



La lumière

et ses applications



La lumière et ses applications

Introduction historique

**Nos yeux révèlent la splendeur du monde.
Que serait-elle sans la lumière, source de vie ?**

L'expliquer fut source de débats, de
confrontations, entre les savants.

**Ce fascicule est une initiative
de la Société Française d'Optique (SFO)
et de la Société Française de Physique (SFP).**

C'est un ouvrage collectif réalisé sous
la responsabilité de Daniel Bideau (SFP),
Charles de Novion (SFP), Riad Haidar (SFO),
Daniel Hennequin (SFP) et Costel Subran (SFO).

Ont contribué à sa rédaction :

Philippe Aubourg (SFO), Jean-Louis Bobin
(Univ. Pierre et Marie Curie – Paris),
Claude Boccara (ESPCI, Paris),
Marc Brunel (Institut de Physique de Rennes,
Univ. Rennes 1), Marie Houssin (Laboratoire
PIIM, Univ. d'Aix-Marseille), Roland Lehoucq
(CEA, Saclay), Bernard Maitte (Univ. de Lille),
Serge Mordon (Inserm, Lille),
Jean-Michel Mur (SFO), Serge Picaud
(Institut de la Vision, Inserm, Paris),
Bruno Robert (CEA, Saclay), Amanda Ross
(Institut Lumière Matière, Univ. Lyon 1),
José-Alain Sahel (Institut de la Vision,
UPMC, Paris).

Ce fascicule est disponible en format
numérique, avec des fiches complémentaires,
sur le site web <http://lumiere.sfpnet.fr>.

Conception et réalisation graphique : Laetitia Morin
www.laetitiamorin-graphiste.fr

Suivi de rédaction : Agathe Cymer

Dépôt légal : 3^e trimestre 2015
© SFP/SFO - Édité à 26 000 exemplaires

Imprimerie Jouve
11, bd de Sébastopol, 75036 Paris Cédex 01
Tél. : 01 44 76 54 40

Société Française de Physique
33, rue Croulebarbe, 75013 Paris
contact : sfp@sfpnet.fr
Serveur : www.sfpnet.fr

Société Française d'Optique
2 avenue Augustin Fresnel, 91127 Palaiseau cedex
contact : sfo.info@institutoptique.fr
Serveur : www.sfoptique.org

Vers l'an mille, au sein de la science en pays d'Islam, naît la
première théorie scientifique de la lumière : elle serait formée
de petites sphères se propageant dans un espace vide.

La science latine du 13^e siècle préfère la décrire comme des
vagues agitant un milieu qui emplirait l'espace : l'éther.

Dès lors, théories corpusculaire et ondulatoire s'affrontent,
dominent tour à tour, expliquent de mieux en mieux les
phénomènes lumineux, l'une par le mouvement de mobiles,
l'autre par des vibrations analogues aux sons. Ces approches
restent toujours incomplètes, lacunes qui relancent les
controverses, amènent de nouvelles précisions, la découverte
de nouveaux phénomènes.

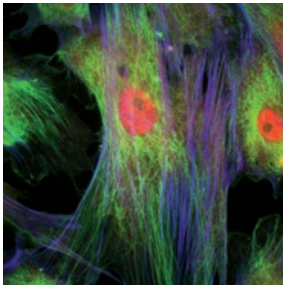
Le 19^e siècle assure la victoire, que l'on croit définitive, de la
théorie ondulatoire. Les ondes sonores et lumineuses ne sont
cependant pas de même nature : elles diffèrent par la direction
des vibrations qui leur sont associées. Mais il faut attribuer à
l'éther des propriétés invraisemblables : il serait à la fois d'une
fluidité extrême, tout en étant visqueux ! La fin du siècle sort
de cette contradiction et montre qu'électricité, magnétisme et
lumière sont un même phénomène : attribuer des propriétés
mécaniques à l'éther devient inutile.

Tout est remis en cause au début du 20^e siècle : certains effets,
inconnus jusqu'alors, ne peuvent s'expliquer qu'en considérant la
lumière comme formée de grains de matière, les photons, et en
attribuant à ceux-ci des énergies bien précises. Comme d'autres
effets ne peuvent s'expliquer que par des ondes, la lumière devient,
pour un temps, à la fois ondes et corpuscules ; l'éther est rejeté.

Les avancées contemporaines montrent qu'à l'échelle de l'inni-
finitement petit, matière et lumière peuvent être englobées dans une
même description : elles sont formées d'objets quantiques,
dont les propriétés sont pour certaines celles des ondes, et pour
d'autres celles des particules. De nouveaux horizons s'ouvrent
en physique...



Sommaire



2 Introduction historique

4 La nature de la lumière

8 Une grande diversité de sources

12 La lumière et la vie

13 Aux origines de la vie

14 L'œil humain

16 L'imagerie du vivant

18 Soigner avec la lumière

20 Les technologies de la lumière

20 La lumière pour analyser la matière

22 La lumière, messagère des cieux

24 Télécommunications : la fibre optique

25 Les photons et l'industrie

26 La lumière du soleil, source d'énergie

27 En savoir +

L'Organisation des Nations Unies a proclamé l'année 2015 Année Internationale de la Lumière et des Techniques utilisant la Lumière. L'ONU souhaite ainsi sensibiliser et mieux former la communauté internationale aux sciences et techniques de la lumière pour relever des défis tels que le développement durable, l'énergie et la santé des collectivités et pour améliorer la qualité de vie tant dans les pays développés que dans les pays en développement. L'ONU considère que les applications des sciences et techniques de la lumière sont capitales pour les progrès actuels et futurs dans des domaines tels que la médecine, l'énergie, l'information et les communications, les fibres optiques, l'agriculture, les industries extractives, l'astronomie, l'architecture, l'archéologie, le divertissement, l'art, la culture, etc.

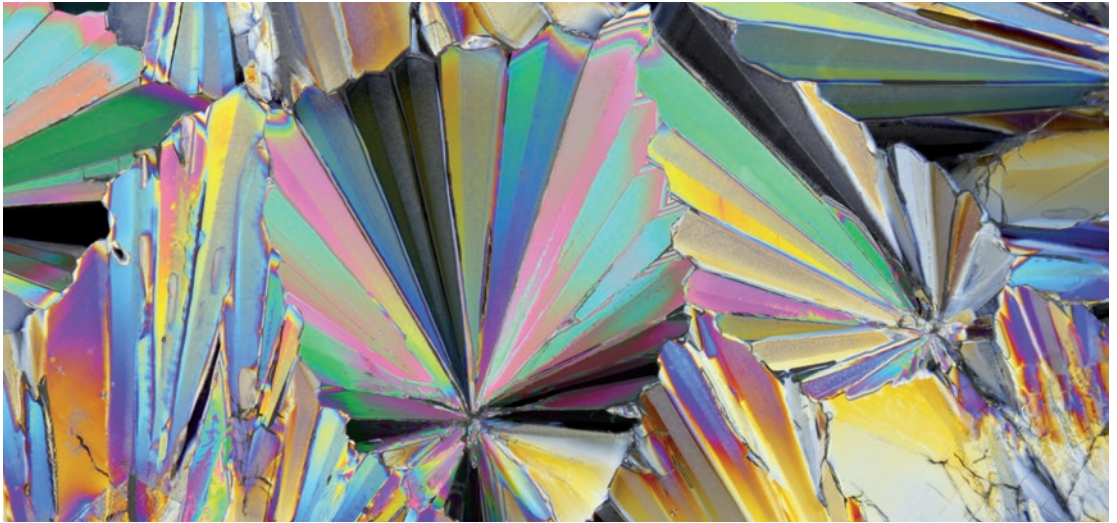
2015 commémore également de nombreux événements de l'histoire des sciences de la lumière, notamment les travaux sur l'optique d'Ibn Al-Haytham en 1015, la théorie ondulatoire de la lumière avancée par Fresnel en 1815, la théorie électromagnétique de la propagation de la lumière avancée par Maxwell en 1865, ou encore par exemple les travaux de Kao sur la transmission de la lumière dans les fibres pour la communication optique en 1965.



2015
ANNÉE DE LA LUMIÈRE
EN
FRANCE



La nature de la lumière



1 ▶ Observation microscopique en lumière polarisée de cristaux de sucre. © Buccaneer | Dreamstime.com

La lumière, un bain quotidien ! La lumière nous est familière et pourtant un peu étrange. Sa nature profonde a toujours été au cœur de débats passionnés.

D'une source de lumière à un observateur ou à un détecteur, la lumière voyage en ligne droite (image 2). De ce constat est née la représentation géométrique des trajets empruntés par la lumière : on trace des droites, qui sont les rayons lumineux.

Ainsi, tout objet qui absorbe ou réfléchit la lumière crée une ombre derrière lui. Bien comprise par les Grecs anciens, cette propriété avait permis à Eratosthène (vers 200 av. J.-C.) de mesurer la circonférence de la terre.

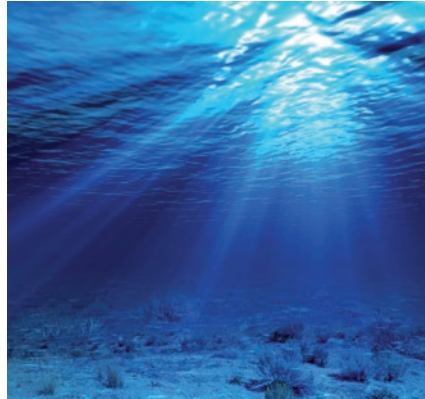


Cette représentation par des rayons est très fructueuse, elle a permis depuis Ibn al-Haytham (vers l'an mil) de décrire les propriétés de **réflexion** par des miroirs et de **réfraction**, c'est-à-dire de déviation de la lumière à l'interface entre deux milieux transparents différents (image 3). Snell et Descartes écriront plus tard (17^e siècle) la loi de la réfraction sous forme mathématique.

