

The background of the entire page is an abstract pattern of concentric, multi-colored lines. These lines are composed of many thin, parallel bands of color, including red, orange, yellow, green, blue, and purple, which create a vibrant, rainbow-like effect. The lines are arranged in a way that they appear to radiate from a central point, giving the impression of light waves or a stylized sunburst. The overall effect is dynamic and visually striking.

Eclats de Lumières

Lumière en balade

Eclats de Lumières

Lumière en balade



Photo de couverture © Michel Marcelin

Préface

L'ONU et l'UNESCO ont proclamé 2015 « Année internationale de la lumière et des techniques utilisant la lumière ».

L'année 2015 commémore de nombreux événements dans l'histoire de la science de la lumière. Par exemple, la théorie ondulatoire de la lumière de Fresnel en 1815 et la relativité générale d'Einstein en 1915 et son lien entre la gravitation et la lumière.

Au-delà de l'aspect scientifique, cette initiative internationale vise à sensibiliser tous les citoyens sur l'impact de la lumière dans toutes les dimensions de la vie : technologies, éducation, santé, énergie et développement durable.

L'exposition « Lumière en balade » a été réalisée dans le cadre d'un projet collaboratif et pluridisciplinaire, « **Éclats de lumière** », qui rassemble des laboratoires de recherche de la région PACA.

Vous trouverez dans ce catalogue une grande partie de l'exposition « Lumière en balade ». Les expériences présentes lors du parcours sont aussi décrites de façon à donner une représentation quasi-intégrale de son contenu pédagogique. L'exposition, elle, est souvent agrémentée de l'exposition « Lumière en images » produite par le même collectif ainsi que par une exposition d'ambrotypes et de photogrammes par nos artistes associés : Matthieu Parent et Jocelyn Monnoyer.

Ce catalogue a été réalisé à l'occasion d'un partenariat avec la Fondation Vasarely pour un projet pédagogique impliquant plusieurs lycées de la région et financé par le Conseil Régional Provence-Alpes-Côte d'Azur et la Délégation Régionale à la Recherche et à la Technologie.



Sommaire

Préface	3
Sommaire	4
Pôle 1 : Définir la lumière	7
Le spectre de la lumière	8
La lumière a une vitesse !	10
Onde et corpuscule	11
Lumière et architecture	14
Lumière et peinture	15
Un siècle de lumière	16
Le Siècle des lumières	17
Pôle 2 : Émettre et évoquer	19
Émettre un photon visible	20
Caractéristiques des sources	21
La physique des sources	22
Les lumières du ciel	24
Sources artificielles	25
Nouvelles sources artificielles	26
Sources de rayons X	28
Les lumières du vivant	29
Évoquer la lumière en peinture	30
La lumière dans les ex-voto	31
Pôle 3 : Transporter et transmettre	33
Optique géométrique	34
Courber les rayons lumineux	36
Optique ondulatoire	38
La diffraction de la lumière	39
La polarisation de la lumière	40
Percevoir la couleur	42
Numériser la couleur	43
Du blanc à la couleur	44
Lumière et architecture	46
L'idée de la lumière en peinture	47
Pôle 4 : Capturer et appréhender	49
Capter et détecter des photons	50
Composer des images	52
Droit dans les yeux	54
Du soleil pour la vie	57
Pôle 5 : Utiliser et maîtriser	59
Le Soleil, source d'énergie	60
Passer aux rayons X	62
L'imagerie médicale	63
Lunettes et télescopes	64
Le microscope	65
Lumières sur la ville	66
Lumière, outil de mesure	68
Les lumières du peintre	69

Pôle 6 : Dompter et jouer	71
La photographie	72
Photographies à l'ancienne	73
Principe de l'holographie	74
Applications de l'holographie	75
Faire des ombres	76
Les ombres en architecture	78
Lumière, art, Op art	79
 Pôle 7 : Comprendre et analyser	 81
La théorie de la lumière	82
Des rayons X pour comprendre	88
Lumière sur l'Univers	90
La lumière des astres	91
 Annexes	 92

