} permet de mesurer directement la différence de potentiel à un niveau équivalent à 1 cm.

Chimie et lumière : une complicité étroite



© B.Eymann - Académie des sciences

Philippe Sautet

Membre de l'Académie des sciences, Laboratoire de Chimie, université de Lyon, CNRS, École normale supérieure de Lyon

La chimie est la science qui crée et casse les liaisons entre les atomes, formant ainsi des molécules et des solides utiles à l'homme dans le secteur de la santé, de l'énergie et des matériaux. Les assemblages chimiques sont formés de noyaux atomiques, constitués de protons et de neutrons, atomes liés entre eux par les électrons. Quelle relation avec le photon, particule élémentaire de lumière ? L'interaction entre lumière et matière est forte, et même fondamentale pour le principe de la vie, car

elle est à la base de la photosynthèse. Mais cette interaction lumière-matière ouvre également des applications majeures dans le domaine de la santé, notamment en matière de diagnostic, et dans celui de la transformation de l'énergie.

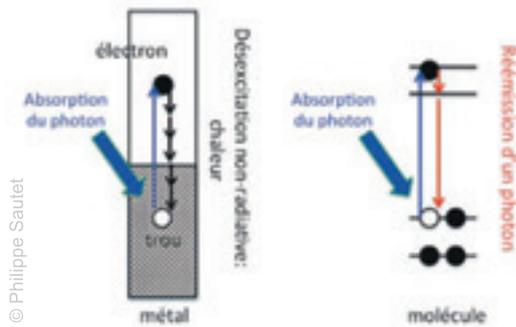
Les molécules et les matériaux absorbent les photons, avec production d'un état excité, appelé exciton. Les niveaux énergétiques des molécules et des solides sont quantifiés. Lors de l'absorption du photon, un électron est promu d'un niveau occupé vers un niveau électronique initialement vacant. L'absorption de la lumière peut être totale, sur toutes ses longueurs d'onde, et le matériau est alors noir. Elle peut être sélective sur certaines longueurs d'onde, et la couleur apparaît à partir des composantes réfléchies de la lumière. La couleur peut être, par exemple, donnée par des molécules pigmentaires, qui absorbent certaines parties du spectre visible de la lumière solaire. Mais que se passe-t-il ensuite ?

Utiliser l'énergie transmise lors de l'interaction lumière-matière

Le photon a installé la molécule ou le matériau dans un état de haute énergie. Le retour à l'état fondamental peut prendre plusieurs chemins. Le plus banal est de dissiper sous forme de chaleur l'énergie acquise par l'absorption du photon : l'énergie électronique est transmise aux modes de vibrations de la molécule ou du matériau. C'est ce qui se passe notamment dans le cas des matériaux métalliques. Une autre possibilité, beaucoup plus intéressante, est la réémission d'un photon, nécessairement d'énergie inférieure et donc



de plus grande longueur d'onde. Ce sont les phénomènes de luminescence, fluorescence et phosphorescence, amplement décrits dans l'article d'Anne-Marie Caminade.



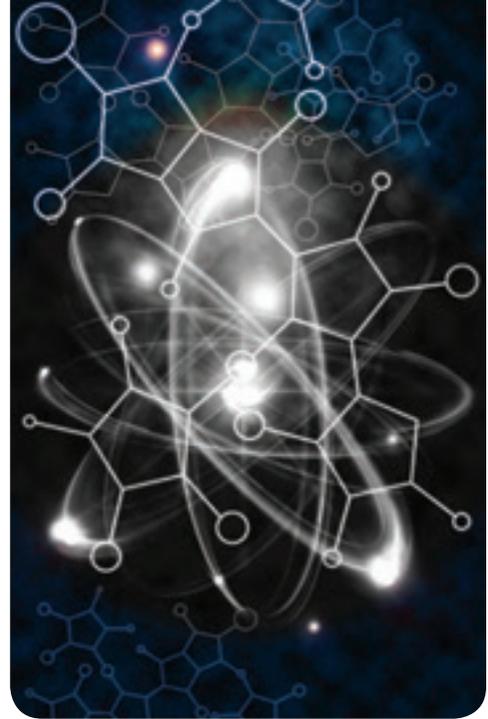
Deux exemples d'interaction lumière-matière

Dans un métal, l'énergie lumineuse absorbée est dissipée sous forme de chaleur, alors que dans une molécule, un photon d'énergie plus basse peut être réémis.

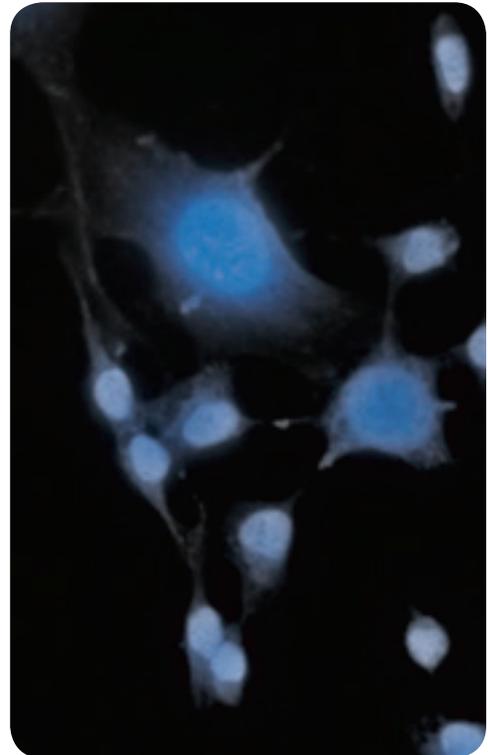
La molécule excitée n'étant généralement pas isolée, elle peut interagir avec des molécules à proximité et leur transférer de l'énergie : c'est la molécule voisine qui passe alors dans l'état excité. Une application majeure de ce phénomène est la thérapie photodynamique du cancer¹. Un photosensibilisateur est tout d'abord excité par un laser à proximité d'un tissu malade. L'énergie est transférée à des molécules d'oxygène voisines, les promouvant ainsi dans l'état excité singulet. L'oxygène singulet est un oxydant puissant, qui détruit les tissus environnants et donc les cellules cancéreuses visées. Ce type d'application de l'interaction lumière-matière en biochimie et en biologie est illustré plus avant dans l'article de Chantal Andraud.

Au lieu de laisser l'exciton se désexciter en chaleur ou être réémis sous forme d'un autre photon, un enjeu majeur est d'utiliser son énergie et de la convertir en énergie électrique ou chimique. L'énergie solaire peut, ainsi, être transformée en énergie utile : c'est le domaine du photovoltaïque et de la photocatalyse.

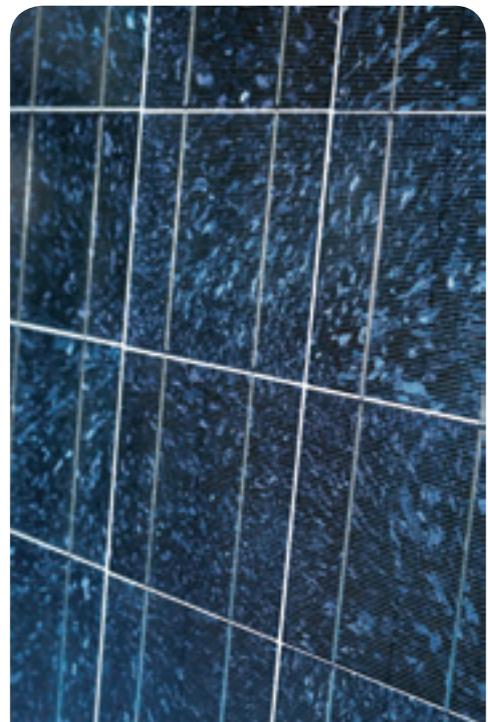
Après absorption du photon, l'électron ajouté dans un niveau électronique initialement vacant et le trou laissé dans le niveau initialement occupé sont proches et en interaction électrostatique. Le système trou positif – électron négatif est similaire à un pseudo-atome d'hydrogène. Afin de pouvoir utiliser les charges dans un circuit électrique ou pour réaliser



© Ezume Images, 2015 - Fotolia



© KaYann - Fotolia



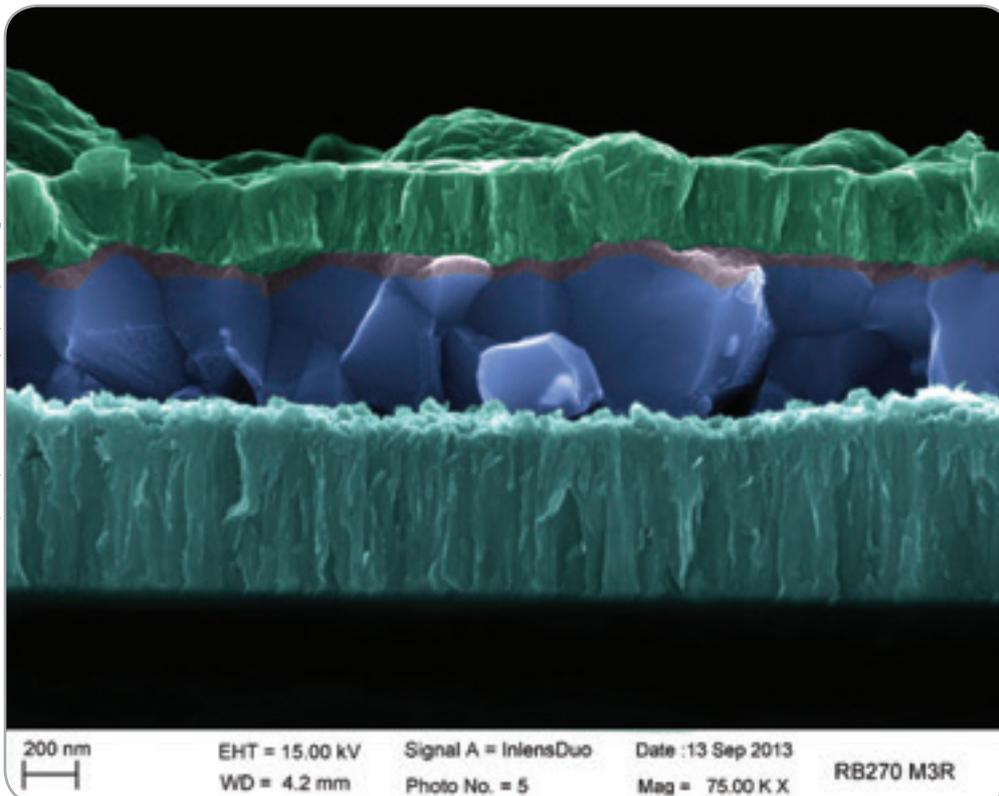
PedroNunes Photography - Fotolia

une réaction d'oxydoréduction, il convient tout d'abord de séparer l'électron et le trou. Pour que cette dissociation soit spontanée à température ambiante, le matériau doit posséder une constante diélectrique haute, permettant d'écranter et de diminuer l'interaction électrostatique entre l'électron et le trou². Cette séparation de l'électron et du trou est difficile dans le cas de certains systèmes moléculaires ou solides, ce qui exclut leur utilisation comme absorbant de la lumière pour des applications en photovoltaïque ou photocatalyse.

La cellule photovoltaïque

Une fois le trou et l'électron séparés, leur différence de potentiel peut directement être utilisée pour produire un courant électrique : on a alors réalisé une cellule photovoltaïque. Ces cellules sont classiquement construites à partir d'un matériau semiconducteur de type silicium. La chimie joue un rôle double dans ce type d'applications.