Aujourd'hui encore, la représentation géométrique des rayons lumineux est essentielle pour l'ingénierie des systèmes optiques : lunettes et lentilles de contact, appareil photos, caméras, télescopes...

Mais le modèle géométrique élude la question de la nature profonde de la lumière. Deux théories se sont affrontées dans l'histoire, la théorie corpusculaire et la théorie ondulatoire (→ p. 2), puis ces deux aspects apparemment contradictoires se sont entremêlés dans le cadre de la théorie quantique au 20^e siècle.

Grains d'énergie. La théorie corpusculaire est fondée sur l'existence de particules de lumière, qu'on identifiera au 20^e siècle à des grains d'énergie lumineuse, les photons. Ils voyagent tous à la **vitesse de la lumière**,



2 ▶ Observation naturelle de trajectoires rectilignes de la lumière.

© iStock.com/RomoloTavani

précisément 299 792,458 km par seconde dans le vide. Cette vitesse est une constante physique fondamentale. C'est aussi, d'après la théorie de la relativité restreinte élaborée par A. Einstein en 1905, une vitesse limite qui ne peut être dépassée. Par contre, dans un milieu matériel, les photons ont une vitesse plus faible : par exemple, environ 200 000 km par seconde dans les fibres optiques. Les différentes couleurs de la lumière sont associées à des photons d'énergies différentes. On peut aujourd'hui « voir » avec des détecteurs ultrasensibles les photons un par un !

>



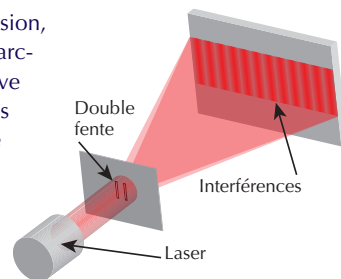
3 ▶ De gauche à droite, illustration des phénomènes de réflexion, de réfraction, et de dispersion de la lumière.

© iStock.com/bonzodog75, Daniel Hennequin et iStock.com/PeterHermesFurian

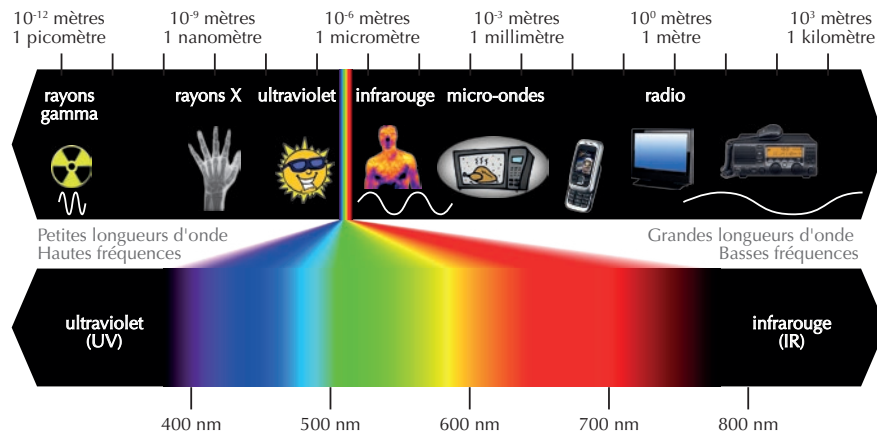
> **Onde électromagnétique.** La lumière est une onde ! C'est la propagation d'un champ électrique et d'un champ magnétique, aussi bien dans le vide que dans la matière, contrairement aux ondes mécaniques ou acoustiques qui ne voyagent pas dans le vide. C'est Maxwell (1865) qui a établi que la lumière fait partie de la grande famille des ondes électromagnétiques. Celles-ci se distinguent les unes des autres par leur longueur d'onde (la distance qui sépare deux oscillations successives de l'onde). Pour la lumière visible, celle que nos yeux perçoivent et qui correspond aux ondes les plus intenses émises par le soleil, elles s'étagent de 380 à 780 nm⁽¹⁾, du violet au rouge (image 5). La longueur d'onde varie comme l'inverse de l'énergie du photon. La description ondulatoire est très fructueuse. Elle permet d'expliquer la façon dont la lumière se propage dans tous les milieux matériels, homogènes ou non, isotropes ou non. On trouve par exemple que les différentes couleurs voyagent à des vitesses différentes,

c'est le phénomène de dispersion, qui est en partie à l'origine de l'arc-en-ciel (images 3 et 6). On trouve aussi que la lumière se répartit dans toutes les directions quand elle traverse un milieu inhomogène, et que cette diffusion dépend des différentes couleurs. Parmi toutes les couleurs de la lumière du soleil, le bleu est le plus diffusé par les molécules de l'atmosphère, ce qui explique le bleu du ciel ! Mais d'autres molécules plus grandes vont diffuser toutes les couleurs de la même manière, d'où le blanc des nuages, ou du lait par exemple.

La nature ondulatoire de la lumière est à l'origine de nombreux autres phénomènes. En premier lieu les interférences : la superposition de deux ondes lumineuses peut résulter en leur addition ou en leur soustraction, au point de mener à une extinction complète de la lumière, si elles sont identiques ! On parle d'interférences constructives ou destructives.



4 ▶ Les interférences sont à l'origine des couleurs irisées d'une bulle de savon. En haut, le dispositif des fentes de Young permet de mettre en évidence les interférences entre deux ondes de lumière.
© iStock.com/Jeff Kubina et Daniel Hennequin



(1) 1 nm
= 1 nanomètre
= 10⁻⁹ m
= 1 milliardième de mètre

5 ▶ Spectre des ondes électromagnétiques, depuis les ondes radio jusqu'aux rayons X. La lumière visible se décline en différentes couleurs (violet, bleu, vert, jaune, orange, rouge).
© Daniel Hennequin





6 ▶ L'arc-en-ciel apparaît quand les rayons lumineux du soleil sont réfractés, dispersés, et réfléchis par les gouttes d'eau en suspension dans l'atmosphère. Un phénomène subtil... et beau !

© iStock.com/Geribody

Ces interférences ne s'observent que dans quelques cas particuliers dans la vie de tous les jours (taches d'huile, couleurs des bulles de savon ou des ailes de certains papillons) avec les sources de lumière habituelles telles que le soleil ou les lampes (image 4 en bas), mais sont spectaculaires quand on utilise de la lumière dite cohérente (→ p. 11) comme la lumière laser (image 4 en haut).

Les interférences sont très utiles, car leur mesure renseigne de manière très précise sur les trajets effectués par la lumière.

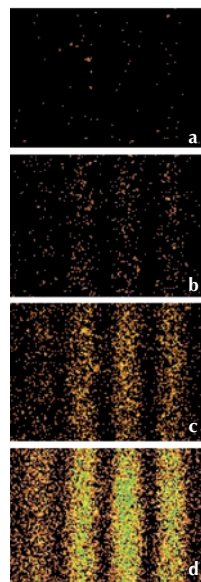
La **diffraction** est une autre manifestation de la nature ondulatoire de la lumière. À la frontière entre ombre et lumière, lorsqu'on y regarde de près, on voit des alternances de noir et de lumière. La lumière qui passe au bord d'un objet ne va pas simplement en ligne droite, mais est éparpillée dans toutes les directions : il s'agit là encore d'un phénomène d'interférences, et il s'observe donc mieux si la lumière est cohérente.

Enfin, la théorie ondulatoire rend compte des phénomènes liés à la **polarisation** de la lumière. La polarisation caractérise la direction dans laquelle oscille le champ électrique. Lorsque les ondes d'une source lumineuse ont toutes la même polarisation, on dit que

la lumière émise est polarisée. La lumière polarisée est utilisée dans de très nombreuses applications comme le cinéma 3D, les écrans à cristaux liquides (LCD), ou encore l'analyse structurale de la matière (image 1, p. 4).

Vision quantique. Aujourd'hui, la description de la lumière (et de la matière) s'est simplifiée : les photons possèdent certaines des propriétés d'une particule (on peut les compter) et d'autres d'une onde (ils peuvent interférer). Cette dualité étonnante, formalisée dans le cadre de la théorie quantique, est observée de façon spectaculaire dans des dispositifs d'interférences (image 7).

De cette dualité, et de la possibilité de manipuler aujourd'hui des photons uniques ou des paires de photons dits intriqués, est né le domaine de l'optique quantique. Les perspectives sont fascinantes : cryptographie inviolable, téléportation d'états de lumière, nouvelles méthodes de calcul basées sur les "Q-bits" plus efficaces que les méthodes binaires utilisées par les ordinateurs, etc. Une expérience récente utilisant des paires de photons intriqués réalise des images d'objets à partir de photons qui n'ont pas éclairé l'objet ! ♦



7 ▶ Construction de franges d'interférences photon par photon. En (a), les photons se présentent un par un, ce qui est typique d'un comportement corpusculaire. En (b), (c) et (d), l'accumulation d'un grand nombre de photons fait apparaître une figure d'interférences, preuve indiscutable de la nature ondulatoire de la lumière (Thèse V. Jacques 2007)

Une grande diversité de sources



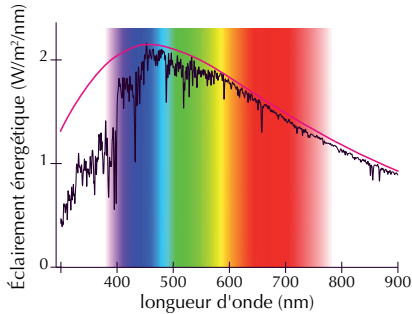
8 ▶ Méduse bioluminescente. © Tristan Nitot, licence Creative Commons

(2) LED : diodes électroluminescentes

D'où vient la lumière ? Comment est-elle produite ? Il y a les corps chauds qui rayonnent mais aussi des sources froides, qui émettent une lumière colorée comme pour les vers luisants, les LED⁽²⁾ ou le laser. Le mur blanc au soleil ou l'arbre sont aussi sources de lumière captée par notre œil. Explorons cette variété...