Planck

$$E = h\nu$$

Maxwell

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

$$p = \frac{E}{c}$$

Einstein

De Broglie

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Pôle 1 : Définir la lumière

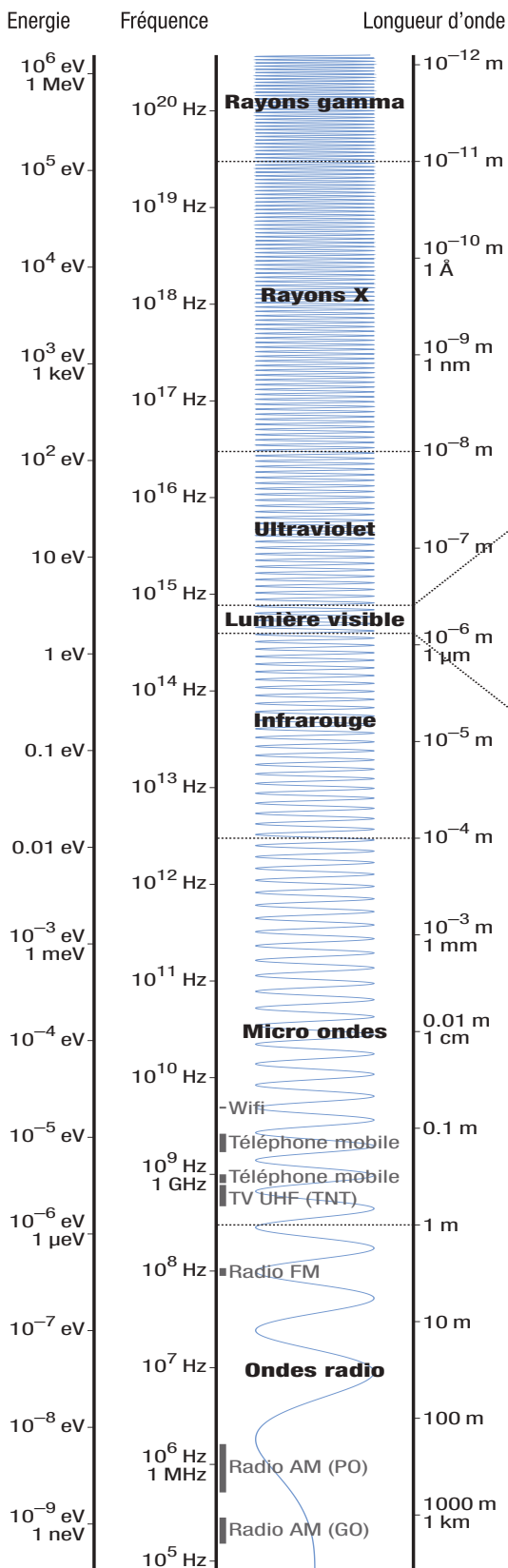
Ce pôle, que le public consulte avant les autres, se donne pour ambition de définir la lumière selon les différentes approches interdisciplinaires de l'exposition : science, art, architecture, littérature, philosophie...

Les thèmes développés donnent au public une base solide pour comprendre et profiter du discours du reste de l'exposition : la physique de la lumière (aspect ondulatoire et corpusculaire, vitesse de la lumière, spectre électromagnétique...), le rendu et l'utilisation de la lumière dans les arts plastiques, les enjeux et le cheminement des lumières naturelle et artificielle en architecture, le siècle des Lumières en philosophie...

Le spectre de la lumière

Les couleurs de l'arc-en-ciel ne constituent qu'une partie infime du spectre électromagnétique.

Pour le physicien, la lumière n'a donc pas de limite vers les petites et les grandes longueurs d'onde. La formule $E=h\nu$ associe à une fréquence ν l'énergie des photons correspondants, où h est la constante de Planck.



Les **rayons gamma** sont dans la partie la plus énergétique du spectre, et sont de ce fait très dangereux. Ils sont essentiellement produits par des réactions nucléaires de désintégration de noyaux.

Les **rayons X** sont très pénétrants et dangereux à haute dose. Ils sont utilisés en imagerie médicale, pour la surveillance dans les aéroports et pour l'étude de la structure de la matière.

La **lumière ultraviolette - UV**, appelée aussi « lumière noire », est nocive pour la santé à haute dose. L'ozone de l'atmosphère nous protège des UV. Cette lumière est aussi responsable du bronzage...

Notre œil ne perçoit que la partie du spectre dont les longueurs d'onde sont comprises entre 390 nm et 780 nm. Chaque longueur d'onde correspond à une couleur de l'arc-en-ciel.