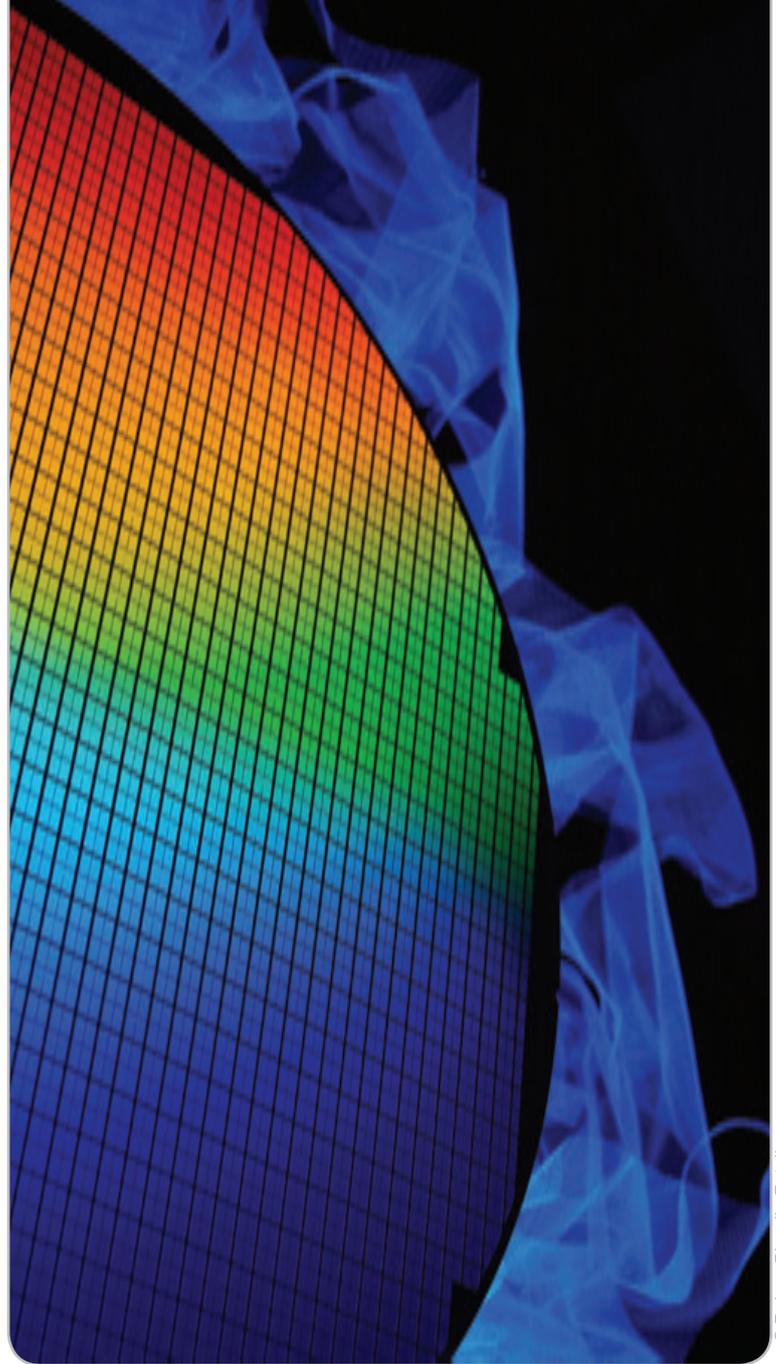
Elle propose des solides absorbant de la lumière alternatifs aux semiconducteurs classiques. Ainsi, les matériaux organiques légers et flexibles ouvrent des applications nouvelles³. Les matériaux inorganiques permettent, quant à eux, de réaliser des dispositifs sous forme de films minces et des préparations plus simples de la cellule par dépôt électrochimique. On peut notamment souligner la famille de matériaux chalcogénures $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$, qui présente un avantage majeur par rapport au silicium⁴. Alors que le silicium doit être très pur, avec très peu de défauts, pour que la cellule photovoltaïque soit efficace, le chalcogénure métallique $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ présente une grande tolérance aux défauts. Il peut donc être produit sous forme de couches minces par des méthodes électrochimiques beaucoup moins complexes que les techniques de préparation du silicium.



Coupe en microscopie électronique d'une cellule CIGS en couches minces

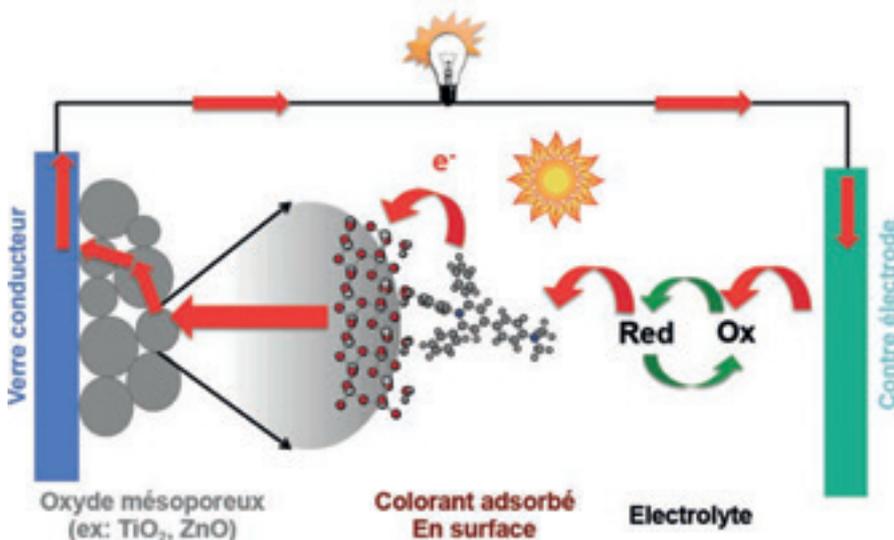
La couche du bas (verte) est en molybdène et la couche centrale (bleue) en $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$. Viennent ensuite une couche interfaciale de CdS puis, au-dessus, une couche de ZnO . La lumière entre dans la couche de ZnO . Ce type de cellule donne actuellement un rendement record de 21,7 % pour cette famille de matériaux, très proche du rendement des cellules au silicium (27 %). CIGS : $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$

La deuxième contribution de la chimie aux dispositifs photovoltaïques est de proposer des dispositifs originaux à base de molécules, et non plus de matériaux solides, pour l'absorption de la lumière. Une molécule de colorant, appelée photosensibilisateur, absorbe le photon lumineux. Cette molécule est déposée en monocouche sur un support oxyde mésoporeux de nanoparticules d'oxyde de titane TiO_2 , lui-même déposé sur une électrode conductrice transparente⁵. L'électron de haute énergie produit par l'absorption du photon, après avoir été séparé du trou, est transféré du colorant vers l'oxyde de titane, puis sur l'électrode conductrice. L'électron, après être passé dans le circuit extérieur, revient sur la contre-électrode conductrice et, par transfert grâce à un électrolyte oxydoréducteur, peut rejoindre la molécule de colorant dans l'état fondamental. Les premiers photosensibilisateurs, des complexes polypyridines de ruthénium, ont permis d'atteindre une efficacité de 10 % dès 1993. Aujourd'hui, une porphyrine de zinc détient le record avec 13 %⁶.



© Rainer Plendl - Fotolia

57



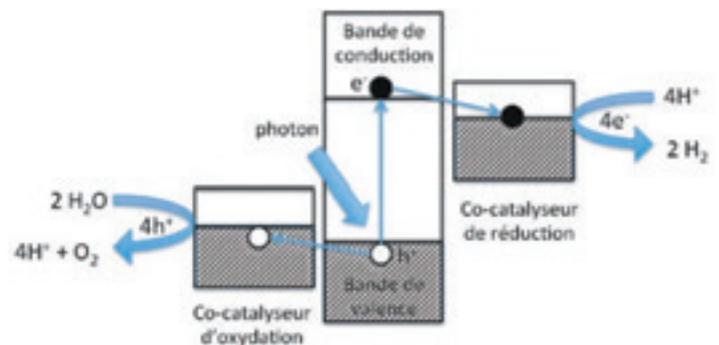
Principe d'une cellule photovoltaïque à colorant

La photocatalyse

Les électrons et les trous produits par absorption du photon peuvent également être utilisés pour réaliser des réactions chimiques d'oxydoréduction, utilisant les électrons comme réducteur et les trous comme oxydants : c'est le domaine de la photocatalyse, qui présente de nombreuses applications, notamment pour la dépollution de l'eau et de l'air ou la transformation directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Concernant la production d'hydrogène à partir de l'eau et de la lumière, par exemple, deux voies sont possibles : la lumière peut être transformée en électricité à partir d'une cellule photovoltaïque, comme cela a été présenté auparavant, puis l'électricité est utilisée pour effectuer l'électrolyse de l'eau en hydrogène et en oxygène. Une autre voie est de casser l'eau directement par photocatalyse⁷.

Dans la photocatalyse, les trous créés par l'absorption de photons sont transférés à un matériau cocatalyseur d'oxydation, par exemple des particules d'oxyde de cobalt, qui peut utiliser ces trous pour oxyder l'eau en oxygène et en protons : quatre trous sont nécessaires pour la transformation de deux molécules d'eau en une molécule d'oxygène et quatre protons. Les protons formés sont ensuite réduits en hydrogène moléculaire, grâce aux électrons de haute énergie créés par l'absorption de la lumière, et transférés sur le cocatalyseur de réduction, des particules de Pt, par exemple.

On le voit, la lumière et la chimie partage donc une complicité très forte. L'absorption de la lumière place les molécules et les solides dans un état excité, et plusieurs processus sont possibles pour le retour à l'état fondamental. La réémission d'un photon et le transfert d'énergie à une molécule voisine ouvrent des applications majeures en sciences de la vie et en santé. La séparation des charges produites permet de récolter l'énergie solaire pour la transformer en énergie électrique ou en énergie chimique. L'exploitation des interactions lumière-chimie jouera donc un rôle majeur pour notre santé et notre énergie.



La réaction photocatalytique de dissociation de l'eau

Pour en savoir plus

1. Frochot C, et al. *L'actualité chimique* 2015 ; **397-398** : 46
2. Le Bahers T, Rérat M, Sautet P. *J Phys Chem* 2014 ; **C 118** : 5997-6008
3. Audebert P, et al. *L'actualité chimique* 2015 ; **397-398** : 56
4. Naghavi N, Joudrier AL, Guillemoles JF. *L'actualité chimique* 2015 ; **397-398** : 51
5. O'Regan B, Grätzel M. *Nature* 1991 ; **353** : 737
6. Mathew S, et al. *Nature Chem* 2014 ; **6** : 242
7. Moriya Y, Takata T, Domen K. *Coord Chem Rev* 2013 ; **257** : 1957-69

L'alliance de la lumière et de la chimie pour la fluorescence en biologie

Anne-Marie Caminade

CNRS, Laboratoire de chimie de coordination (LCC), Toulouse

Des aurores boréales aux lucioles, en passant par des pierres qui brillent dans l'obscurité, les phénomènes de luminescence intriguent et fascinent les hommes depuis toujours. Un type particulier de luminescence, la photoluminescence, concerne les émissions de lumière par fluorescence¹ ou phosphorescence induites par l'action d'un rayonnement lumineux sur certains matériaux. Les phénomènes de fluorescence sont largement utilisés en biologie du fait de la très grande sensibilité de détection qu'ils permettent. Retour en arrière...

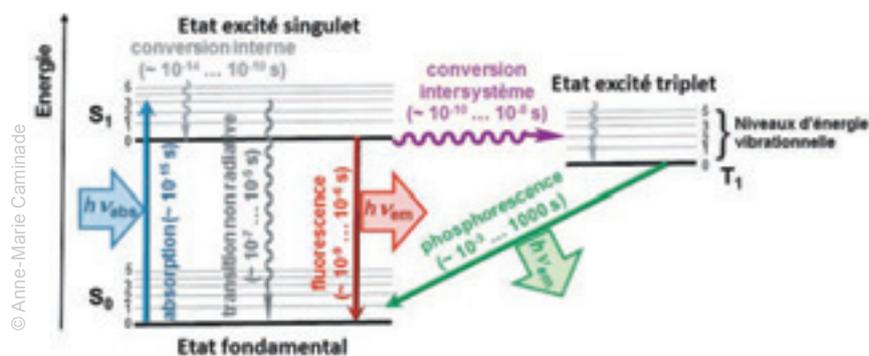


© DR

59

Qu'est-ce que la fluorescence ?