Sources chaudes, incandescentes



9 ▶ Spectre du soleil. La courbe rouge correspond au rayonnement d'un corps noir à 5777 K. © D. Hennequin

Le soleil est le premier producteur de lumière auquel on pense. La lumière qu'il émet et qui rythme la vie sur terre provient de la transformation de l'énergie dégagée par les réactions thermonucléaires qui se produisent en son sein. L'observation des arcs-en-ciel nous montre que cette lumière est composée de toutes les couleurs et que, de plus, cette répartition de couleurs, appelée spectre, est continue. Ce spectre se prolonge dans l'infrarouge (IR) et dans l'ultraviolet (UV), domaines non visibles par l'œil humain.

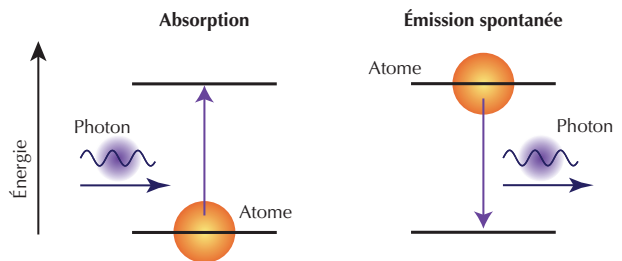
La lumière émise par le soleil à chaque couleur suit une courbe en cloche calculée

par Max Planck en 1900 (image 9). Elle est caractéristique des corps incandescents : soleil, étoile, mais aussi bougie ou ampoule à filament... Ces corps sont bien représentés par le modèle du corps noir, corps idéal dont le spectre de la lumière émise ne dépend que de sa température. Un objet à 25 °C émet dans l'infrarouge. Plus la source de lumière est chaude, plus son spectre se décale vers les courtes longueurs d'onde. Ainsi, à 700 °C, la lumière émise devient visible, rouge. À 2000 °C, le jaune vient s'ajouter au rouge, pour donner une couleur résultante orangée. À 5500 °C, la température de surface du soleil, le bleu et le vert sont venus s'ajouter aux autres couleurs, pour donner du blanc. C'est l'absorption et la diffusion par les molécules de l'atmosphère qui font que le soleil nous apparaît jaune en pleine journée et rouge le soir.

Sources froides, luminescentes

Toutes les sources productrices de lumière ne sont pas des corps chauds. Il existe un autre type de sources, appelées sources froides, les sources luminescentes. Leur lumière provient de la désexcitation des atomes qui les composent. En fonction du type d'énergie responsable de l'excitation de ces atomes, on parle d'électroluminescence, de chimiluminescence, de photoluminescence, etc.

L'énergie d'un atome ne peut prendre que des valeurs bien précises, qu'on appelle niveaux d'énergie. Un atome ne peut interagir qu'avec



10 ▶ Les interactions lumière-matière. © Daniel Hennequin

> de la lumière transportant une énergie égale à la différence entre deux de ces niveaux. En d'autres termes, un atome ne peut interagir qu'avec certaines longueurs d'onde. Ces interactions sont essentiellement de deux types : l'atome peut absorber un photon, et l'on dit alors que l'atome s'excite. Ou au contraire, un atome excité peut se désexciter en émettant un photon (image 10, p. 9). C'est ce deuxième processus qui est à l'origine des sources froides. Leur spectre est constitué de raies, chaque raie correspondant à la différence d'énergie entre deux niveaux. La couleur des raies est la signature de l'atome. Par exemple, une lampe à sodium émet sur deux raies situées dans le jaune orangé, produisant la lumière orangée de l'éclairage urbain. Les lampes au mercure, aussi utilisées dans l'éclairage public, émettent plusieurs raies dans le jaune, le vert, le bleu et le violet (image 11) : le résultat est une lumière blanchâtre.

Pour certains matériaux dits phosphorescents, après excitation par des UV, des désexcitations internes lentes retardent l'émission de lumière. C'est le cas des petites étoiles que l'on colle sur le plafond des chambres d'enfants, qui se chargent à la lumière du jour et réémettent après l'extinction des feux pendant une heure ou deux.

Dans le monde vivant, certains animaux comme la luciole ou des méduses émettent aussi de la lumière par bioluminescence (image 8, p. 8). Cette bioluminescence, qui résulte de réactions biochimiques, est utilisée par les animaux à des fins de camouflage sous forme de leurre, pour attirer les femelles ou repousser l'ennemi, pour communiquer aussi.



11 ▶ Les 5 principales raies spectrales du mercure.

Néons et LED

En éclairage, les tubes fluorescents à basse consommation remplacent aujourd'hui les ampoules à filament chaud. Ils ont un bien meilleur rendement et ne brûlent pas quand on les touche, mais sont plus délicats à recycler. Ces tubes, appelés abusivement néons, contiennent un gaz, en général du mercure, qui, excité, émet par électroluminescence de la lumière ultraviolette. Pour obtenir une lumière blanche, la paroi intérieure du tube est recouverte de poudres qui absorbent ces ultraviolets, puis réémettent par fluorescence un ensemble de couleurs dont le mélange apparaît à peu près blanc.

Mais l'avenir de l'éclairage est dans l'utilisation des LED (image 12). Ce dispositif opto-électronique émet de la lumière lorsqu'il est parcouru par un courant électrique. Il est de petite taille (le mm), son rendement est excellent et sa durée de vie de plusieurs années. Il éclaire en rouge, jaune, vert et maintenant bleu. La délicate fabrication des LED bleues a valu le



12 ▶ Diodes électroluminescentes. © iStock.com/kr7ysztof

prix Nobel de Physique 2014 à leurs inventeurs, car elle ouvre la voie à l'éclairage à LED : les LED bleues peuvent en effet exciter un revêtement en phosphore, comme dans les tubes fluorescents, et se transformer ainsi en LED blanches. On peut aussi combiner une LED bleue avec une rouge et une verte, pour le même résultat.

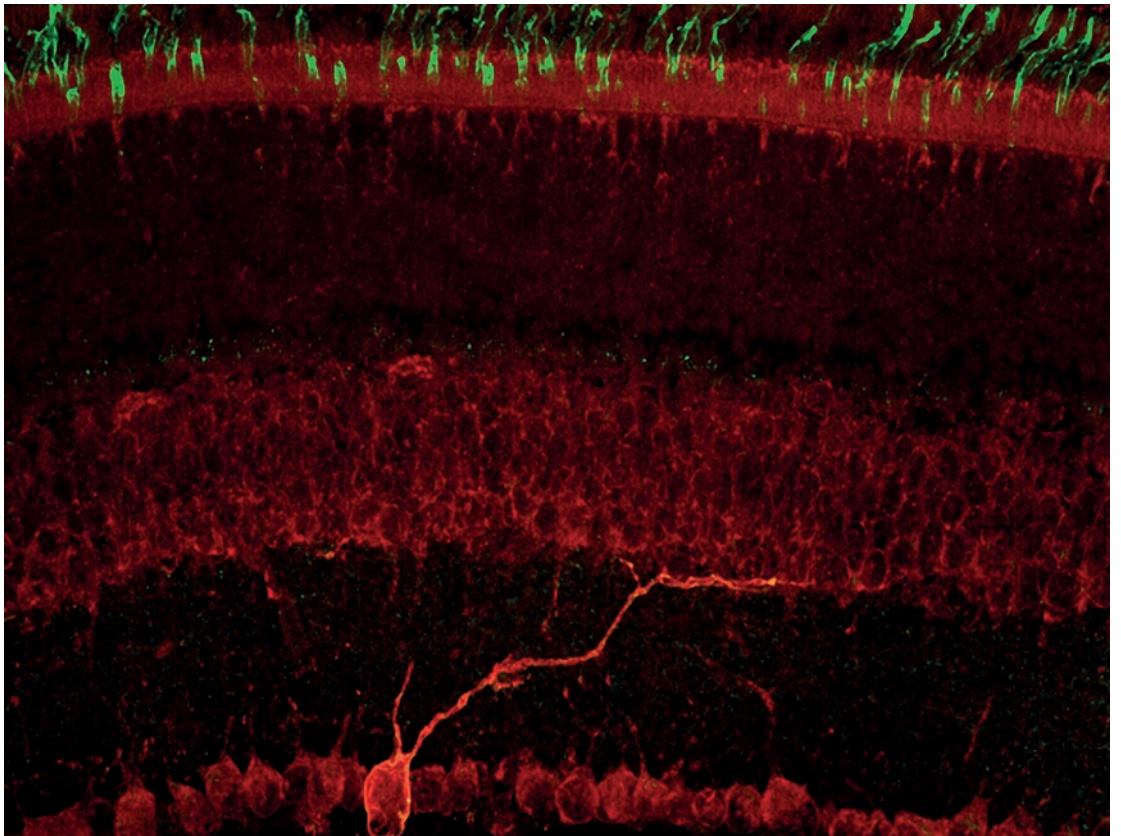
Une révolution : le laser

Pour compléter ce panorama, il faut citer le laser. En télécommunications, dans l'industrie, en médecine et en recherche, à la maison dans nos lecteurs CD, DVD ou Blu-ray, le laser, né en 1960, a révolutionné le monde technologique. Il est issu de la découverte par Einstein, en 1917, d'un troisième type d'interaction entre matière et lumière : un atome excité, qui reçoit un photon à la bonne énergie, se désexcite en émettant un photon identique à ce premier photon, amplifiant ainsi la lumière. En plaçant ces atomes entre deux miroirs, on crée l'effet laser, conduisant à l'émission d'une lumière aux propriétés très particulières. Cette lumière est dite cohérente. Elle est notamment monochromatique, c'est-à-dire constituée d'une seule couleur. Le faisceau de lumière est très directif, au point que si l'on envoie un faisceau d'un mètre de diamètre depuis la terre, il ne fait que quelques kilomètres de large en arrivant sur la lune. La lumière laser peut aussi être concentrée sur une toute petite tache, de l'ordre de la longueur d'onde (environ $1\ \mu\text{m}$), pour percer de l'acier par exemple. Elle peut également être produite sous forme d'impulsions très courtes et très puissantes, ce qui permet notamment de faire de l'usinage de précision (→ p. 25).