1 nm = 1 nanomètre = 0,000 000 001 mètre

À température ambiante, les objets de la vie courante émettent essentiellement de la **lumière infrarouge**. Les infrarouges sont utilisés dans nos télécommandes domestiques et la télécommunication par fibres optiques.

Les **micro-ondes** - 1 mm à 1 m environ - sont au cœur de nos fours domestiques, de nos téléphones mobiles, des réseaux sans fils locaux (WiFi, Bluetooth), des radars.

Les **ondes radio** - au delà du mètre - servent à transmettre paroles et images, via nos « postes de radio » et la télévision. La portée des ondes radios augmente avec leur longueur d'onde.



Manipulations

Infrarouge : l'homme, source de lumière

Écran géant en rétro-éclairage renvoyant l'image d'une caméra infrarouge : quand une personne entre dans l'exposition, elle voit l'image infrarouge qu'elle émet. Cette première interpellation appelle au questionnement de toute l'exposition :

Qu'est-ce que la lumière ?
Quelle en est la perception pour l'homme ?
Sommes-nous sources de lumière ?
Sommes-nous sensibles à la lumière ?
Comment utiliser la lumière ?...



© T. Masson

Rien n'est plus rapide qu'elle : venez mesurer la vitesse de la lumière



© T. Masson

La lumière venant de la Lune met un peu plus d'une seconde à nous parvenir...

On trouve ainsi la vitesse de la lumière dans une fibre optique : celle-ci est inférieure à la vitesse de la lumière dans l'air, elle est de l'ordre de $2 \cdot 10^8$ m/s. Le visiteur peut alors imaginer les trésors d'ingéniosité dont ont dû faire preuve Léon Foucault ou Hippolyte Fizeau pour faire une mesure en 1850 !

Ici, une fibre optique de 15 km de long permet la propagation d'une impulsion lumineuse déclenchée par le visiteur. Deux photodétecteurs, placés à l'entrée et à la sortie de la fibre, permettent de mesurer le décalage temporel entre ces deux détections, c'est-à-dire le temps mis par la lumière pour parcourir 15 km dans la fibre.



© T. Masson

... la lumière venant du Soleil met 8 minutes 30 secondes.

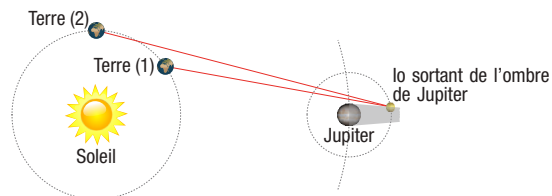
La lumière a une vitesse !

On a longtemps cru que la lumière se propageait instantanément. En réalité, elle se déplace très vite.

Mesure astronomique

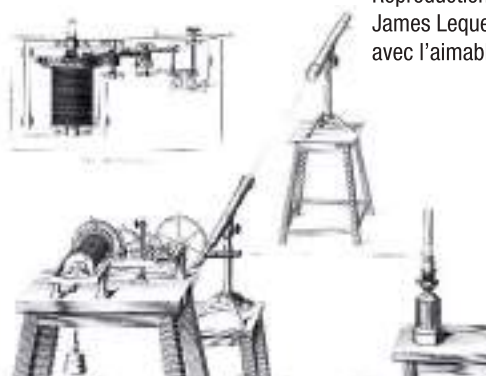
En 1676, l'astronome Ole Rømer observe les passages du satellite Io de Jupiter dans l'ombre de Jupiter. Ce satellite met environ 42 h 30 min pour parcourir son orbite autour de Jupiter.

Vu de la Terre, le temps entre deux sorties du satellite Io de l'ombre de Jupiter fluctue en fonction de la position de la Terre par rapport à Jupiter.



En position (1), le signal lumineux met moins de temps à parvenir à la Terre qu'en position (2) : connaissant la géométrie des orbites de la Terre et de Jupiter, ce décalage de quelques minutes permet d'évaluer la vitesse de la lumière. Rømer estime la vitesse de la lumière à près de 215 000 km/s.

Mesure terrestre



Extrait de « *Astronomie populaire* », Tome 4 de François Arago.
Reproduction extraite de Hippolyte Fizeau, *Physicien de la lumière*, James Lequeux, EDP Sciences, 2014 (fig. 4.7), avec l'aimable autorisation de l'auteur.