La fluorescence est due à des transitions électroniques : lorsqu'une molécule absorbe de la lumière (un quantum d'énergie, un photon), elle passe de l'état fondamental (S_0) à un état excité (S_1). Selon la nature de la molécule, trois chemins permettent de revenir à l'état fondamental : soit l'énergie absorbée est dissipée de façon non radiative, soit il y a émission de fluorescence à une longueur d'onde plus grande (moins énergétique), soit une conversion intersystème fait passer à l'état électronique triplet (T_1) à partir duquel se fait l'émission de phosphorescence, d'une durée de vie généralement beaucoup plus longue que celle de la fluorescence.



© Anne-Marie Caminade

Diagramme de Jablonski

Le schéma montre les différents états électroniques d'une molécule ainsi que les transitions radiatives (qui émettent de la lumière) (flèches droites) et non radiatives (flèches ondulées) possibles entre ces états. Les durées de vie les plus fréquemment observées pour les divers phénomènes sont également indiquées.

© shoshina - Fotolia



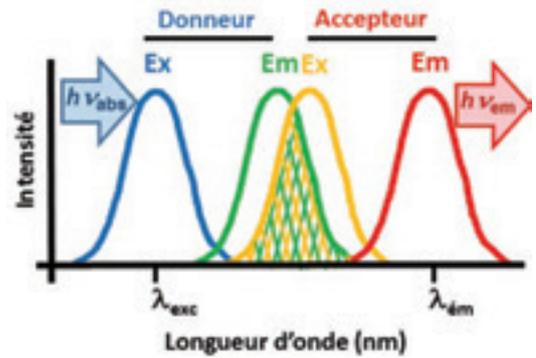
© Schlierner - Fotolia



© titilucida - Fotolia



Des phénomènes de transfert d'énergie peuvent aussi être observés entre deux molécules. Le FRET (*Förster/Fluorescence Energy Transfer*) est un transfert d'énergie résultant d'une interaction dipôle-dipôle entre deux fluorochromes, un donneur et un accepteur d'énergie. Le phénomène ne peut se produire que si les deux fluorochromes sont spatialement proches : la distance autorisant ce transfert, appelée rayon de Förster, dépend de la nature des fluorochromes - elle est généralement comprise entre 1 nm et 10 nm. Au-delà de cette distance, l'efficacité du transfert d'énergie chute très rapidement .



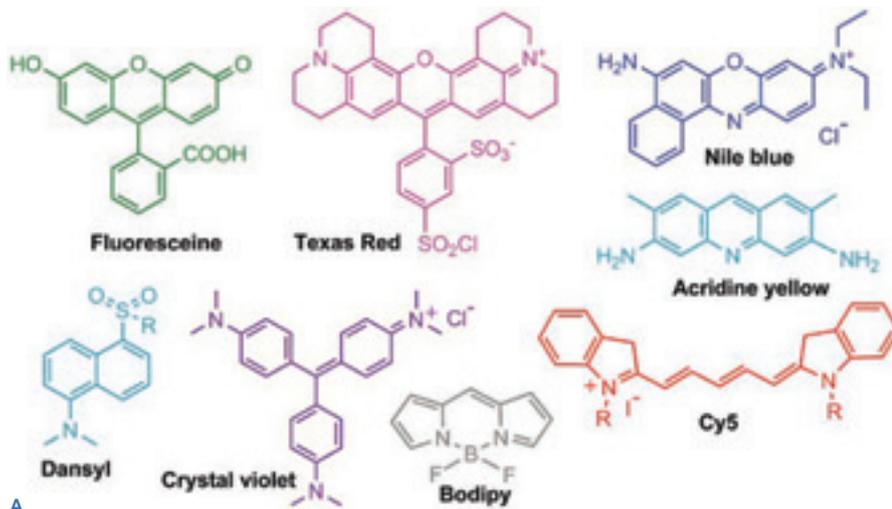
© Anne-Marie Caminade

Le phénomène de FRET

Spectres d'absorption et d'émission de lumière pour deux fluorochromes : la lumière est absorbée par le donneur et la fluorescence observée est celle de l'accepteur. Ce phénomène nécessite un bon recouvrement entre l'émission du donneur et l'excitation de l'accepteur (zone hachurée)

Seul un petit nombre de molécules ont des propriétés de fluorescence. Dès le milieu du 19^e siècle, les chimistes ont fait preuve d'imagination pour en synthétiser.

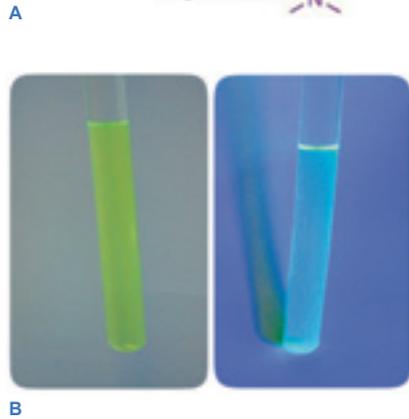
Les progrès dans le domaine de la détection de la fluorescence sont en partie dus à l'utilisation de lasers pour induire la fluorescence et à l'amélioration des microscopes optiques pour la détection. Les fluorochromes peuvent être utilisés pour l'étude des cellules (localisation subcellulaire de lipides ou de protéines, étude dynamique du trafic intracellulaire, recherche de récepteurs, etc.) ou pour le diagnostic (analyses génétiques, notamment).



© Anne-Marie Caminade, d'après ?

Biopuces

Depuis environ 25 ans, les analyses génétiques font notamment appel à l'utilisation de biopuces. Leur principe repose sur la capacité de l'ADN dénaturé à reformer spontanément sa double hélice en présence d'un brin complémentaire (réaction d'hybridation), les quatre bases nucléiques de l'ADN (adénine, guanine, cytosine, thymine) ayant en effet la particularité de s'unir deux à deux (A avec T, et G avec C) par des liaisons hydrogène.



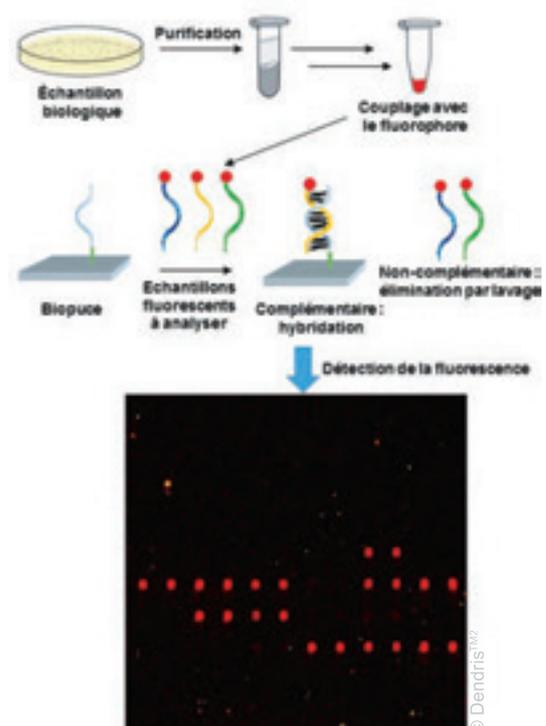
Quelques fluorochromes parmi les plus utilisés en biologie

A. Structure des fluorochromes et couleur qu'ils émettent par fluorescence. Le bodipy est représenté de couleur neutre, car sa couleur de fluorescence est dépendante de ses substituants. Dans de nombreux cas, une fonction chimique peut être ajoutée à ces fluorochromes pour qu'ils puissent être greffés sur des entités biologiques (acides nucléiques, anticorps, protéines, cellules, etc.).

B. Dérivé du dansyl dissous dans l'eau, éclairé par la lumière du jour (à gauche) ou par une lumière UV (à droite).

À partir d'un échantillon biologique, les entités à analyser sont purifiées, éventuellement multipliées, puis marquées par un fluorochrome. Ce mélange fluorescent est ensuite déposé sur une biopuce constituée d'oligonucléotides simple brin de structure connue, greffés en des points précis de la puce : seuls les fragments du mélange fluorescent ayant une structure complémentaire à celle des oligonucléotides présents sur la biopuce vont pouvoir s'y unir. La détection s'effectue par fluorescence : connaissant la structure des oligonucléotides simple brin greffés sur la biopuce, les points fluorescents permettent de déduire la structure (complémentaire) des fragments fluorescents de l'échantillon analysé. Ces biopuces sont utilisées pour le décryptage du génome, l'identification de mutations pathogènes, le typage tumoral, la détection de pathogènes et, plus généralement, en tant qu'outil de diagnostic dans les domaines de la santé, de l'environnement et de la sécurité alimentaire.

Principe d'une biopuce et image de la fluorescence après hybridation



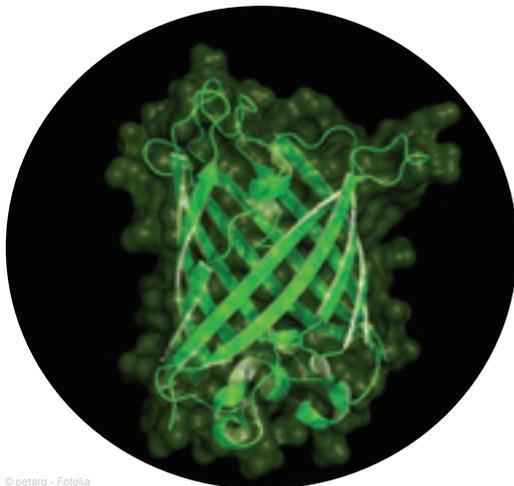
Marquage cellulaire

Le marquage cellulaire par fluorescence est bien plus ancien que l'utilisation des biopuces, puisque les premiers essais datent de près d'un siècle, avec le marquage de bactéries et de protozoaires. Des fluorochromes ont ensuite été développés pour marquer spécifiquement des organites cellulaires *in vitro* : noyau, mitochondries, lysosome, membranes ou, encore, récepteurs.

Ce type d'étude a notamment bénéficié du développement de la microscopie confocale. Avec cette technique, le plan focal de l'objectif est positionné à différents niveaux de profondeur dans l'échantillon, donnant des séries d'images à partir desquelles on obtient une représentation tridimensionnelle de l'objet, comme une cellule. Cette technique permet également des études de colocalisation. À titre d'exemple, elle a été utilisée pour sonder le mécanisme d'action, au sein d'un monocyte, d'un dendrimère (macromolécule hyperramifiée) candidat médicament, marqué par la fluorescéine³. Les images de microscopie confocale montrent une colocalisation de la fluorescence verte du dendrimère avec celle rouge des phagolysosomes, mais pas avec la fluorescence bleue de l'ADN. On peut donc en déduire que ce dendrimère suit principalement la route phagolysosomiale pour entrer dans le monocyte, et qu'il ne pénètre pas dans le noyau.

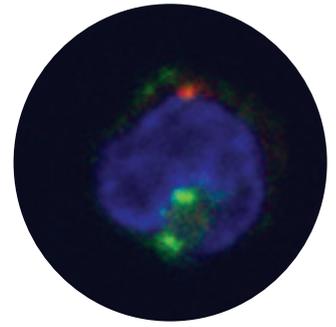
Pour connaître précisément la localisation de l'entité marquée que l'on souhaite suivre, on peut utiliser le phénomène de FRET. Dans le cas du dendrimère précédent, un marqueur spécifique de récepteurs cellulaires - la phycoérythrine, une protéine, couplée à un anticorps monoclonal -, dont la bande d'absorption recouvre presque intégralement la bande d'émission de la fluorescéine, a été utilisé pour déterminer à proximité de quel récepteur se trouvait le dendrimère³. Le FRET est aussi un outil très puissant pour quantifier les interactions protéines-protéines ou protéines-ADN, les changements de conformation des protéines, ou pour obtenir des informations sur les voies métaboliques.

Perspectives de la fluorescence en imagerie



© petarg - Fotolia

À côté des fluorochromes issus de la chimie organique (*voir supra*), d'autres types de fluorochromes sont aussi utilisés aujourd'hui, en particulier les protéines fluorescentes comme la GFP (*green fluorescent protein*), issue d'une méduse du Pacifique. La GFP permet notamment d'étudier les phénomènes dynamiques prenant place dans des cellules ou des tissus vivants. Cependant, les fluorochromes organiques subissent des phénomènes de photoblanchiment (oxydation par l'oxygène, voire destruction du fluorochrome, qui éteint la fluorescence).