Sources secondaires

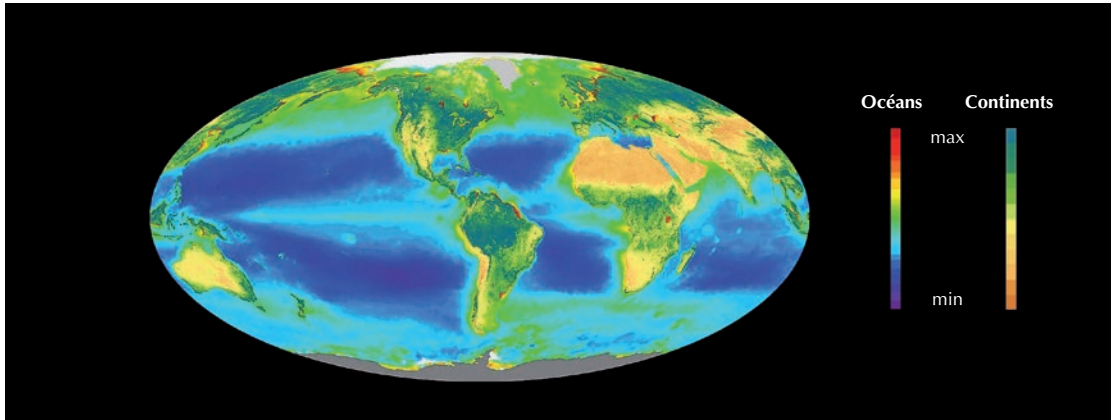
Toutes ces sources que l'on appelle primaires éclairent les êtres et les objets. Ceux-ci diffusent, renvoient vers nos yeux une partie colorée de la lumière et c'est pourquoi nous les voyons. Ces êtres et ces objets deviennent des sources qu'on appelle secondaires. Par exemple, lors de la pleine lune on y voit parfois presque comme en plein jour. Pourtant, la lune ne produit pas de lumière, elle renvoie juste, depuis sa partie éclairée, la lumière qui vient du soleil. C'est pourquoi, quand elle est à l'opposé du soleil, elle apparaît pleine la nuit et quand elle est du côté du soleil, elle a la forme d'un croissant, le matin ou le soir. ♦

La lumière et la vie



Voir légende de la figure 16, p. 15.

Aux origines de la vie



Que serait notre planète sans lumière ? Ni la vie que nous y connaissons ni l'air que nous respirons ne seraient les mêmes... Les plus anciennes traces de vie sur la terre sont des restes d'organismes monocellulaires primitifs qui avaient acquis la capacité d'utiliser l'énergie des photons pour survivre, croître et se multiplier. Dans la terre primitive, ils utilisaient la lumière et les nombreuses molécules soufrées présentes autour d'eux. Au fil de l'évolution, ces organismes photo-synthétiques ont acquis la capacité de vivre seulement de lumière, d'eau et de gaz carbonique, et ont transformé l'atmosphère terrestre en y consommant le gaz carbonique et en y apportant l'oxygène que nous respirons. Ce sont eux qui ont constitué au fil du temps, les immenses réserves de pétrole que nous brûlons aujourd'hui.

Lorsqu'un grain de lumière interagit avec par exemple la feuille d'un arbre, il est absorbé

par le pigment vert présent dans ces feuilles, la chlorophylle (image 13). En un temps très court (quelques dixièmes de milliardièmes de seconde), cette énergie va courir de chlorophylle en chlorophylle jusqu'à une chlorophylle particulière... Sur cette molécule, l'arrivée de cette énergie va induire la formation de charges électriques, qui permettront de synthétiser de nouvelles molécules, pour « nourrir » la plante.

Ainsi, chaque année, les plantes, les algues et les bactéries photosynthétiques assimilent une centaine de milliards de tonnes de gaz carbonique, et consomment pour cela une quantité d'énergie solaire plus de cinq fois supérieure à toute l'énergie que l'humanité utilise dans la même année... Cela permet à l'ensemble des êtres vivants de trouver leur nourriture, et de peupler de leurs couleurs, pour notre plus grand plaisir, l'ensemble des paysages de notre terre. ♦

13 ▶ Cette image montre la distribution de la chlorophylle à la surface du globe terrestre. Pour les océans, l'échelle de couleur indique la concentration de chlorophylle a (de 0 à 50 mg/m^3). Pour les continents, l'échelle indique la quantité de végétation présente. © NASA/Goddard Space Flight Center.

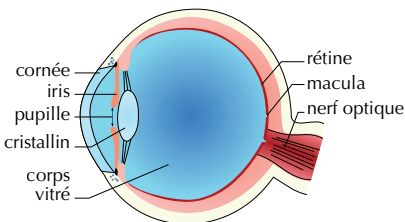
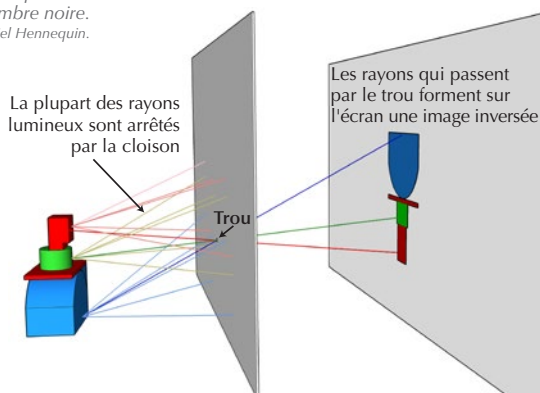
L'œil humain

La lumière joue un rôle évident dans la perception du monde. La perfection de notre système visuel tient dans sa capacité à voir tant au clair de lune qu'au soleil du désert. Lorsque ce sens majeur vient à disparaître dans différentes pathologies rétinienues, de nouvelles technologies peuvent compenser en partie la perte visuelle, voire redonner une vision « utile » à des patients aveugles. La lumière joue également un rôle majeur dans des fonctions non visuelles, comme le contrôle de l'humeur ou la régulation de nos cycles veille/sommeil.

Une chambre noire

L'œil est avant tout une chambre noire, c'est-à-dire un espace fermé dans lequel la lumière ne peut entrer que par un tout petit trou, la pupille. La lumière en provenance d'un objet, et qui passe par la pupille, forme

14 ▶ Principe de la chambre noire.
© Daniel Hennequin.



15 ▶ L'anatomie de l'œil humain.

© Daniel Hennequin, d'après commons.wikimedia.org/wiki/File:Schéma_œil_humain.svg

sur le fond de l'œil une image inversée de l'objet (image 14). Deux lentilles permettent d'ajuster la taille de cette image. La première lentille est la cornée, située à l'entrée de l'œil (image 15). La lumière, après l'avoir traversée, franchit la pupille puis est focalisée par une deuxième lentille, le cristallin. Des muscles permettent d'ajuster la focale de cette deuxième lentille, afin de toujours avoir une image nette au fond de l'œil, quelle que soit la distance de l'objet qui est regardé.

Les appareils photos et les caméras fonctionnent sur le même principe que l'œil : ils sont constitués d'une chambre noire dans laquelle la lumière ne peut entrer que par un petit trou, le diaphragme. Au fond de la chambre noire, l'écran est tapissé de capteurs, comme la rétine : c'était autrefois un film argentique, c'est maintenant un capteur CMOS. La taille de l'image et la mise au point sont réglées grâce à des lentilles, qu'on appelle les objectifs.

Vision naturelle

Dans notre rétine, la lumière est transformée en une activité électrique par deux types de photorécepteurs, les bâtonnets et les cônes. Les bâtonnets sont sensibles à de très faibles luminances (lumière des étoiles) et donc utiles pour la vision nocturne. Les cônes ne sont sensibles qu'à de plus fortes luminances (vision diurne) et se répartissent en trois classes différentes suivant leur sensibilité spectrale : les cônes dits bleus, verts ou rouges. Nous percevons donc les couleurs dès que la luminance est suffisante pour rendre opérationnels les photorécepteurs à cônes. Leur répartition est très particulière chez l'homme, avec une très grande densité dans la région maculaire ou centrale pour la vision de très grande acuité. La vision des couleurs s'explique par la présence de ces trois types de cônes, mais aussi par l'opposition des couleurs entre le vert et le rouge et entre le bleu et le jaune (combinaison du vert et du rouge) créée dans le réseau neuronal rétinien. Ce réseau neuronal augmente également les contrastes et effectue des calculs complexes pour détecter le mouvement des objets. L'œil peut donc être comparé à une caméra couplée à un calculateur. Outre l'optique de l'œil, le diaphragme pupillaire et la matrice de photorécepteurs de l'œil s'apparentent en effet à une caméra, alors que le réseau neuronal rétinien permet une analyse numérique des informations visuelles.