Plus de précisions

En 1862, Léon Foucault construit un instrument dans lequel un miroir tournant remplace la roue dentée de Fizeau : il trouve 298 000 km/s.

Grâce à l'invention des radars et des lasers, grâce aux progrès de l'électronique, les mesures s'affinent : en 1978, Woods, Shotton et Rowley, atteignent une précision qui dépasse la précision de la mesure du mètre étalon !

La vitesse de la lumière aujourd'hui

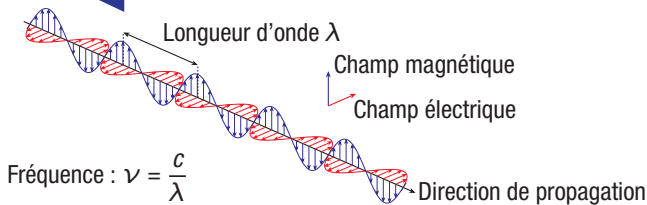
En 1983, lors de la 17^e Conférence générale des poids et mesures, la définition du mètre change : **le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299 792 458 seconde.**

Ceci fixe la vitesse de la lumière dans le vide à **$c = 299\,792\,458$ mètres par seconde.** Depuis, on ne mesure plus la vitesse de la lumière mais la longueur du mètre étalon ! La vitesse de la lumière est au cœur de la relativité restreinte introduite par Einstein en 1905 : **c'est la vitesse la plus grande qu'un corps matériel puisse atteindre dans l'Univers.**

Onde et corpuscule

Parler de lumière sans connaître sa nature ou son comportement reviendrait à décrire une personne sans connaître son caractère.

Descriptions ondulatoire et corpusculaire (théorie)



À la description ondulatoire, on associe une longueur d'onde (λ) et une fréquence (ν).

**c est la vitesse de la lumière,
 $c = 299\,792\,458$ mètres par seconde**

Longueur d'onde = distance parcourue par la lumière pour revenir dans le même état

Fréquence = nombre d'oscillations par unité de temps effectuées par les champs électrique et magnétique

À la description corpusculaire, on associe à la particule de lumière, appelée photon, une énergie $E = h \nu$, où h est la constante de Planck.

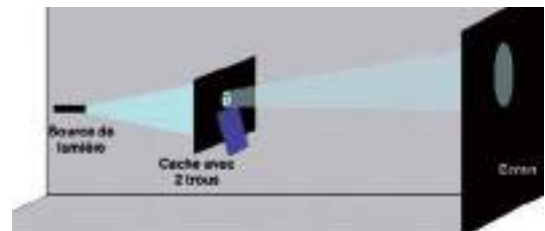
Les deux descriptions ont été unifiées dans le cadre de la mécanique quantique suite aux travaux de Planck et d'Einstein.

Description ondulatoire : expérience des trous d'Young

L'expérience des trous d'Young consiste à faire passer de la lumière par deux trous et regarder sur un écran ce qui se passe.

Quand on ferme le trou 1, on observe une tache d'intensité I_1 .

Quand on ferme le trou 2, on observe une tache d'intensité I_2 .



Si la lumière se comporte comme une onde, quand on ouvre les deux trous :

On observe une modulation d'intensité sur l'écran dans la zone de recouvrement des deux taches (interférences).



Si on utilise un faisceau cohérent de lumière pour faire l'expérience des trous d'Young, on observe une modulation d'intensité.

La lumière est donc une onde.



Expérimentalement, l'observation des deux situations dépend de l'**énergie des photons** et des **dimensions du système** - la taille de la source, les dimensions des trous, les distances source-trous et trous-écran.

Aujourd'hui, les scientifiques décrivent la lumière à la fois comme une onde ET comme une particule.

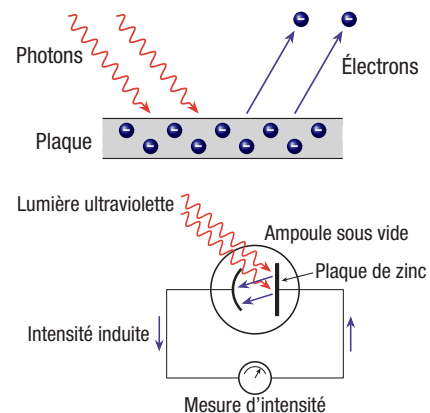
Description corpusculaire : l'effet photo-électrique

Un matériau soumis à de la lumière ultraviolette éjecte des électrons...