Étude de colocalisation par marquage cellulaire fluorescent et microscopie confocale

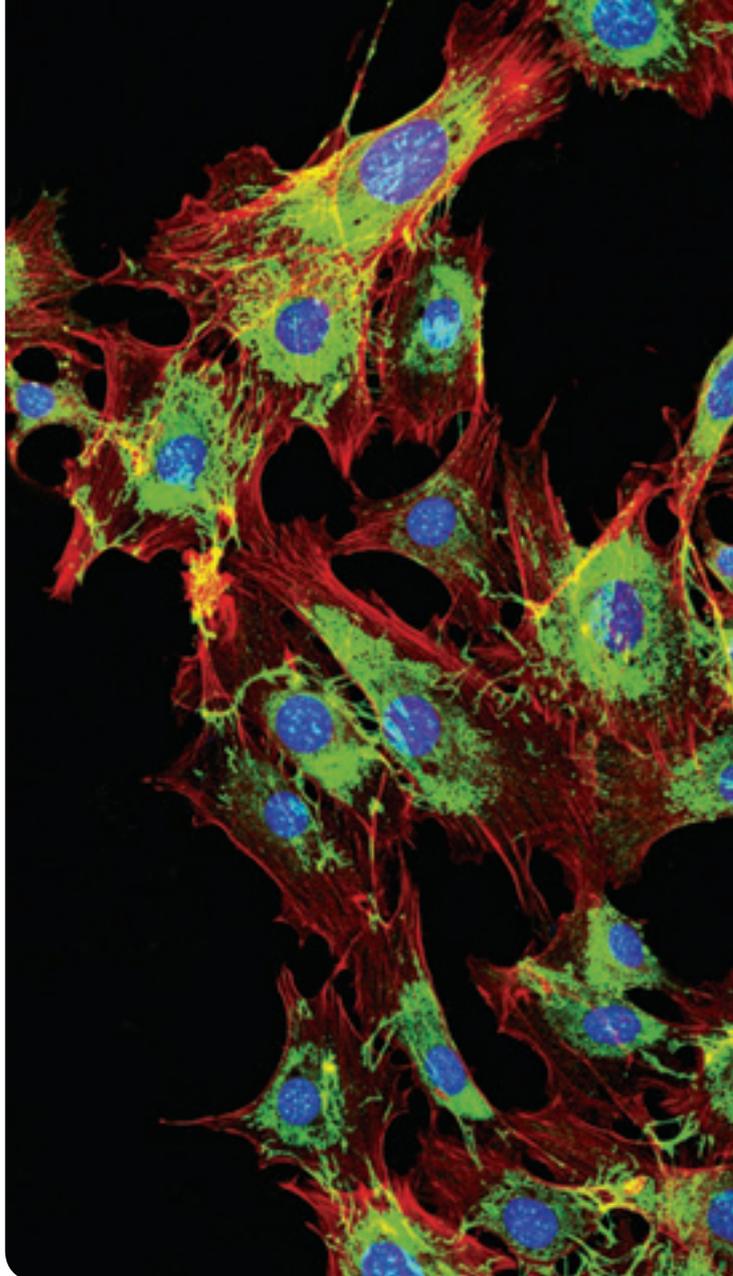
L'ADN (noyau) d'un monocyte humain est marqué par un fluorochrome bleu (TOTO-3, dimère de carbocyanine) et ses vésicules internes acides (phagolysosomes) par un fluorochrome rouge (LysoTracker®, dérivé de bodipy). Le dendrimère-candidat médicament, quant à lui, apparaît en vert (lié à la fluorescéine)

© Anne-Marie Caminade, adapté de ³



Pour pallier ce problème, des nanoparticules fluorescentes semiconductrices, les *quantum dots* (QD), ont été proposées. Ces QD présentent des propriétés de fluorescence ajustables selon leur diamètre ou leur composition et subissent peu de photoblanchiment. En revanche, ils sont souvent composés de métaux potentiellement toxiques (cadmium, sélénium, plomb, etc.).

Les recherches s'orientent également vers des fluorochromes émettant dans le proche infrarouge, afin de s'affranchir des problèmes d'autofluorescence des milieux biologiques. D'autres développements concernent l'utilisation de microscopes biphotoniques : le fluorochrome n'absorbe plus un photon, mais deux de plus faible énergie, et simultanément, en utilisant une longueur d'onde d'excitation non plus dans l'UV mais dans le visible, qui permet une meilleure protection des fluorochromes et surtout des cellules ou tissus à analyser. Les QD ont de bonnes capacités d'absorption à deux photons, de même que certains fluorochromes organiques au design spécifique. Ces différents progrès conduisent maintenant vers l'utilisation de la fluorescence pour l'imagerie médicale, par exemple en guidant le geste du chirurgien vers les cellules tumorales spécifiquement marquées par fluorescence, lors de la résection de tumeurs, afin d'éliminer les cellules cancéreuses résiduelles⁴. L'alliance de la lumière et de la chimie est donc très utile à la biologie, et les récents développements du domaine ouvrent des perspectives particulièrement prometteuses *in vivo*.



© drimafilm - Fotolia

Pour en savoir plus

1. Valeur B. *Molecular Fluorescence. Principles and Applications*, Wiley-VCH, 2002 (2^e édition 2012)
2. Hameau A, Fuchs S, Laurent R, Majoral JP, Caminade AM. *Beilstein J Org Chem* 2011, 7 : 1577-83
3. Poupot M, Griffe L, Marchand P, Maraval A, Rolland O, Martinet L, L'Faqihi-Olive FE, Turrin CO, Caminade AM, Fournié JJ, Majoral JP, Poupot R. *Faseb J* 2006, 20: 2339-51
4. Vahrmeijer AL, Hutteman M, van der Vorst JR, van de Velde CJH, Frangioni JV. *Nature Rev Clin Onc*, 2013, 10 : 507-18



La biophotonique, ou comment la lumière est devenue un outil diagnostique et thérapeutique

Chantal Andraud

Directrice du laboratoire de chimie, École normale supérieure de Lyon-CNRS-Université Claude-Bernard

avec Cyrille Monnereau

Laboratoire de chimie, École normale supérieure de Lyon-CNRS-Université Claude-Bernard

Toute lumière est constituée de photons. Selon le point de vue adopté, ces photons peuvent être assimilées à des ondes électromagnétiques ou à des particules fondamentales porteuses de quantités d'énergie fixes appelés quantas. Cette énergie peut être mise à profit dans le cadre de nombreuses applications en relation avec le biomédical et les biosciences.



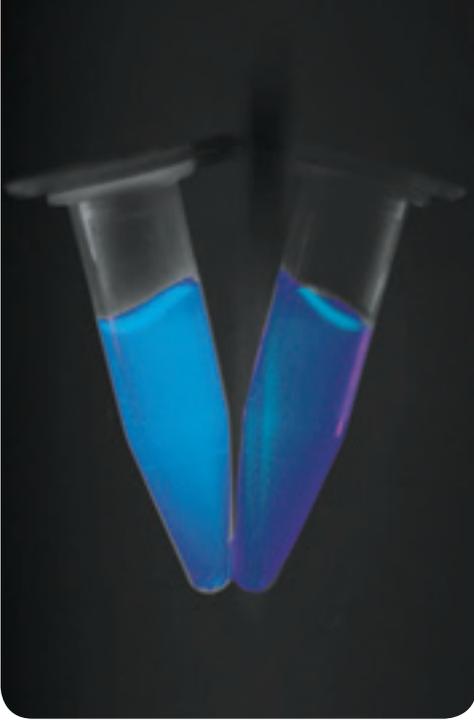
© DR

Lumière et vivant

Cette énergie est tout d'abord associée à une propriété intrinsèque du photon, sa longueur d'onde. Après interaction de ce photon avec un dispositif optique, comme un œil, une plaque photographique ou une caméra, c'est cette longueur d'onde qui va définir la couleur perçue par le dispositif. La gamme de longueurs d'onde accessibles au dispositif varie en fonction de la nature de ce dernier. Pour l'œil humain, cette gamme se situe dans un domaine compris entre le bleu-violet (400 nm) et le rouge (800 nm). De part et d'autre de ces valeurs sont définis les domaines des hautes énergies, les ultraviolets, et des basses énergies, les infrarouges. Cette gamme de longueurs d'onde ne constitue toutefois qu'une partie infime du spectre électromagnétique

Aux deux autres extrémités du spectre électromagnétique, les très énergétiques rayons X et les radiofréquences sont également utilisés dans le domaine biomédical. Les premiers, découverts par Rontgen en 1895, traversent facilement les tissus biologiques, mais sont efficacement absorbés par les substances minérales contenues dans les os. Bien qu'invisibles, ils impriment efficacement une plaque photographique : c'est ce principe qui est utilisé dans la radiographie, notamment. Les seconds, lorsqu'ils sont utilisés à une longueur d'onde appropriée, interagissent avec les électrons des molécules d'eau, perturbant momentanément leurs propriétés magnétiques. Le signal engendré par cette perturbation produit un contraste dépendant de la concentration en eau des différents tissus, permettant donc de les imager.

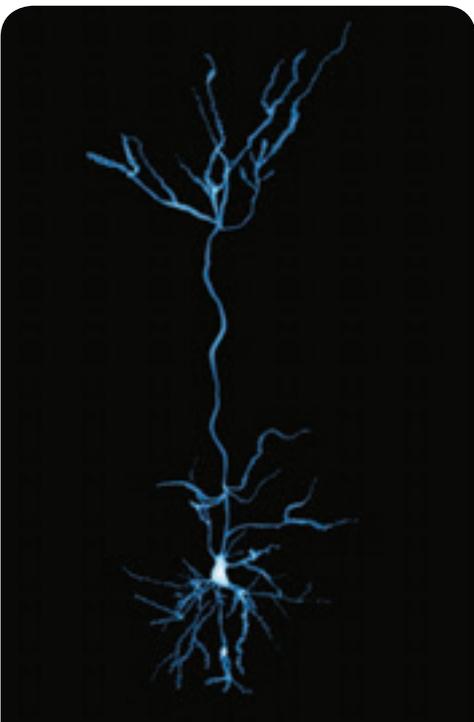
© Jean-Luc Evrard - Fotolia



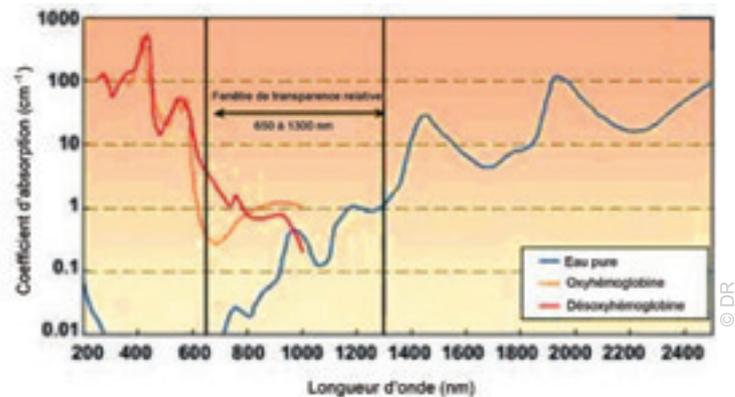
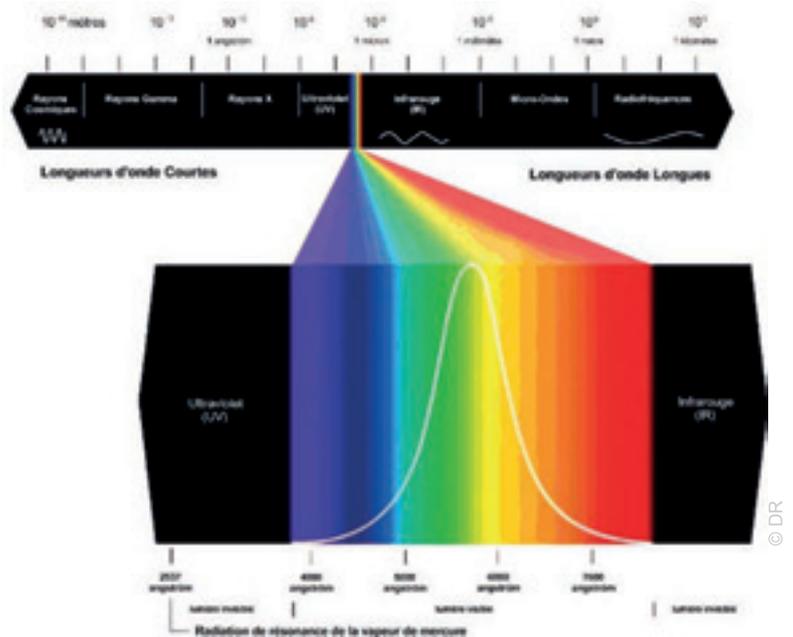
© Sven Hoppe - Fotolia