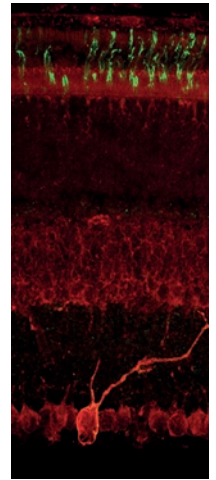
Fonction non visuelle

Depuis une dizaine d'années, la découverte de cellules ganglionnaires intrinsèquement sensibles à la lumière a permis de mieux

comprendre l'implication de la rétine dans les fonctions non visuelles de la lumière (image 16). Ces cellules ganglionnaires, directement connectées au cerveau, produisent un pigment visuel, la mélanopsine, qui leur permet de répondre à la lumière même si elles sont isolées des photorécepteurs. Elles contrôlent ou influencent des fonctions non visuelles comme la régulation des rythmes circadiens, l'humeur, le sommeil, voire la mémoire ou la cognition. La perte de cette régulation par la lumière des fonctions non visuelles pourrait entraîner des pathologies comme la dépression, des altérations de la santé mentale, voire d'autres troubles.

La vision artificielle

Les prothèses rétinienne proposent de réintroduire des informations visuelles dans le circuit rétinien résiduel après une dégénérescence des photorécepteurs. Ces prothèses peuvent être implantées soit à la place des photorécepteurs, soit à la surface de la rétine pour stimuler directement les cellules ganglionnaires connectées au cerveau. Elles délivrent des stimulations électriques par des électrodes pour activer les neurones rétiens résiduels. Après capture de l'information visuelle au moyen d'une caméra et son codage sous forme de stimulations électriques, les signaux sont acheminés, dans les implants actuels, par une connexion filaire avec un circuit électronique, ce qui rend la chirurgie complexe. De nouveaux dispositifs expérimentaux supprimeront ce lien physique avec l'extérieur de l'œil, améliorant ainsi la résolution. Ils devraient permettre aux patients de reconnaître des visages, retrouver une locomotion autonome et lire à nouveau des textes complexes. ♦



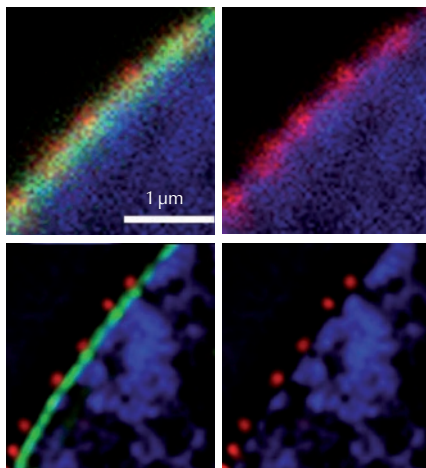
16 ▶ Extrait de l'image p. 12. Transmission de l'information lumineuse vers l'horloge biologique. Coupe de rétine de souris, montrant les cônes de la couche externe, en vert, et une cellule ganglionnaire à mélanopsine de grande taille, en rouge, dans la couche interne.
© Inserm/Cooper, Howard.

L'imagerie du vivant

Que s'est-il passé dans le domaine de la microscopie optique depuis l'époque de Louis Pasteur, souvent représenté à côté de son microscope ? Faisons un rapide tour d'horizon d'effets physiques ou biologiques qui ont bouleversé l'imagerie médicale, et qui étaient pourtant inconnus il y a à peine 20 ans.

Du micromètre au nanomètre : les progrès récents de la microscopie optique

17 ▶ Exemple d'images super résolues (en bas) comparées aux images de microscopie classique (en haut) : à l'aide de trois colorants on peut distinguer les pores (rouge) et la membrane (vert).

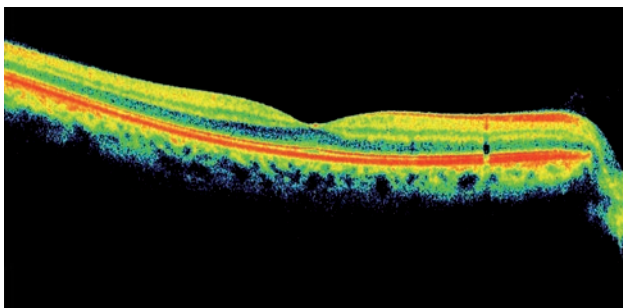


Les plus petits détails que l'on peut observer avec un microscope optique ont des tailles voisines de la longueur d'onde de la lumière (1 micromètre). Jusqu'à il y a peu, cette limitation de la résolution semblait un dogme car la limite était associée au phénomène de diffraction. Cependant les grains de poussière, illuminés par le soleil et que notre œil n'est pourtant pas capable de distinguer, peuvent être « localisés » dans l'espace. C'est ce type de localisation qui est à la base des méthodes dites de « super résolution » (image 17). En effet, une molécule unique qui émet de la lumière par fluorescence et dont on fait l'image sur une caméra, donne un *spot* dont le centre peut être déterminé avec une incertitude bien plus petite que sa taille.

Voir dans les tissus du corps humain

Après la nanoscopie, voici un autre défi que les scientifiques ont pu relever : peut-on utiliser l'imagerie optique pour « voir » à travers les tissus du corps humain ? Les tissus diffusent très fortement la lumière, ce qui empêche d'imager autre chose que leur surface. Pour éliminer cette diffusion et réaliser des « coupes virtuelles » dans la profondeur des tissus, la tomographie de cohérence (ou OCT pour Optical Coherence Tomography) fait appel au phénomène des interférences (→ p. 6). On fait interférer deux faisceaux de lumière, l'un modifié par la traversée de l'échantillon et l'autre servant de référence. La lumière résultante

contient donc des informations sur l'échantillon traversé. Mieux encore : on sait remonter, pour chaque information obtenue, à sa position dans l'échantillon avec une précision donnée par la longueur d'onde optique. On réalise ainsi une coupe virtuelle sans toucher aux tissus. Les applications de l'OCT pour la rétine en font une méthode standard (image 18). D'autres applications en dermatologie, cancérologie, gastrologie, etc., paraissent également prometteuses.

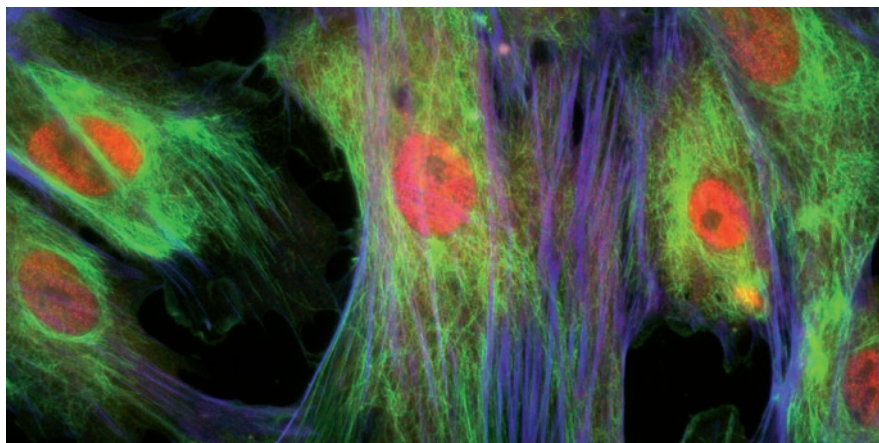


18 ▶ Vue par OCT de la rétine. On identifie en particulier très bien la dépression de la fovéa.
© Dr Jean-Michel Muratet, www.oct-optovue.com.

Les cellules deviennent des sources de lumière

La découverte d'une protéine fluorescente dans une méduse (image 8, p. 8) a bouleversé l'observation microscopique des cellules : grâce à la génétique, le gène responsable de la fluorescence peut être fusionné à celui d'une autre protéine, qui devient elle-même émettrice de lumière. On peut alors littéralement voir et donc étudier cette protéine dans son milieu naturel, c'est-à-dire la cellule vivante (image 19). La synthèse entre l'optique et la génétique est magnifiquement faite par l'optogénétique, en rendant certains neurones sensibles à la lumière. Le but ultime est de cartographier les réseaux neuronaux et de comprendre leur fonctionnement.

Ces quelques méthodes ont littéralement bouleversé l'imagerie optique appliquée au monde biomédical. Le jury Nobel 2014 ne s'y est pas trompé, en attribuant le prix de chimie aux inventeurs de la nanoscopie par fluorescence. ♦



19 ▶ Cellules vues par spectroscopie de fluorescence. L'actine (en bleu) et les microtubules (en vert) sont des constituants du cytosquelette de la cellule, dont le noyau apparaît en rouge. Les différentes couleurs sont obtenues par différentes protéines.
© Inserm/Saoudi, Yasmina

Soigner avec la lumière

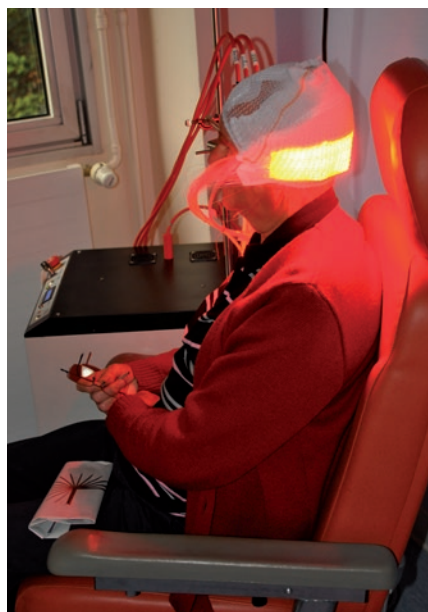
Le soleil

Le soleil est fondamental pour toute forme de vie terrestre et bien évidemment pour l'homme. Sa lumière rythme notre horloge interne et agit sur notre humeur. Ainsi, on peut soigner les personnes souffrant de dépression saisonnière ou d'insomnie avec des séances de luminothérapie, qui consistent à exposer les yeux à une lumière aux propriétés proches de la lumière solaire.

Il n'y a pas que la lumière visible émise par le soleil qui est importante pour l'homme : les UV jouent aussi un rôle essentiel. Par

exemple, les UVB stimulent la production de vitamine D. Les anciens Grecs et les Romains connaissaient déjà la vertu du soleil pour soigner : c'est l'héliothérapie, ou photothérapie UV, toujours utilisée aujourd'hui dans les services de dermatologie, en particulier pour traiter le psoriasis (image 20).