Expérimentalement, cela revient à mesurer une intensité électrique lorsque le matériau est éclairé (ici une plaque de zinc).

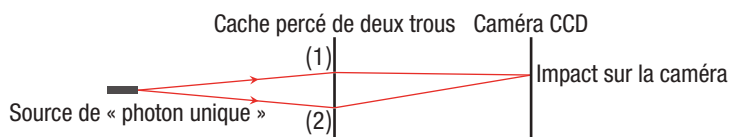
Heinrich Rudolf Hertz a réalisé cette expérience en 1887. La description ondulatoire (théorie de Maxwell) ne peut pas expliquer les résultats obtenus.

La description corpusculaire permet d'expliquer le transfert d'énergie de la particule « photon » à la particule « électron »
Albert Einstein, 1905.



Description ondulatoire et corpusculaire simultanée Le rêve devient réalité !

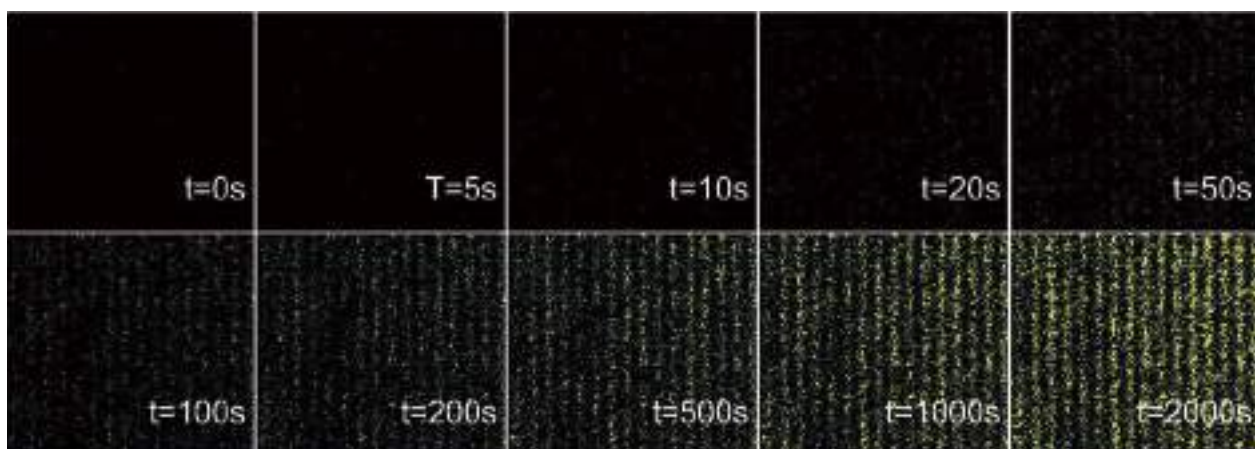
Reprenons l'expérience des trous d'Young, avec une source de « photon unique » (un seul photon est émis et détecté à la fois). La caméra accumule les impacts de chaque photon avec le temps.



L'expérience a été réalisée en 2007 dans l'équipe d'Alain Aspect à l'Institut d'Optique d'Orsay.

Les résultats sont sans appel !

Cette expérience démontre, de façon saisissante, la dualité onde-corpuscule.



Description corpusculaire = chaque photon « laisse une trace » unique.

Description ondulatoire = l'ensemble forme une figure d'interférence.

L'expérience des trous d'Young à « photon unique » permet de « voir » que chaque photon passe par toutes les fenêtres ouvertes. Cette expérience, longtemps imaginée, a enfin été réalisée.

En 1924, inspiré par la dualité onde-corpuscule de la lumière, Louis de Broglie émet l'hypothèse que toute la matière a des caractéristiques ondulatoires. C'est le fondement de la mécanique quantique.



Manipulations

La lumière est une onde : Young a fait des interférences

Trois diodes lasers, rouge, verte et bleue, éclairent en faisceau parallèle, une diapositive possédant une paire de fentes d'Young. La distance de projection peut être ajustée grâce à une glissière accessible de l'extérieur. Plus la longueur d'onde est élevée (vers le rouge), plus les franges sont écartées. Plus la distance de projection est grande plus les franges sont écartées aussi.