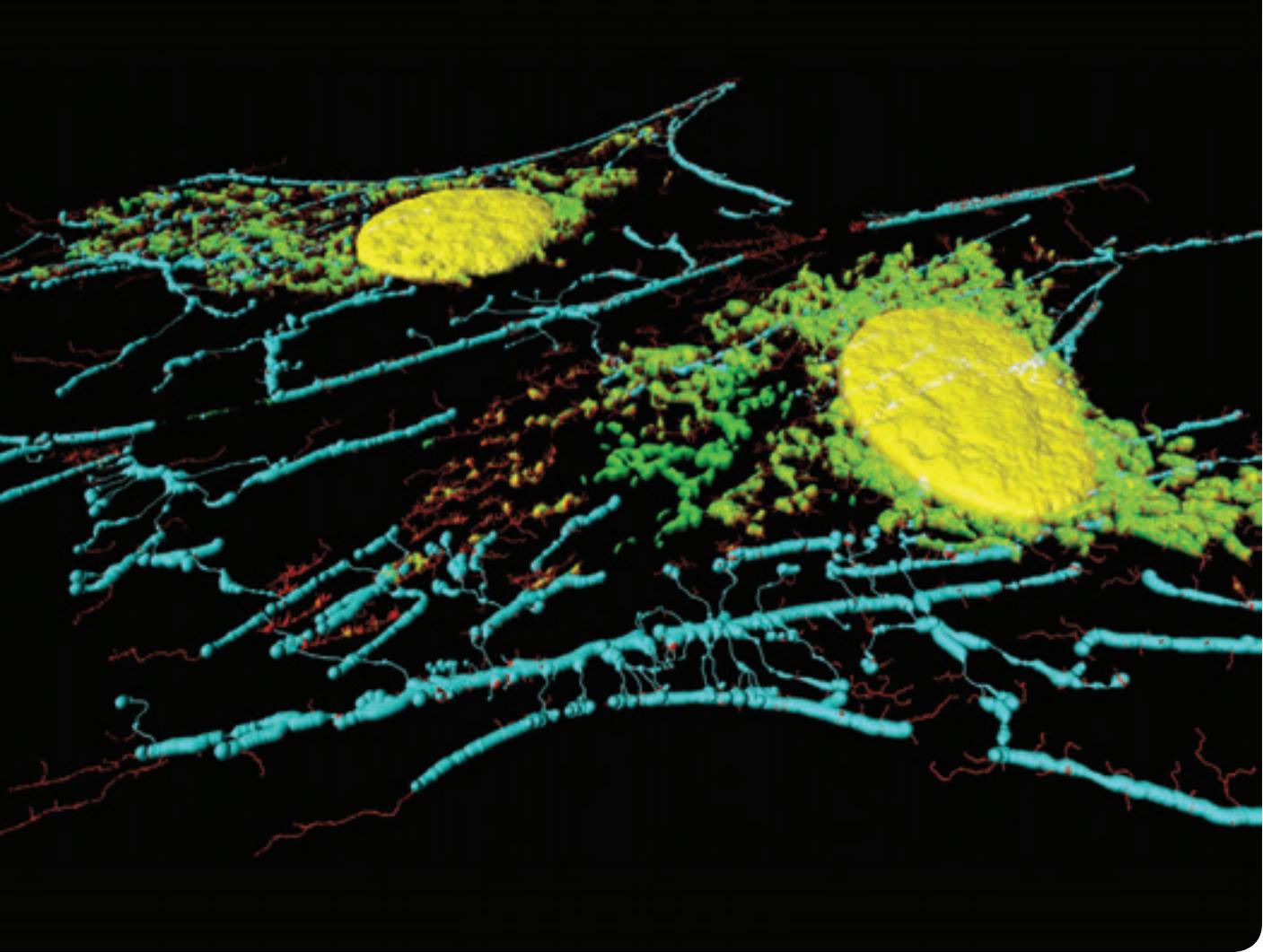
© Juan Grtner - Fotolia



Bien que ces techniques mettent à contribution des ondes électromagnétiques, et donc des photons, elles ne sont pas à proprement parler considérées comme relevant de la biophotonique : cette dernière est restreinte à une gamme de longueurs d'onde recouvrant le visible, ainsi que les domaines définis comme le proche infrarouge et le proche UV (350 nm à 1 300 nm environ). Les tissus végétaux, animaux ou humains - peau, sang, tissus conjonctifs - absorbent, réfléchissent ou diffusent la majeure partie de la lumière UV et visible. Ces propriétés expliquent pourquoi il est impossible de voir, par transparence, à travers le corps humain, et *a fortiori* de distinguer dans des conditions d'examen classiques les organes qui le composent ! Ces tissus laissent en revanche beaucoup mieux passer les gammes de longueurs d'onde situées dans le rouge et le proche infrarouge. C'est pour cette raison que les sources lumineuses et les détecteurs majoritairement utilisés en microscopie optique opèrent généralement dans ce domaine du rouge et du proche infrarouge, afin de favoriser l'examen de tissus profonds



Spectre électromagnétique (en haut) et fenêtre de transparence des tissus biologiques (en bas)



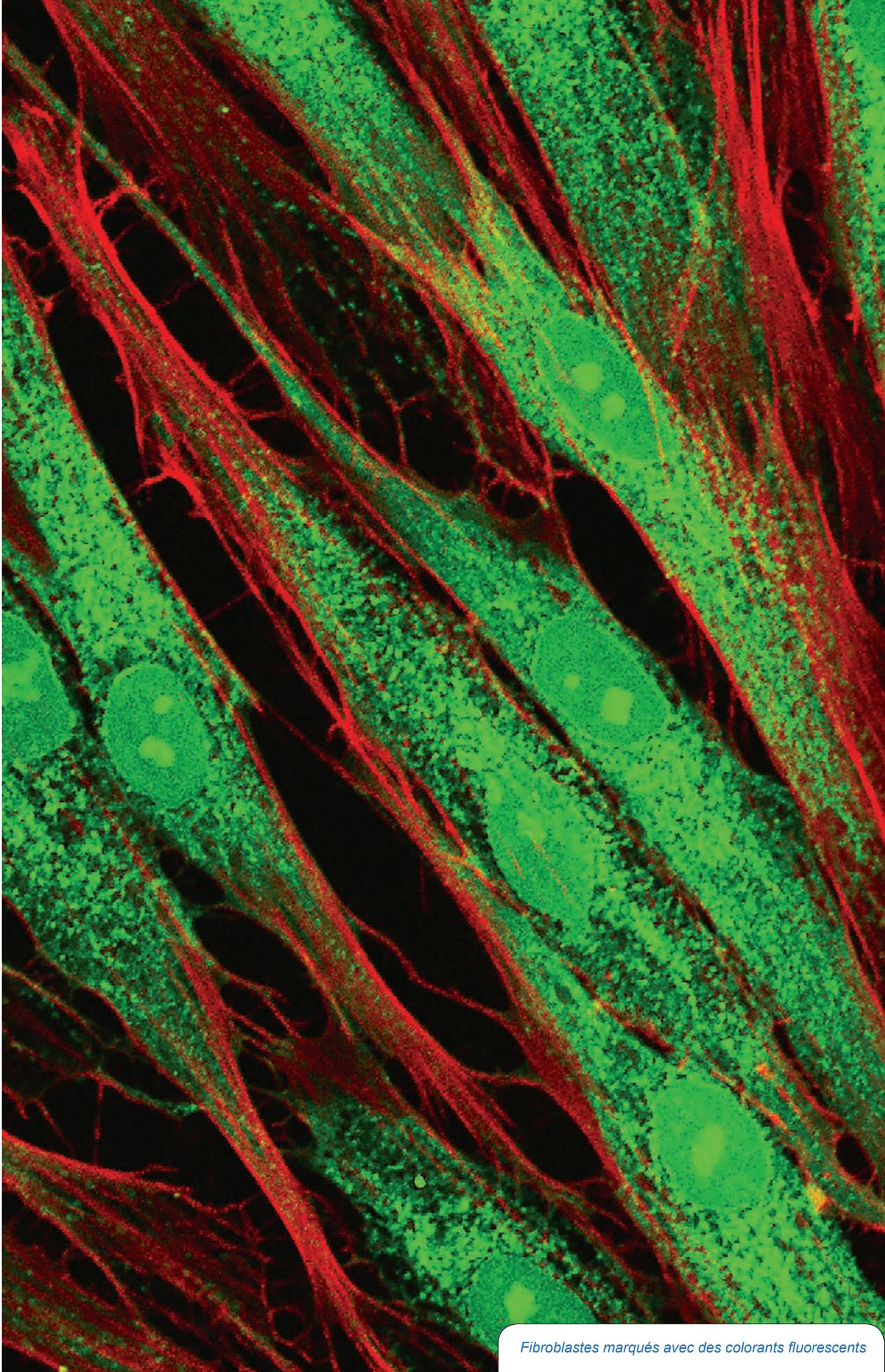
© heilipaves - Fotolia

Microfilaments, mitochondries et noyaux dans des fibroblastes

Microscopies de fluorescence

À l'origine uniquement fondée sur le phénomène de transmission, c'est-à-dire à l'examen de la lumière traversant l'échantillon analysé, produisant un contraste sombre aux endroits où elle a été absorbée, la microscopie optique s'est enrichie par l'utilisation du phénomène de fluorescence. La molécule absorbant un photon « stocke » de l'énergie qui est, pour partie, systématiquement convertie en chaleur ou en mouvement. Mais l'énergie restante peut être réémise sous la forme d'un nouveau photon, de caractéristiques différentes de celle absorbée. C'est la reconnaissance de ce dernier par un détecteur approprié (œil ou caméra) qui donnera naissance à l'image. Les techniques initialement développées autour de ce concept représentaient un bénéfice limité en termes de contraste et de résolution par rapport aux microscopies de transmission. Toutefois, à partir de la fin des années 80, l'introduction des techniques confocales, utilisant une reconstruction informatique de l'image par balayage d'un laser focalisé en un point unique, ont permis d'atteindre une résolution micrométrique : cette résolution autorise l'accès en temps réel à des informations précises et inédites sur les structures et le métabolisme cellulaire.

Les entités fluorescentes utilisées comme « agents de contraste » peuvent être intrinsèques à la cellule ou aux tissus étudiés : ainsi, certains acides aminés de protéines possèdent naturellement une fluorescence bleue. Toutefois, la gamme de longueurs d'onde, la variété d'informations et la profondeur d'échantillon accessibles de cette manière sont limitées, nécessitant généralement l'utilisation de colorants organiques



Fibroblastes marqués avec des colorants fluorescents

fluorescents de la famille des rhodamines, fluorescéines, cyanines, etc., dont la synthèse et l'étude ont fait l'objet de nombreux travaux. Ces derniers visaient non seulement à étendre la gamme de longueurs d'ondes accessibles, mais également à contrôler l'assimilation des colorants par les cellules et leur accumulation dans des compartiments cellulaires cibles, comme le noyau ou les mitochondries. Dans ce cadre, le développement, dès la fin des années 90, de protéines génétiquement modifiées à partir d'organismes sous-marins luminescents (méduses, notamment) a constitué une révolution, permettant à la culture cellulaire ou à l'organisme étudié de synthétiser lui-même les colorants destinés à son étude ! L'attribution du prix Nobel de chimie 2008 à ses découvreurs témoigne de son importance pour l'ensemble de la communauté scientifique.