Pour réaliser ces traitements, on dispose de nombreux appareils à base de lampes ou de LED. Il faut cependant remarquer que certaines sociétés se servent de ces effets connus pour proposer des pseudo-traitements (par ex., la chromothérapie ou photobiomodulation), pour lesquels aucune étude sérieuse n'a pu démontrer la moindre efficacité.



Les lasers

Depuis leur invention, les lasers n'ont cessé de trouver de nouvelles applications en médecine et en chirurgie. Ils délivrent une lumière très intense et très localisée. En fonction de la puissance, de la longueur d'onde et de la durée d'émission, ils ont des effets très différents sur les tissus biologiques.

L'effet thermique résulte de l'augmentation locale de la température, ce qui peut induire par exemple la coagulation du sang. C'est cette photocoagulation qui est utilisée pour prévenir le décollement de la rétine, une des interventions thérapeutiques les plus pratiquées dans le monde. En dermatologie, l'effet thermique permet aussi d'enlever des tumeurs cutanées ou de traiter les taches de vin. On l'utilise également pour le traitement

20 ▶ Traitement par
photothérapie.

© Inserm/U1189 ONCO-THAI



21 ▶ Les interventions chirurgicales au laser sur l'œil sont entièrement automatisées.
© iStock/baranozdemir

des varices, comme une alternative à la chirurgie habituelle.

L'effet photoablatif consiste à induire la rupture d'un certain nombre de liaisons moléculaires. Cet effet est particulièrement utilisé en ophtalmologie, pour modifier la courbure de la cornée afin de corriger des myopies, des astigmatismes légers à modérés, ainsi que des petites hypermétropies (image 21).

L'effet photochimique est utilisé dans le traitement des cancers. On injecte dans l'organisme un produit chimique qui se fixe sélectivement sur les cellules cancéreuses. La lumière du laser, absorbée par ce produit chimique, active sa capacité à détruire les cellules sur lesquelles il s'est fixé. Cette technique très prometteuse, appelée thérapie photodynamique, est utilisée en urologie, en neurochirurgie et en dermatologie.

L'effet électromécanique est généralement obtenu avec des lasers délivrant des impulsions très courtes, de l'ordre tout au plus du milliardième de seconde. Pendant ce court

instant, la puissance du laser atteint des valeurs extrêmes, de plusieurs dizaines de millions de watts et même davantage. Il se crée alors à la surface du tissu visé un plasma d'électrons qui induit une onde de choc. Cette onde de choc, très localisée, est particulièrement destructrice : elle peut par exemple réduire en poussière les pigments d'un tatouage (image 22). Cette technique est donc utilisée en dermatologie, mais aussi en ophtalmologie.

Les applications thérapeutiques des lasers continuent de se développer, notamment grâce à leur miniaturisation. À la différence des premiers lasers médicaux, les lasers actuels sont peu encombrants, fiables, faciles d'utilisation et leur faisceau peut être, pour la plupart d'entre eux, injecté dans des fibres optiques. Ces dernières peuvent guider le faisceau laser à l'intérieur du corps, tout en ne nécessitant que de très petites incisions. Les lasers vont donc jouer un rôle de plus en plus important dans les procédures chirurgicales minimalement invasives, qui sont en plein essor. ♦



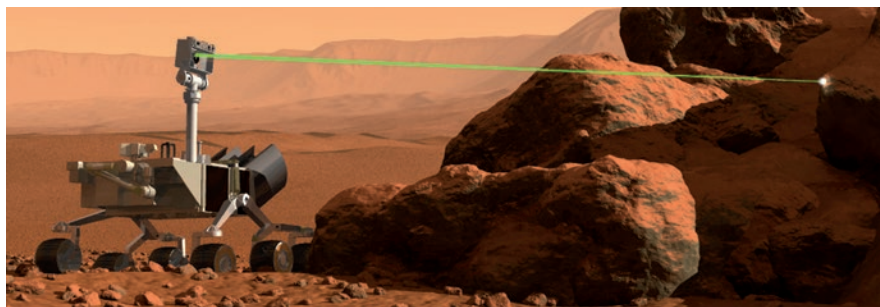
22 ▶ Exemple de détatouage effectué au laser.
© Serge Mordon, CHR de Lille

Technologies de la lumière

La lumière pour analyser la matière

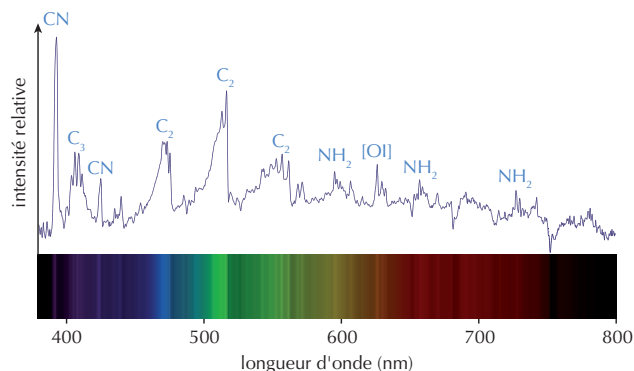
23 ▶ L'instrument ChemCam installé sur le Rover Curiosity nous permet de connaître la composition des roches martiennes.

© Jean-Luc Lacour 2004
(CEA et ChemCam team).



La spectroscopie sonde la matière en mesurant ses interactions avec la lumière. La réponse de chaque atome, chaque molécule, est unique (→ p. 10) : les instruments dédiés (les spectromètres) permettent de lire ces véritables empreintes digitales de la matière, qui sont des motifs complexes et délicats, non dénués de beauté. L'interprétation et la compréhension des agencements moléculaires au travers de ces spectres font appel à la mécanique quantique, et continuent de

fasciner les chercheurs. Dès 1826, l'astronome W. H. F. Talbot pressentait déjà que « le spectre d'une flamme peut montrer qu'elle contient des substances qui nécessiteraient, pour être découvertes, une fastidieuse analyse chimique » : cette affirmation scelle le destin de la spectroscopie, devenue incontournable quand il s'agit de découvrir la composition de la matière, et d'évaluer les proportions de chacun des éléments constitutifs.



24 ▶ Spectre de la lumière en provenance de la comète Lovejoy. En bas, le spectre tel qu'on l'obtient à la sortie d'un prisme. En haut, la transcription sous la forme d'un graphique, avec l'attribution de quelques raies à des molécules. D'après les données recueillies par Christian Buil (www.astrosurf.com/buil/comet/lovejoy/obs.htm).

Le développement de la spectroscopie s'est appuyé sur des techniques toujours plus ingénieuses, avec des spectromètres adaptés aux différentes longueurs d'onde, des nouvelles sources de lumière, et parfois des échantillons préparés de façon très élaborée. La spectroscopie a également permis de découvrir et d'identifier de très nombreuses molécules dans les nuages interstellaires, qui ne peuvent être sondés autrement, ou encore dans des astres comme les comètes (image 24).

La spectroscopie d'absorption, particulièrement dans l'infrarouge, est une technique classique dans les laboratoires de chimie : c'est une méthode non destructive et très pratique d'analyse moléculaire des échantillons liquides. La région de l'infrarouge moyen correspond à l'excitation des modes de vibration du squelette moléculaire, caractéristiques des liaisons chimiques. Les spectromètres d'absorption dans l'UV et l'infrarouge avertissent des rejets accidentels de gaz toxiques dans les usines, surveillent les fuites de méthane des gazoducs ou encore contrôlent au jour le jour la qualité de l'air. Les couches les plus élevées de l'atmosphère,

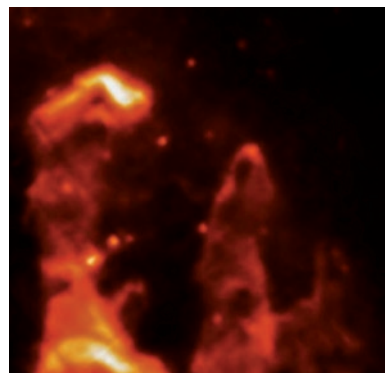
comme par exemple la couche d'ozone, sont analysées grâce à des spectromètres embarqués dans des ballons sondes ou par des lidars (l'équivalent optique des radars, utilisant des lasers).

Le laser : un atout majeur

Le laser a apporté une ampleur nouvelle à la spectroscopie. Sources de lumière monochromatiques et intenses, les lasers peuvent exciter une transition précise d'un matériau. L'émission de lumière qui en résulte peut être analysée avec une haute sensibilité : c'est ce qu'on appelle la spectroscopie de fluorescence, qui permet de détecter des traces infimes d'éléments chimiques présents avec des concentrations de l'ordre d'une partie par million. Le laser peut aussi servir à préparer l'échantillon : c'est le cas de la LIBS (acronyme anglais pour spectroscopie sur plasma induit par laser), qui consiste à focaliser une impulsion laser sur une surface pour produire un plasma de courte durée de vie. La lumière émise par le plasma est analysée par un spectromètre, ce qui permet d'en déduire les éléments constitutifs de la surface.

Cette technique peut être utilisée en laboratoire, mais aussi sur le terrain : c'est ainsi que l'instrument ChemCam installé sur le Rover Curiosity nous permet de connaître la composition des roches martiennes (image 23). Plus proche de nous, la police scientifique peut, grâce à cette technique, analyser directement sur la scène de crime les indices et, d'une façon générale, obtenir grâce à la spectroscopie des informations sur les indices tels que des fragments de verre, de la peinture, des poussières, des résidus d'explosifs, de l'encre... ! ♦

La lumière,
messagère
des cieux



1	2
	3
	4
	5

25 ▶ Différentes vues de la nébuleuse de l'Aigle, située dans la constellation du Serpent.