© E. Salançon

Le visiteur averti peut ainsi vérifier la célèbre relation ($i = \lambda \times D / a$) reliant la taille de l'interfrange, i , à la longueur d'onde, λ , et à la distance de projection, D .
Seule l'évolution selon l'écartement entre les fentes, a , n'est pas vérifié car celui-ci est fixe.

La lumière est un corps : Einstein nous a expliqué l'effet photoélectrique

Expérience mettant en évidence un effet photoélectrique interne, appelé « effet photovoltaïque ». Le visiteur peut agir sur l'intensité lumineuse émise grâce à un variateur.

Un luxmètre indique l'éclairement perçu par l'œil humain en lux (W.m^{-2}).

Et, un ampèremètre à aiguille indique l'intensité électrique délivrée par la cellule photovoltaïque en milliampère.



© E. Salançon

Le visiteur peut se rendre compte qu'en éclairant une ampoule, une intensité électrique est mesurée aux bornes d'une cellule éloignée, sans contact physique avec l'ampoule. Les électrons sont donc mis en mouvement suite à un transfert d'énergie lors du choc entre la particule « photon » et la particule « électron ».

Lumière et architecture

La lumière est considérée comme l'un des « matériaux » de base de toute conception architecturale. Quelques points de repères...

Eclairage



fig. 1-1 Bibliothèque universitaire de Cottbus, Allemagne, architectes : Herzog et Meuron, 2004.

On parle d'éclairage pour désigner une quantité de lumière directe ou réfléchi qui s'exprime en lux. Les besoins en quantité de lumière varient en fonction des usages des divers locaux du bâtiment : nous n'avons pas besoin de la même quantité de lumière pour lire (fig.1-1) ou pour nous déplacer (fig.1-2), par exemple.

fig. 1-2 École de Pantin, France, architectes : Atelier Méandre, 2010.



© C. Drozd

“ La fenêtre est une chose merveilleuse par laquelle vous obtenez la touche de lumière qui vous appartient à vous, non au soleil. ”

Silence et lumière : choix de conférences et d'entretiens 1955-1974, Louis Kahn. Paris : Ed. du Linteau, 1996.



fig. 2-1 Musée d'histoire naturelle, Londres, Angleterre.

© C. Drozd

On différencie l'éclairage de l'ensoleillement qui provient directement du soleil et crée des taches de lumière dans le bâtiment, lorsque les rayons entrent par la fenêtre (fig.2-1). Cela a pour conséquence d'apporter davantage de lumière à l'intérieur du bâtiment mais aussi un apport en chaleur (fig.2-2).

fig. 2-2 Thermes de Bad Aibling, Allemagne, architectes : Behnisch Architekten, 2007.

Ensoleillement



© C. Drozd

Confort visuel



© C. Drozd

Que ce soit dans un bâtiment comme à l'extérieur, la lumière permet tout simplement de voir.

Mais comment bien voir ?

Pour cela, il est nécessaire que la lumière qui entre dans le bâtiment soit suffisante en quantité - on parle de niveau d'éclairage minimum - et qu'elle soit homogène - absence d'ombres trop contrastées. Pour garantir un confort visuel, il est aussi nécessaire que les ouvertures permettent de voir vers l'extérieur (fig. 3-1).

fig. 3-1 École d'architecture de Nantes, France, architectes : Lacaton & Vassal, 2009.

Ambiances lumineuses



© C. Drozd

La lumière en architecture ne sert pas qu'à voir ou à chauffer, elle sert aussi à mettre en valeur l'architecture elle-même. Des architectes peuvent effectivement choisir des formes d'ouvertures qui modulent la lumière pour mettre en valeur l'espace (fig.4-1), les qualités des matériaux (fig.4-2) ou donner à vivre une expérience.

fig. 4-1 Couvent de la Tourette, Evieux, France, architecte : Le Corbusier, 1960.



© C. Drozd

Dans l'espace urbain, les zones ensoleillées, les ombres des bâtiments et de la végétation, les reflets des matériaux utilisés construisent une ambiance lumineuse.

fig. 4-2 Conservatoire de musique et de danse, Les Herbiers, France, architectes : Forma 6, 2010.

Lumière et peinture

En peinture, la lumière est essentielle : elle éclaire de l'extérieur le tableau à voir, elle éclaire de l'intérieur les intentions de l'artiste.

La lumière pour composer



Edvard Munch, *Le Cri*, 1893, Oslo, The National Gallery.