Défis actuels

Vers l'hypperrésolution

Les microscopies optiques sont, par nature, limitées dans leur résolution qui ne peut, en théorie, excéder celle de la longueur d'onde de la lumière utilisée. L'utilisation conjuguée de colorants « clignotants », dont la luminescence varie au cours du temps d'exposition, et de traitements informatiques complexes permet de contourner cette limitation. Ces techniques, dont la découverte a été récompensée par un prix Nobel en 2014, donnent accès à des résolutions supérieures au $1/10^{\text{e}}$ de micromètre autorisant la visualisation de phénomènes biologiques à une échelle quasi moléculaire.

Vers le vivant

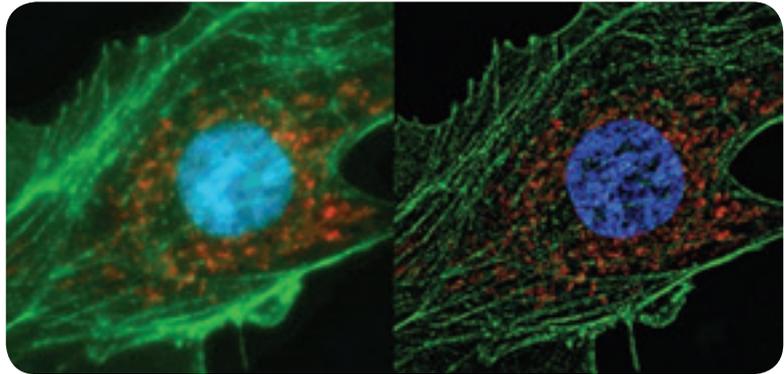
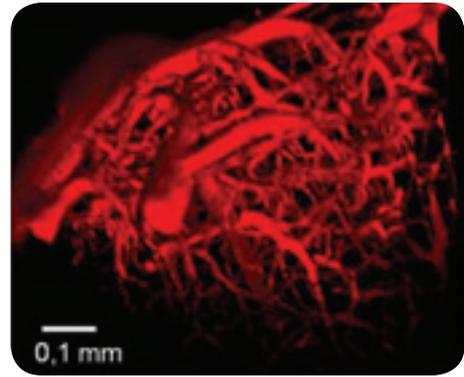
Du fait de la profondeur limitée de pénétration de la lumière visible dans l'organisme, l'examen d'organisme entier, à des fins diagnostiques par exemple, reste un défi majeur. Le couplage de techniques fibroscopiques à une nouvelle génération de colorants fluorescents « à absorption multiphotonique » constitue un développement prometteur dans ce cadre. Sans rentrer dans des détails complexes concernant la nature physique des phénomènes multiphotoniques, le principe en est qu'ils permettent, en travaillant avec des lasers



infrarouges, de repousser les limites de profondeur accessibles à la microscopie optique tout en facilitant la reconstitution de l'image tridimensionnelle : il s'agit là de deux paramètres importants dans l'imagerie diagnostique intravitale. D'autres candidats sont les *quantum dots*, particules métalliques nanométriques dont la faible taille occasionne des effets quantiques responsables de propriétés de luminescence hors du commun.

Microscopie de fluorescence à deux photons de la vascularisation du cortex cérébral d'une souris (à droite)

Comparaison d'une image de cellule en microscopie confocale standard et en microscopie ultrarésolue (en bas)



Vers la thérapie

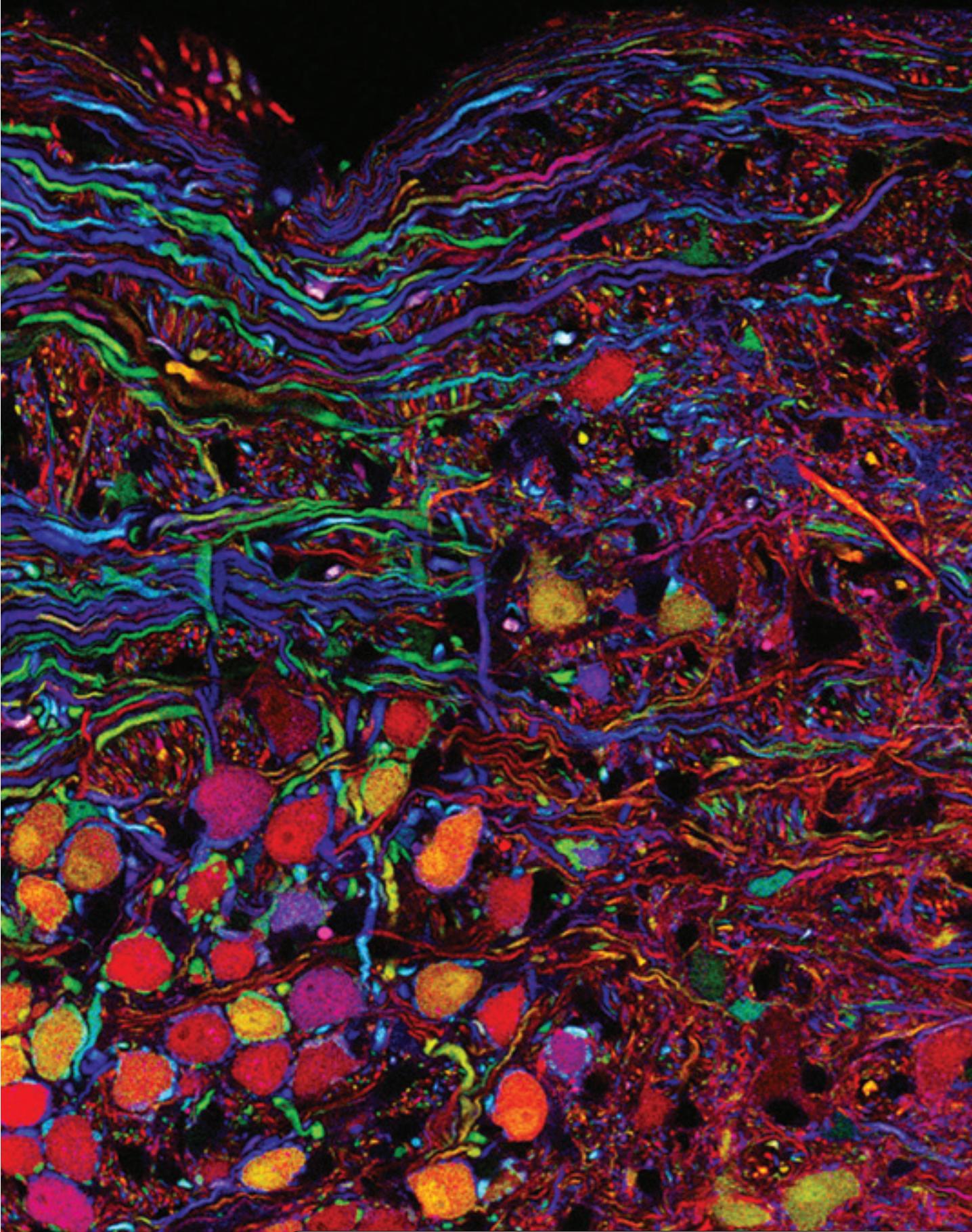
L'énergie contenue dans la lumière peut également être utilisée à des fins thérapeutiques. Des nanoparticules métalliques, d'or en particulier, peuvent efficacement concentrer cette énergie et la transformer en chaleur. Cet échauffement très localisé peut être utilisé pour détruire des tumeurs par effets d'hyperthermie : des essais cliniques pourraient être envisagés à court terme.

La photothérapie dynamique est, quant à elle, une réalité clinique pour le traitement des cancers depuis la fin des années 90, et constitue désormais la forme de thérapie la plus commune de la dégénérescence maculaire liée à l'âge. Son mode de fonctionnement repose sur l'excitation locale d'un colorant qui, par interaction avec l'oxygène environnant, produit une espèce toxique qui aboutit à la nécrose du tissu malade. Tout comme la microscopie de fluorescence, des études sont en cours afin d'adapter cette technique à des modes d'excitation multiphotoniques, et par là-même augmenter la profondeur et la précision du traitement.

Enfin, des composés cargos, pouvant libérer des substances thérapeutiques sous l'effet d'une excitation laser, sont également en cours de développement : dans les années à venir, ils devraient permettre le développement de traitements ultraciblés et sélectifs de la pathologie et de l'organe à traiter.

Après un essor remarquable dans les années 1990 et 2000, la biophotonique est une science arrivée à maturité. Dans le domaine de la recherche biologique et biomédicale, elle a participé à une amélioration très significative de nos connaissances des processus à l'œuvre dans le vivant, jusqu'à l'échelle moléculaire. Dans les prochaines années, les progrès constants des dispositifs optiques et des colorants utilisés devraient permettre à cette science de sortir des laboratoires pour devenir un outil incontournable de diagnostic et de thérapie cliniques.





Tronc cérébral d'une souris Brainbow

La méthode brainbow permet de visualiser les circuits neuronaux en créant un marquage multicolore du cerveau. La stratégie Brainbow dirige l'expression de combinaisons aléatoires de protéines fluorescentes de différentes couleurs (cyan, jaune, rouge...) dans les neurones.

Destination Soleil – Ou quand la lumière prend la tangente



© Zabou Carrière

Andrew Thompson et Paul Morin

En 2006, la France se dotait d'un outil d'une technicité et d'une puissance rares : le synchrotron Soleil, construit sur le plateau de Saclay. Cet accélérateur d'électrons, codirigé par le CEA et le CNRS, produit de la lumière par rayonnement synchrotron pour sonder la structure de la matière. Indispensable à la recherche fondamentale et appliquée dans un très grand nombre de disciplines scientifiques, il ouvre des perspectives particulièrement nouvelles en biologie, médecine et environnement. Paul Morin, directeur scientifique de Soleil, et Andrew Thompson, directeur scientifique Chimie-Biologie, nous ouvrent les portes de cette très grande infrastructure qui participe au rayonnement international de la recherche française. Reportage.

Radieux en ce jour de pluie, Paul Morin et Andrew Thompson gravissent l'escalier intérieur du bâtiment pour surplomber l'anneau de stockage du synchrotron Soleil. « *Notre implantation est très ouverte au public, soulignent-ils ensemble. Beaucoup de visites sont organisées, entre autres dans le but d'éveiller les élèves à la science. Tout le bâtiment dispose donc d'un système de protection adapté, qui permet de circuler assez librement.* » Vu d'au-dessus, l'anneau de stockage est massif : 354 mètres de circonférence sous une épaisse carapace en béton, soutenue par des centaines de pieux qui, à plus de



© Zabou Carrière

Un analyseur d'électrons réalise des mesures de photoémission

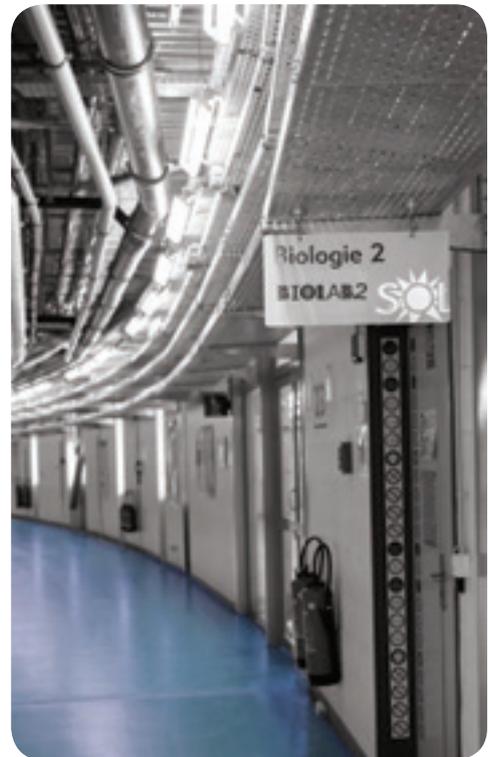


15 mètres sous terre, assurent la stabilité vibratoire de l'ensemble. L'intérieur de l'anneau, lui, ne mesure que 2,5 cm de haut et 7 cm de large, mais c'est l'intensité qui y prédomine : des électrons y tournent par paquets à une vitesse proche de celle de la lumière, avec une énergie de 2,75 GeV, dans l'ultravide, mesuré par une pression de 10^{-10} hPa. « *Le vide absolu n'existe pas, rappelle Andrew Thompson. Mais il est très poussé ici car les interactions entre électrons et molécules de gaz résiduel mettent en péril la stabilité de la trajectoire et créent des pertes de particules dans l'anneau.* » Tout est surveillé depuis la salle de contrôle : le canon à électrons, qui les arrache d'une cathode de tungstène soumise à une tension de 90 KeV, le LINAC (*LINear Accelerator*), rampe de lancement de 16 mètres où ils atteignent 100 MeV, le Booster, accélérateur ovale de 157 mètres de long qui, tour après tour, les fait monter à 2,75 GeV, et enfin l'anneau de stockage, qui les y maintient. Paul Morin ouvre son smartphone : « *on peut même surveiller l'ensemble par internet !* ».