(1) Vue générale superposant l'infrarouge lointain et les rayons X. Le carré indique l'emplacement des colonnes de poussières interstellaires appelées les Piliers de la Création, illustrés sur les images 2 à 5.

(2) La photographie des Piliers de la Création en lumière visible est l'une des plus célèbres images prises par le télescope Hubble. Elle permet de voir notamment les étoiles et les poussières.

(3) L'infrarouge proche permet de voir à travers les poussières, et d'obtenir par exemple des informations sur les étoiles en formation dans cette région du ciel.

(4) Les rayons X émis par la nébuleuse, superposés sur une vue en lumière visible, fait apparaître encore plus nettement les jeunes étoiles, principales sources de rayons X.

(5) Enfin, la vue en infrarouge moyen a conduit les astronomes à penser que l'une des étoiles chaudes de la nébuleuse pourrait avoir explosé en supernova il y a 6000 ans. Mais à cause de la distance, nous ne la verrons que dans plusieurs centaines d'années.

© (1) ESA/Herschel/PACS/SPIRE/Hill, Motte, HOBYS Key Programme Consortium et ESA/XMM-Newton/EPIC/XMM-Newton-SOC/Boulanger ; (2) NASA, ESA, and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA); (3) VLT/ISAAC/McCaughrean & Andersen/AIP/ESO ; (4) NASA/CXC/U.Colorado/Linsky et al. et NASA/ESA/STScI/ASU/J. Hester & P.Scowen ; (5) ESA/ISO/Pilbratt et al.

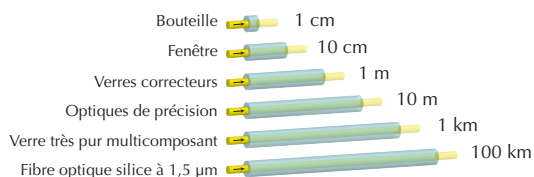
Pendant des millénaires l'humanité n'a pu observer le ciel qu'à l'œil nu. En 1610, Galilée braque sa lunette vers le ciel et ouvre l'ère de l'observation instrumentée. Il découvre les montagnes lunaires, les phases de Vénus et quatre satellites de Jupiter. L'invention du spectroscopie, au tout début du 18^e siècle, fut aussi une révolution car, pour la première fois, il était possible de faire de la physique des astres en analysant leur lumière (→ p. 20). Moins d'un siècle plus tard, l'invention de la photographie permettait de garder une trace des objets célestes, notamment de ceux trop peu lumineux pour être vus à l'œil nu. Cela ouvrait la voie au dénombrement, à la comparaison et à la classification des astres.

L'extension des capacités de l'œil humain s'est poursuivie avec l'invention des détecteurs électroniques, certains étant capables de capter le rayonnement émis en dehors du spectre visible. C'est ainsi que, depuis le milieu du 20^e siècle, on observe le ciel dans toutes les longueurs d'ondes, révélant ainsi un monde inconnu. Par exemple, les étoiles très chaudes émettent essentiellement des ultraviolets tandis que les grands nuages interstellaires, dont la température est de quelques dizaines de kelvins, brillent essentiellement en infrarouge. C'est en ayant accès à ces fenêtres spectrales que l'on a pu reconstituer l'évolution des étoiles, de leur formation à leur destin ultime. L'observation à plusieurs longueurs d'onde permet aussi la découverte d'objets célestes nouveaux, comme les étoiles binaires X, les pulsars ou les sursauts gammas. Pour cela, il fallut s'affranchir du filtre atmosphérique qui limite notre vision du cosmos : bien que transparente à la lumière visible, l'atmosphère terrestre absorbe l'infrarouge (à cause notamment de la vapeur d'eau), les ultraviolets et les rayons X (à cause de la couche d'ozone, située vers 30 kilomètres d'altitude). Ballons, fusées et satellites furent donc aussi indispensables pour permettre à l'astrophysique d'investir pleinement son champ d'étude. Aujourd'hui, tous les domaines de longueurs d'onde sont exploités en permanence, au sol ou dans l'espace (image 25). Complétée par la détection des particules cosmiques, la lumière n'est plus l'unique moyen de regarder le ciel mais reste toujours essentielle pour comprendre les mécanismes physiques à l'œuvre dans le cosmos. ♦

Télécommunications :

domaine privilégié de la fibre optique

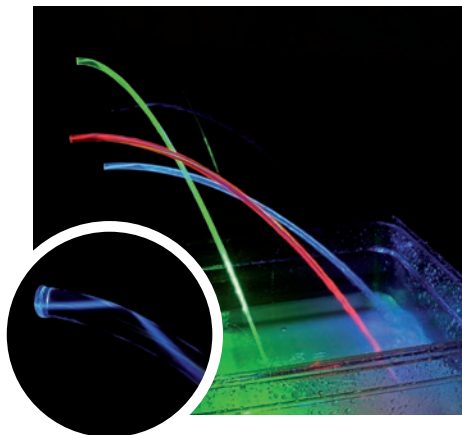
Type de verre 99 % de l'énergie est perdue après :



26 ▶ Propagation de la lumière dans le verre.
© Daniel Hennequin

27 ▶ Dans cette fontaine, les faisceaux laser sont injectés en haut des jets d'eau (gros plan dans l'insert). La lumière se réfléchit à l'intérieur du jet d'eau, comme elle le fait au sein d'une fibre optique.

© Sébastien Forget, LPL
(Université Paris 13 et CNRS)



Chaque minute, plus d'une centaine d'heures de vidéo postées sur You Tube, plus de 700 000 recherches sur Google, près de 200 millions de courriels expédiés, explosion de l'informatique en nuage (*cloud*), déploiement des centres de données, arrivée de l'Internet des objets connectés... c'est notre nouvel environnement « Télécommunications ». Comment est-ce possible ?

La lumière voyage à travers le verre ! De fait, toute la circulation de ces informations – sous forme d'éléments binaires 0 ou 1 – est rendue possible car elles sont transportées par des photons qui voyagent à travers le verre. Mais pas n'importe quel verre ! Pour que la lumière soit transportée le plus loin possible, on utilise une fibre optique en silice, c'est-à-dire en verre ultra-pur (image 26). Et pas n'importe comment ! Cette fibre optique est construite avec deux éléments clés : le cœur d'environ 9 microns (millionnièmes de mètre) enserré dans une gaine de 125 microns dont la composition est légèrement différente. Ainsi la lumière voyagera dans le cœur en « rebondissant » sur la gaine (image 27) selon les lois édictées par René Descartes dans *La dioptrique*, en 1637 ! Mais, les télécoms par fibres optiques ne datent que de 1970...

Merci messieurs Maiman et Kao. C'est cette année-là et grâce à la conjonction de deux inventions critiques que sont nées les télécommunications modernes. Tout d'abord, merci à Théodore Maiman pour son invention du laser et aux chercheurs des laboratoires Bell qui ont réalisé le laser à semi-conducteur fonctionnant en régime continu à température ambiante. Merci, ensuite, à Charles Kuen Kao à qui on doit l'usage de la fibre optique comme moyen de transmission. Depuis, les améliorations n'ont cessé et, aujourd'hui, une fibre optique transporte une dizaine de Térabits par seconde, soit dix mille milliards d'informations binaires – 0 ou 1 – en une seule seconde. Pour le grand public, cela se concrétise par l'arrivée de la fibre jusqu'à son habitat via l'application FTTH (*fiber to the home*) apte à supporter les nouveaux formats de télévision dits 4k en attendant, pour 2022, les téléviseurs 16k ! ♦

Les photons et l'industrie

Qu'elle soit incohérente ou générée par un laser, la lumière est omniprésente dans l'industrie. Pour beaucoup, les applications industrielles sont principalement synonymes de découpe, soudure, perçage et marquage par laser (image 28). Mais la lumière est largement utilisée dans le contrôle et l'instrumentation (mesure, alignement, comptage, codage, caractérisation de matériaux, de qualité de surface...) en employant un large éventail de techniques comme la spectroscopie ou le traitement d'image. Elle est aussi indispensable dans le domaine du semi-conducteur (et donc de l'électronique et de l'informatique) avec la photolithographie, la recristallisation de surface ou la photopolymérisation. De nouvelles applications comme la microstructuration de surfaces permettent des débouchés dans le domaine du luxe ou des cellules solaires.

Longueurs d'onde et durées d'impulsion : optimisation des interactions matière-lumière.

Les premiers lasers CO_2 ont très vite été utilisés dans l'industrie pour l'usinage du métal : découpe, soudure, perçage. Les lasers à solide (Nd:YAG) et à excimère ont permis une plus grande variété d'applications, grâce à d'autres longueurs d'onde et à des modes d'émission impulsionsnelle. En effet, comme dans toute interaction lumière-matière, l'efficacité du procédé industriel dépend fortement du spectre d'absorption du matériau et du contrôle des phénomènes thermiques. La course à la productivité a contraint les fabricants à proposer des lasers de plus en plus puissants dans les limites des technologies utilisées. À la fin des années 90, ces limites étaient quasiment atteintes, les lasers étaient encore chers, encombrants et peu efficaces.

La révolution des diodes. Les efforts d'innovation technologique très importants portés par le marché des télécommunications ont permis de produire des diodes lasers mono-émetteur fibrées à très faible prix et avec une très longue durée de vie. Associées aux fibres dopées, aux nouveaux composants fibrés (isolateurs, modulateurs), elles ont permis la mise sur le marché de nouvelles générations de lasers industriels.

En combinant par centaines diodes et fibres, des lasers infrarouges de plusieurs kilowatts ont vu le jour ; d'un faible coût, dotés d'un haut rendement, compacts, facilement adaptables sur des robots multiaxes, ils ont vite rencontré le succès.