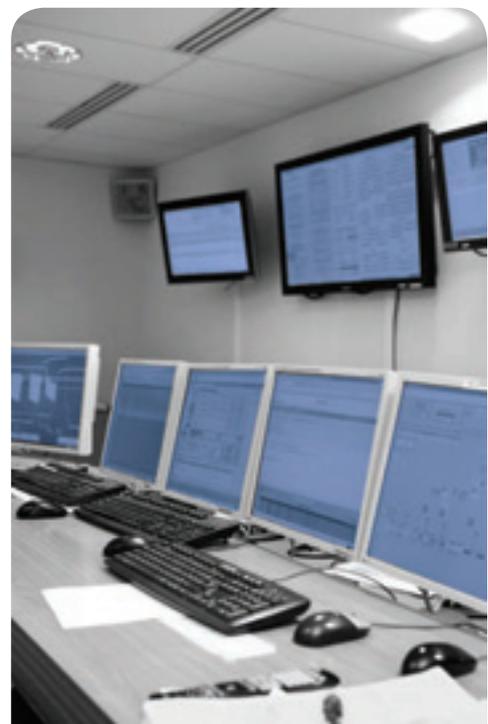
Dès qu'ils subissent un champ magnétique, ces électrons émettent, sous l'effet de l'accélération, une lumière - c'est-à-dire un rayonnement électromagnétique -, le « rayonnement synchrotron », sur une gamme de longueur d'onde qui dépend de leur énergie. Dans les virages de l'anneau, 32 éléments magnétiques de courbure guident le faisceau, tandis que l'on peut insérer, dans les nombreuses lignes droites, des « onduleurs » magnétiques qui confèrent un mouvement sinusoïdal aux électrons et rendent leur rayonnement extrêmement brillant. « *La lumière ici est unique par son domaine spectral et son intensité*, relève Paul Morin. *Elle s'étend de l'infrarouge jusqu'aux rayons X, avec une brillance extrême, mesurée en nombre de photons par unité de surface et par unité d'ouverture angulaire.* » Pour l'exploiter, 29 « lignes de lumières » d'environ 40 mètres s'échappent tangentiellement à l'anneau de stockage, comme autant de rayons d'un soleil dessiné. Vingt-six sont opérationnelles. Ces lignes sont de véritables laboratoires, avec leurs propres équipes, techniques et domaines d'énergie. Outre les recherches menées par Soleil, près de 600 projets par an sont sélectionnés pour leur excellence, et se partagent 5 000



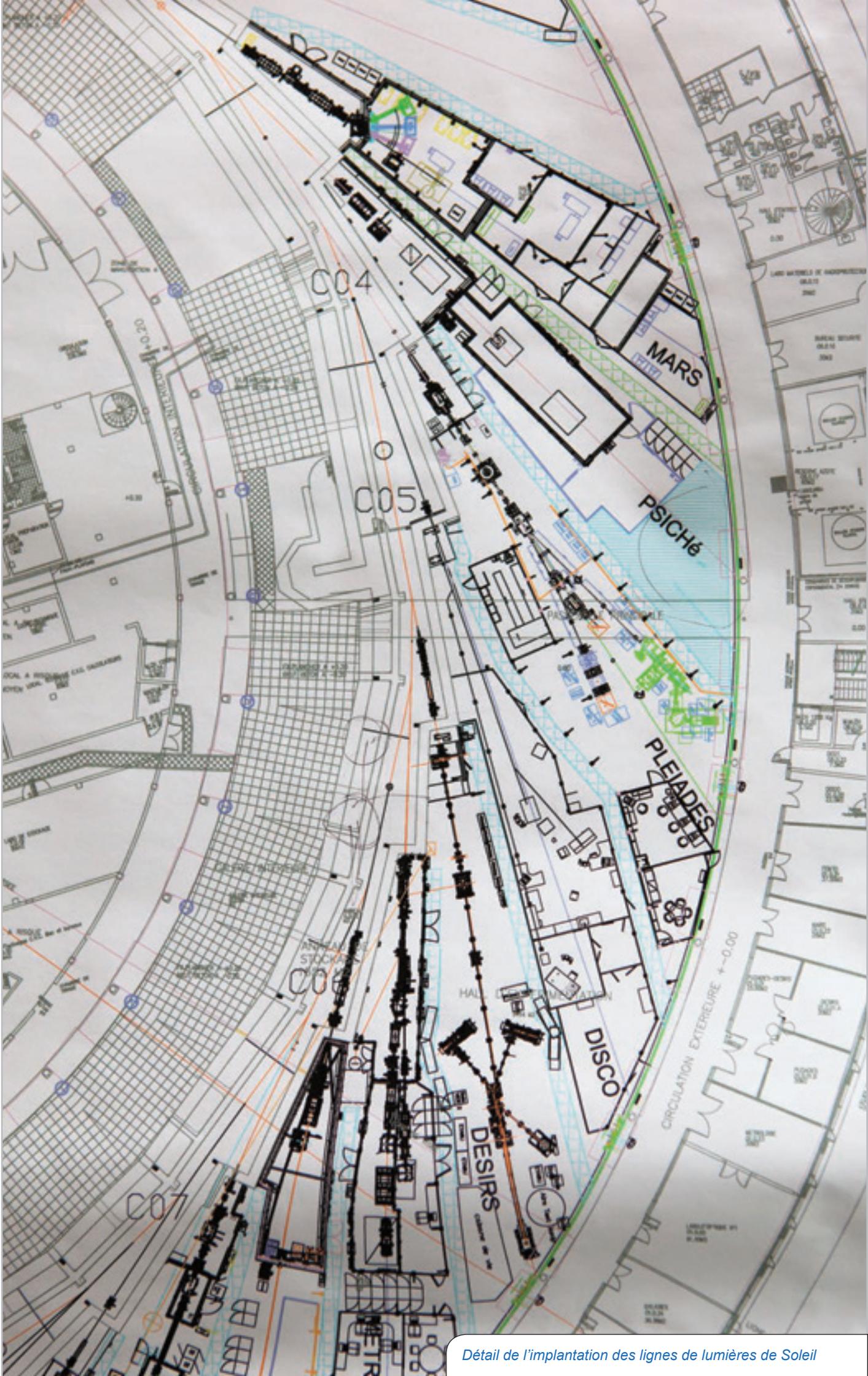
© Zabou Carrière



© Zabou Carrière



© Zabou Carrière



heures de faisceau, et 10 % du temps est alloué à des recherches à caractère industriel. Plus qu'un seul soutien technique, les chercheurs de Soleil offrent souvent une véritable collaboration, qui commence dès la définition du projet et s'étend à l'analyse complexe des données. Ces projets sollicitent les qualités propres du faisceau : brillance extrême, stabilité et haute résolution temporelle.

Pour Andrew Thompson, ce sont ces qualités, précisément, qui sont recherchées en biologie et médecine : « *elles permettent d'étudier la structure moléculaire d'un matériau vivant, ses mécanismes cellulaires, l'organisation de ses tissus.* » Deux lignes sont ainsi dédiées à la cristallographie qui, par diffraction des rayons X sur le nuage électronique, permet de connaître l'organisation des atomes d'une molécule en trois dimensions. Le détecteur, en bout de ligne, relève les moindres détails d'un échantillon de quelques microns ! « *Ce détecteur, c'est le nerf de la guerre* », sourit Paul Morin, les yeux tournés vers des boîtes d'échantillons expédiées de Cambridge, le berceau de la cristallographie des macromolécules. Parmi les réussites de Soleil, une collaboration avec l'Institut de génétique et de biologie moléculaire et cellulaire (IGBMC) a permis de déterminer, sur une levure, la structure atomique du ribosome eucaryote et des molécules pouvant l'inhiber¹. Cette machinerie, d'un poids moléculaire de plus de 3 millions de daltons, est responsable de la traduction du code génétique. « *Ces connaissances sont précieuses, commente Andrew Thompson : les antibiotiques à large spectre bloquent souvent le ribosome bactérien, l'empêchant de synthétiser des protéines, mais peuvent aussi bloquer notre propre ribosome !* » Outre la cristallographie, d'autres techniques permettent d'examiner la structure atomique de la matière, telle la diffusion aux petits angles qui permet d'obtenir, par rayons X, une distribution statistique de morphologie et de distance entre particules d'un échantillon en solution. Beaucoup de lignes dédiées à la biologie sont automatisées : un bras robotique prélève dans l'azote liquide, en un temps très court, un grand nombre d'échantillons de poids extrêmement réduit.

Au niveau cellulaire, plusieurs lignes utilisent la fluorescence X, un balayage infrarouge ou, spécificité de Soleil, le rayonnement ultraviolet. Depuis 2013, un grand partenariat européen public-privé, *IMI-Translocation*, étudie par spectroscopie UV la résistance aux antibiotiques : la concentration de certains antibiotiques dans une cellule répond aux UV lointains (jusqu'à 180 nm), par fluorescence, et leur transport à travers la membrane cellulaire y devient en même temps visible, sans marqueur chimique. Par ailleurs, la première évaluation par infrarouge du taux de stéatose d'un foie humain a également été réalisée à Soleil, par une équipe de l'Inserm et de l'hôpital Brousse : cet excès de





lipides insaturés dans le foie est mal détecté par l'examen histologique et peut faire échouer une greffe. Comme les composants biochimiques (protéines, glucides, lipides, ADN) absorbent des longueurs d'onde infrarouge différentes, la haute brillance de Soleil a permis de détecter une stéatose sur des échantillons de foie de 6 microns. « À partir de ces mesures de pointe, l'équipe a pu, une fois la démarche validée, la transférer à l'hôpital. Elle a breveté un logiciel couplé à un microscope infrarouge de résolution courante, afin d'identifier immédiatement une stéatose sur des coupes de 4 millimètres carrés. »