En les utilisant comme pompe d'oscillateurs impulsionsnels et de fibres amplificatrices, combinés avec les effets de l'optique non linéaire, de nouveaux lasers, émettant dans l'infrarouge, le visible ou l'ultraviolet, avec des impulsions nanoseconde ou femtoseconde⁽³⁾ ont permis le développement d'une nouvelle classe d'applications industrielles de haute précision : micro-usinage, marquage, structuration de surface (images 29 et 30). ♦



28 ▶ Les lasers dans l'usinage : soudage d'un profilé métallique.
© Istock.com/Fertrig et IREPA LASER.



29 ▶ Les lasers permettent l'usinage de précision, comme pour ces endoprothèses destinées à consolider des artères endommagées. La pièce donne l'échelle.
© Amplitude Systems

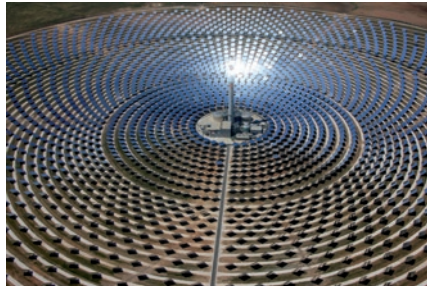


30 ▶ Structuration de surface par laser.
© Laser Cheval.

(3) $1 \text{ fs} = 1 \text{ femtoseconde} = 10^{-15} \text{ s.}$
 $= 1 \text{ millionième de milliardième de seconde.}$

La lumière du soleil, source d'énergie

31 ▶ La centrale solaire thermique à concentration de Gemasolar, propriété de Torresol Energy, est située en Andalousie. Elle couvre 195 hectares, comporte 2650 héliostats qui concentrent le rayonnement au sommet d'une tour de 140 m de haut, fournissant une puissance de près de 20 MW. © SENER.



L'énergie solaire arrive en abondance sur la terre. L'essentiel va au fonctionnement de la machine climatique, tandis qu'une petite fraction sert à la photosynthèse (→ p. 13) et de là entretient la vie sur notre planète (image 32). L'énergie produite sur terre par l'humanité pourrait en théorie provenir en totalité d'un modeste prélèvement sur le flux lumineux incident. Encore faut-il convertir la lumière solaire en une source d'énergie exploitable. Un premier procédé convertit simplement

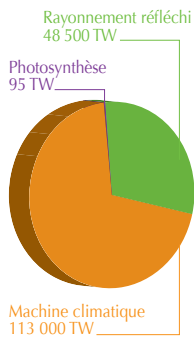
l'énergie solaire en chauffage, comme par exemple dans les chauffe-eau solaires.

Mais les installations plus ambitieuses visent plutôt à produire de l'électricité : c'est le cas des centrales solaires à concentration et des centrales photovoltaïques. Les premières fonctionnent essentiellement comme les centrales thermiques habituelles, où de la vapeur d'eau sous pression fait tourner les turbines qui produisent l'électricité. La vapeur est obtenue en concentrant la lumière solaire, à l'aide de nombreux miroirs, sur une chaudière (image 31).

Dans les centrales photovoltaïques (image 33), la lumière est convertie directement en électricité, grâce à un processus qui permet, lors de l'absorption d'un photon dans un semi-conducteur, de transmettre directement son énergie à des charges électriques. Ces centrales sont formées d'un très grand nombre de panneaux photovoltaïques, mais ces derniers peuvent être utilisés individuellement, sur le toit d'une maison par exemple.

Énergie sans émission de gaz à effet de serre ni d'autres pollutions (en phase d'exploitation), le solaire, à concentration ou photovoltaïque, est dilué : c'est sans inconvénient pour des usages décentralisés, mais pour satisfaire la demande d'électricité d'un pays comme la France, il faudrait 5000 km² de panneaux solaires, soit la superficie d'un département ou la surface cumulée de toutes les toitures de l'hexagone. Une exploitation raisonnée nécessite sans doute l'installation de panneaux photovoltaïques ou de concentrateurs dans des régions peu peuplées mais ensoleillées, complétée des lignes de transport haute tension à faibles pertes vers les régions consommatrices.

De plus, le solaire est une source d'énergie intermittente, à cause de l'alternance jour nuit, de la succession des saisons, mais aussi du passage des nuages. Il est donc indispensable de mettre en place des moyens de stockage d'énergie à l'échelle des quantités en jeu.



32 ▶ Répartition des 162 000 TW de rayonnement solaire incident reçu chaque année par la terre. En comparaison, l'énergie produite par l'homme est de 18 TW (données 2012). 1 TW = 10¹² watts = mille milliards de watts. © D. Hennequin



33 ▶ Le plus grand parc solaire de France, situé à La Colle des Mées, dans les Alpes de Haute Provence, est constitué de 113 000 panneaux photovoltaïques répartis sur 200 hectares. Quand l'ensoleillement est optimal, il est capable de fournir une puissance de 100 MW. En comparaison, les centrales thermiques construites dans les années 1970 fournissent, quand elles sont en service, 250 MW en continu. © Matthieu Colin

Par exemple, la centrale solaire Gemasolar, en Andalousie, est couplée à un système de stockage de la chaleur dans des sels fondus qui lui permet de produire de l'électricité 24 h sur 24 en été (image 31).

Afin de rendre cette source d'énergie compétitive dans l'avenir, des avancées technologiques sont encore nécessaires, mais la recherche dans ce secteur est très prometteuse, notamment avec le développement des panneaux photovoltaïques organiques, ou encore des cellules solaires à pigment photosensible, inspirées de la photosynthèse. ♦

La lumière et ses applications



Sur le web

- Le site officiel de l'année de la lumière en France : www.lumiere2015.fr
- Retrouver la version numérique de ce fascicule, enrichie de nombreuses fiches supplémentaires : <http://lumiere.sfpnet.fr>
- Une vingtaine de vidéos courtes pour en savoir plus sur divers aspects de la lumière : <http://kezako.unisciel.fr/2015-annee-internationale-de-la-lumiere/>

Les livres

- Une histoire de la lumière – De Platon au photon, de Bernard Maitte (*Seuil* 2015)
- Lumières du futur, de Libero Zuppiroli et Daniel Schlaepfer (*Presses polytechniques et universitaires romandes*, 2011).
- Sous la lumière, les hommes, de Riad Haidar (*EDP Sciences*, 2014)
- Des observations, des expériences pour comprendre le soleil dans la vie quotidienne, de Jeannine Bruneaux et Jean Matricon (*Ellipses* 2012)
- Le petit livre des couleurs, de Michel Pastoureau et Dominique Simmonet (*Points* 2014)

Pour les plus jeunes

- La nuit, de Stéphanie Ledu et Robert Barborini, à partir de 3 ans (*Milan* 2014)
- Le son, la lumière, l'électricité, les aimants en 38 expériences, de Philippe Nessmann et Peter Allen, à partir de 5 ans (*Mango Jeunesse* 2011)
- La lumière et le son – 10 expériences expliquées pas à pas, de Chris Oxlade et John Farndon, à partir de 8 ans (*Piccolia* 2012)

Ces suggestions de lecture sont tirées du catalogue 2015 d'ouvrages de vulgarisation sur la lumière, de l'Association Science, Technologie et Société Nord – Pas de Calais, et du Forum départemental des Sciences. Le catalogue peut être consulté et téléchargé librement sur : www.sciences-metisses.org/cariboost_files/catalogue_202015.pdf.



Le laboratoire d'excellence CaPPA – Physique et Chimie de l'environnement atmosphérique – regroupe 7 laboratoires de recherche en région Nord – Pas de Calais. Le projet s'intéresse d'une part aux aérosols et à leurs précurseurs pour mieux appréhender leur rôle sur le forçage climatique et le cycle hydrologique, d'autre part à l'évolution de la qualité de l'air à différentes échelles.

labex-cappa.fr

L'UFR de Physique de l'Université de Lille, grâce à un environnement de recherche remarquable, auquel participent largement les entités ci-contre, offre une large palette de formations réputées pour leur excellence, conduisant à de multiples débouchés dans des secteurs d'avenir, et offrant un taux d'insertion professionnelle parmi les plus élevés de France. Les étudiants de l'UFR de Physique sont formés pour maîtriser et initier les toutes dernières découvertes scientifiques : ils se destinent non seulement à la recherche et à l'enseignement supérieur, mais surtout à des emplois dans les entreprises innovantes, par exemple dans les domaines des énergies renouvelables, des télécommunications, de la santé, de l'aéronautique ou des transports.

physique.univ-lille1.fr

Le CERLA – Centre d'Études et de Recherche Lasers et Applications – est une plate-forme interdisciplinaire scientifique et technologique de l'Université dédiée aux applications optique et laser.

cerla.univ-lille1.fr

**Ce fascicule
a été réalisé
grâce au soutien
financier
d'établissements
de recherche
et de formation
de la région Nord
– Pas de Calais :
les laboratoires
d'excellence
CaPPA et CEMPI,
le CERLA,
le laboratoire
PhLAM et l'UFR
de Physique
de l'Université
de Lille.**

Le laboratoire d'excellence CEMPI – Centre Européen pour les Mathématiques, la Physique et leurs interactions – s'intéresse à des questions à la charnière entre ces deux disciplines, mais aussi en contact avec la biologie et l'informatique théorique. Ses activités vont des mathématiques pures et appliquées jusqu'à la technologie des fibres optiques, en passant par l'étude des dynamiques complexes dans les systèmes atomiques et optiques.

math.univ-lille1.fr/~cempi/

Le laboratoire PhLAM – Physique des Lasers, Atomes et Molécules – participe aux deux labex CaPPA et CEMPI, et est membre du CERLA. Ses activités couvrent la recherche fondamentale et ses applications dans les domaines de la spectroscopie moléculaire, la physico-chimie moléculaire, la photonique, la dynamique non linéaire de systèmes optiques et biologiques, et la physique des atomes refroidis par laser.

phlam.univ-lille1.fr