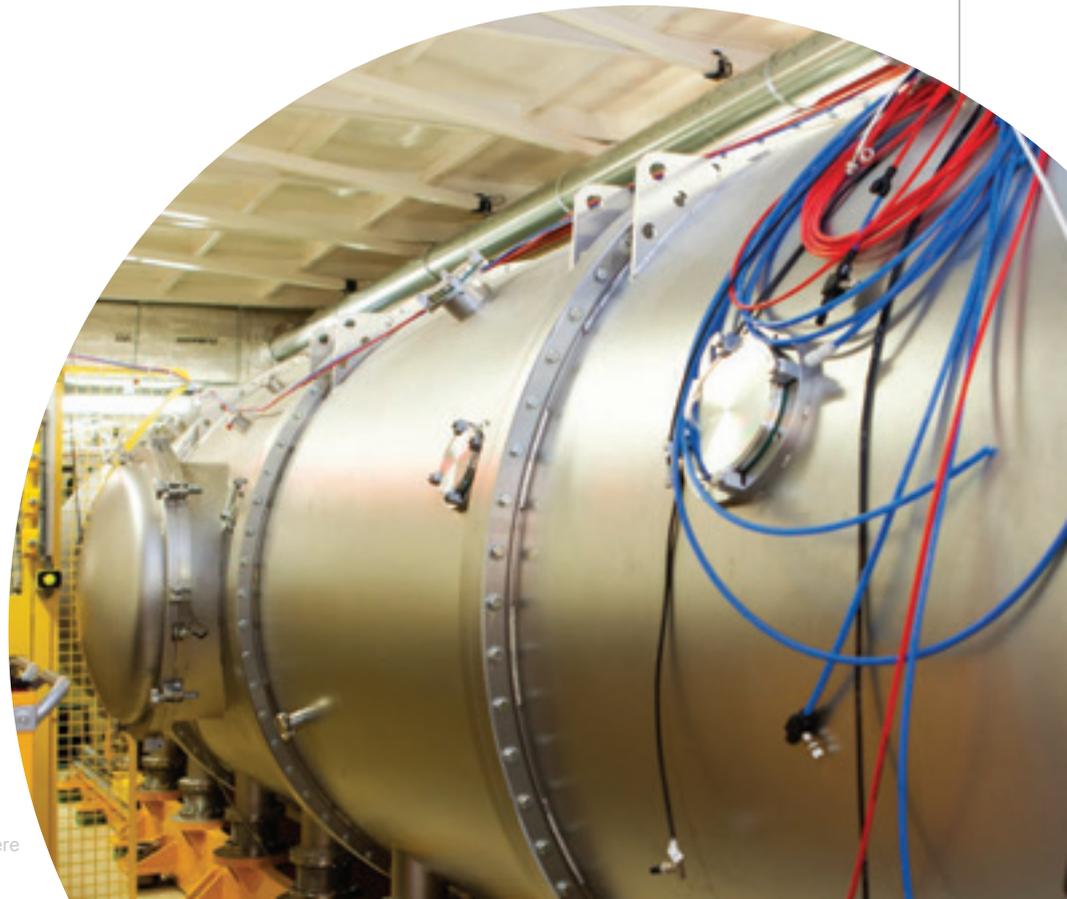
L'étude des tissus a également été menée par ultraviolets profonds : la lumière permet ainsi de comprendre la dégradation structurelle d'un tissu osseux, l'idée étant d'utiliser ces informations pour améliorer l'efficacité des traitements contre l'ostéoporose. Une nouvelle ligne, en construction, suscite en outre de grands espoirs : longue de 200 mètres, dépassant du bâtiment principal, elle permettrait d'étudier des tissus mous par imagerie X en contraste de phase, avec une résolution spatiale extrême. Elle renouvellerait par exemple nos connaissances de l'angiogenèse, de la formation des tumeurs ou de la maladie d'Alzheimer. « Soleil est en constante évolution, résume Paul Morin. C'est peut-être là le message principal. »

**Reportage réalisé
par Nicolas Rigaud**

Pour en savoir plus

1. Garreau de Loubresse, et al. *Structural basis for the inhibition of the eukaryotic ribosome*. Nature 2014, 513 : 517-22

www.synchrotron-soleil.fr/



Création du Conseil national consultatif pour la biosécurité



© B.Eymann



© DR

Henri Korn et Jean-François Bach

Membres de l'Académie des sciences

Le risque que soient utilisées des armes biologiques et chimiques ne cesse de s'accroître du fait des progrès des recherches, parfois insuffisamment contrôlées, dites « duales » :

il s'agit de recherches qui, bien que conduites dans un souci d'améliorer la santé publique et le bien-être de l'humanité, aboutissent à des résultats pouvant être détournés de leur usage à des fins malveillantes, criminelles ou terroristes. Les manipulations génétiques de bactéries et de virus hautement pathogènes par les biotechnologies les plus modernes peuvent en accroître les potentialités.

Dès lors, comment obtenir que les connaissances en sciences de la vie soient mises exclusivement au service du bien-être général ? Quelles sont les précautions à prendre susceptibles de réduire le risque d'un détournement des travaux de recherche vers des applications malveillantes, voire terroristes ? Comment concilier les impératifs de sécurité et ceux de liberté des recherches, indispensables à l'avancée des connaissances ?

Reprenant les recommandations du rapport de référence de l'Académie des sciences qui posent ces questions - « *Les menaces biologiques - Biosécurité et responsabilité des scientifiques* », publié aux PUF en 2008 par Henri Korn, Patrick Berche et Patrice Binder -, le Premier ministre a décidé la création du Conseil national consultatif pour la biosécurité (CNCB), qui a été institué par le décret n°2015-1095 du 31 août 2015.

Le CNCB a été mis en place lors d'une cérémonie présidée par Jean-François Bach, Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences, qui s'est déroulée le 30 novembre 2015 en Grande salle des séances



© PUF

de l'Institut de France, en présence de Jean-Marie Le Guen, secrétaire d'État chargé des relations avec le Parlement, et de Louis Gautier, Secrétaire général de la défense et de la sécurité nationale,



De gauche à droite : Catherine Bréchnac, Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences, Jean-Marie Le Guen, secrétaire d'État chargé des relations avec le Parlement, Louis Gautier, Secrétaire général de la défense et de la sécurité nationale, et Jean-François Bach, Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences

qui assure la présidence de ce Conseil. En effet, selon les termes du décret du 24 décembre 2009, « *Le Secrétaire général de la défense et de la sécurité nationale assiste le Premier ministre dans l'exercice de ses responsabilités en matière de défense et de sécurité nationale. [...] Il anime et coordonne les travaux interministériels. [...] Il veille à la cohérence des actions entreprises en matière de politique de recherche scientifique et de projets technologiques intéressant la défense et la sécurité nationale, et contribue à la protection des intérêts nationaux stratégiques dans ce domaine.* »

Ce nouveau Conseil réunit six personnalités scientifiques qualifiées, habilitées Secret-Défense, proposées par l'Académie en qualité d'experts, et de hauts fonctionnaires appartenant aux ministères des Affaires étrangères, de l'Enseignement supérieur et de la recherche, de la Santé, de la Défense et de l'Intérieur. Son action pourra s'appuyer, si besoin, sur des comités *ad hoc* désignés par l'Académie des sciences, et sur la consultation de représentants et d'experts des disciplines multiples qui concourent aux sciences du vivant.

Le CNCB a pour mission de réfléchir aux détournements possibles d'usage des résultats de recherche et aux moyens de s'en prémunir. Dans ce cadre, il s'attache à :

- réaliser des travaux de prospective et de veille sur les recherches à caractère dual dans le domaine des sciences chimiques et biologiques ;
- proposer des mesures propres à assurer la prévention et la détection d'éventuelles menaces, leur traitement, l'information du public, la responsabilisation et l'éthique du monde scientifique et de la santé ;
- veiller au respect et à l'amélioration des engagements internationaux ;
- formuler des recommandations visant à s'assurer que les progrès des sciences biologiques ne soient générateurs d'aucune menace pour la biosécurité.





L'Académie s'était intéressée depuis de nombreuses années aux problèmes associés aux relations entre les sciences et la défense, notamment au sein de son comité *Science et sécurité*, devenu en 2014 le comité *Science et biosécurité* qui se focalise sur l'ensemble des problèmes relevant de la biosécurité et de la biosûreté.

Cette action de l'Académie des sciences s'inscrit dans le cadre, plus général, de ses missions de transmission des connaissances et d'expertise, qui l'ont menée à s'intéresser à des sujets sociétaux aussi divers que l'énergie, le climat, les organismes génétiquement modifiés, l'éthique de la science ou, encore, l'organisation et le financement de la recherche française.



De nouveaux membres à l'Académie des sciences

Une année sur deux, l'Académie procède à l'élection de nouveaux membres. Au cours d'un processus qui dure près d'un an et implique plusieurs étapes strictement encadrées par les statuts de l'Académie, la compagnie tout entière élit les scientifiques qu'elle juge dignes de la rejoindre. Les résultats de cette élection sont ensuite soumis à l'approbation du président de la République, protecteur de l'Académie. Voici une courte présentation des nouveaux membres élus en 2014 qui ont été solennellement reçus sous la coupole de l'Institut de France le 16 juin 2015.



Nicholas Ayache

Nicholas Ayache est spécialiste de l'analyse et de la simulation informatique des images médicales. Grâce à ses travaux, des informations cliniquement pertinentes peuvent être automatiquement extraites de ces images, afin de construire un modèle numérique de l'anatomie et de la physiologie du patient pour assister le diagnostic, le pronostic et la pratique thérapeutique.

SECTION DES SCIENCES MÉCANIQUES ET INFORMATIQUES

B. Eymann - Académie des sciences

SECTION DE BIOLOGIE MOLÉCULAIRE ET CELLULAIRE, GÉNOMIQUE



Thomas Bourgeron

Thomas Bourgeron travaille sur le cerveau humain, et notamment sur nos capacités à communiquer. En utilisant des approches génétiques et neurobiologiques, il a identifié une première voie biologique associée à l'autisme. Les gènes concernés jouent un rôle important dans le développement des connections neuronales.

B. Eymann - Académie des sciences



Jean-Michel Coron

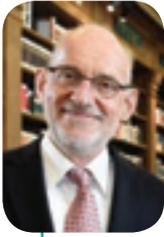
Jean-Michel Coron a débuté sa carrière en élaborant de nouvelles méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles. Il s'intéresse aujourd'hui au contrôle des systèmes, et développe des méthodes de construction de contrôles permettant d'atteindre un objectif désiré, et de lois de rétroaction permettant de stabiliser un point d'équilibre.

SECTION DES SCIENCES MÉCANIQUES ET INFORMATIQUES

B. Eymann - Académie des sciences

SECTION DE CHIMIE

B. Eymann - Académie des sciences



Patrick Couvreur

Patrick Couvreur conçoit des nanotechnologies pour l'encapsulation, le transport et la vectorisation de médicaments.

Ces technologies permettent le développement de nouvelles chimiothérapies contre des maladies graves, à la fois plus efficaces et moins toxiques.

SECTION DE PHYSIQUE

B. Eymann - Académie des sciences



Antoine Georges

Antoine Georges travaille sur les systèmes quantiques composés d'un grand nombre de particules ayant de fortes interactions entre elles. Il a développé des méthodes théoriques permettant de comprendre les propriétés collectives de ces systèmes, qu'il s'agisse des électrons dans les oxydes de métaux de transition ou des atomes dans un gaz ultrafroid.

SECTION DE BIOLOGIE INTÉGRATIVE

B. Eymann - Académie des sciences



Philippe Janvier

Philippe Janvier est paléontologue, spécialiste des premiers vertébrés, ces « poissons » qui vivaient il y a environ 530 à 360 millions d'années. Ses travaux ont permis de retracer les premières étapes de l'histoire évolutive de ce groupe d'animaux auquel nous appartenons, ainsi que la mise en place de ses principales innovations anatomiques.

SECTION DE BIOLOGIE MOLÉCULAIRE ET CELLULAIRE, GÉNOMIQUE

B. Eymann - Académie des sciences



Thomas Lecuit

Thomas Lecuit est biologiste cellulaire et du développement. Il étudie la morphogenèse des tissus biologiques, c'est-à-dire leur organisation et leurs remodelages incessants. Ses recherches ont notamment permis de mettre en évidence les forces mécaniques à l'œuvre dans les processus assurant à la fois la cohésion et la plasticité de ces tissus.

SECTION DE CHIMIE

B. Eymann - Académie des sciences



Ludwik Leibler

Ludwik Leibler travaille sur la physique et la chimie des polymères et des colloïdes. Ses théories sont à l'origine d'une activité expérimentale et industrielle intense. Il a récemment découvert les vitrimères, ainsi que la possibilité de coller des tissus biologiques grâce à des nanoparticules.

SECTION DES SCIENCES MÉCANIQUES ET INFORMATIQUES

B. Eymann - Académie des sciences



Stéphane Mallat

Stéphane Mallat est spécialiste de l'analyse mathématique appliquée au traitement de l'information numérique sous toutes ses formes : images, sons, données. Il a introduit des représentations, notamment par ondelettes, qui isolent les structures importantes de l'information, et permettent d'améliorer le traitement des signaux.





INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

Directrice de la publication

Catherine Bréchnac

Directoire

Jean-François Bach
Catherine Bréchnac
Alain-Jacques Valleron

Comité éditorial

Jean-François Bach
Catherine Bréchnac
Vincent Courtillot
Bernard Dujon
Christian Dumas
Marc Fontecave
Uriel Frisch
Étienne Ghys
Denis Jérôme
Michel Le Moal
Bernard Meunier
Daniel Ricquier
Didier Roux
Christophe Soulé
Philippe Taquet
Alain-Jacques Valleron

Rédactrice en chef

Emmanuelle Chollet

Direction artistique

Natacha Oliveira

Impression

Boudard Imprimeur

ISSN 2102-5398

Académie des sciences

23 quai de Conti - 75006 Paris
Tél.: 01 44 41 44 60
www.academie-sciences.fr