La lumière est une force d'attraction utilisée pour conduire le regard vers les éléments clés d'un tableau : la lumière de la bougie découpe le profil de Madeleine.



Georges de la Tour, *La Madeleine aux deux flammes*, 1640, New York, Metropolitan Museum of Art.

La composition de l'éclairage participe à la dynamique d'une scène : le soleil couchant fait que les « nuages saignent » et « la couleur crie » (Edvard Munch).



Diego Velázquez, *Les Ménines*, 1656, Madrid, Musée du Prado.

La lumière pour ordonner

Les personnages importants d'un tableau sont « mis en lumière » pour respecter une hiérarchie sociale : l'infante Marguerite Thérèse (au centre), le couple royal (dans le miroir du fond) et le chambellan de la reine (dans l'encadrement de la porte du fond).

La lumière est utilisée pour séparer le divin lumineux (en haut) du terrestre plus sombre (en bas).



Raphael, *Transfiguration*, 1518, Musées du Vatican.

La lumière pour révéler



Johannes Vermeer, *L'Art de la peinture*, 1666, Vienne, Kunsthistorisches Museum.

La texture, la couleur et la brillance des matériaux et des tissus ne sont révélées que par les reflets subtils de la lumière argentée.

Les lumières, et plus encore les ombres, sont indispensables pour créer des volumes et des profondeurs.

Rembrandt, *Samson menaçant son beau-père*, 1635, Berlin, Gemäldegalerie.



Un siècle de lumière

La lumière n'est pas seulement un concept scientifique, c'est aussi un symbole artistique, littéraire et religieux. Le XVIII^e siècle est celui de la passion des idées, menée par le courant des « Lumières ».

La lumière, les Lumières

L'emploi métaphorique du mot lumière est courant au XVII^e siècle. La théologie distingue la lumière de la Révélation, qui émane directement de Dieu, de la lumière naturelle, qui réside en chacun de nous. Fontenelle évoque en 1688 « les lumières naturelles de la raison » pour désigner la somme des connaissances produites par l'homme.

Ainsi, au début du XVIII^e siècle, la lumière, au singulier, évoque une émanation de l'absolu, tandis que les Lumières, au pluriel, représentent les connaissances acquises par l'humanité.

Au fil du XVIII^e siècle, la lumière va désigner la diffusion de l'esprit philosophique et humaniste.

Par opposition à la lumière, les ténèbres désignent l'obscurantisme, l'ignorance, les erreurs, voire les forces du mal...

“L'humanité tout entière est replongée dans les ténèbres. [...] Cependant, le jour renaît peu à peu ; les yeux, longtemps condamnés à l'obscurité, l'entrevoient, se referment, s'y accoutument lentement, fixent enfin la lumière.”

Condorcet, description du Moyen-Âge et de la Renaissance, dans *Esquisse d'un tableau historique des progrès de l'esprit humain*, Paris, 1822.

Un siècle pour illuminer le monde

Le XVII^e siècle a vu naître la méthode scientifique moderne, fondée sur l'expérience, le raisonnement, l'analyse, la logique et les mathématiques... Cette méthode triomphe dans le système mécanique du Monde proposé par Isaac Newton en 1687.

Inspirés par ce succès, les philosophes et intellectuels européens animent pendant tout le XVIII^e siècle une mutation profonde de la société en appliquant les méthodes de l'analyse et du questionnement.

Leur mission ? « éclairer » l'Homme en favorisant le progrès de la connaissance ; former des (futurs) citoyens capables de penser, de raisonner et de débattre ; lutter contre les préjugés, l'irrationnel, l'obscurantisme, les fanatismes et l'arbitraire ; soumettre à l'analyse les formes d'autorité, les écrits, les traditions, les systèmes politiques et économiques ; transmettre leur soif de liberté et de tolérance...

Leur devise ? *Sapere Aude* (« Ose savoir », Emmanuel Kant)



Page de couverture de l'œuvre de Newton traduite en français : la lumière, symbole de raison, éclaire le savant...

Mr. De Voltaire : *Elémens de la philosophie de Newton, mis à la portée de tout le monde*, éditeur Etienne Ledet et Compagnie

Un mouvement qui se veut universel

Le mouvement du siècle des Lumières touche les classes sociales (aristocrates, bourgeois, artisans) qui disposent d'un peu de temps libre et d'argent pour acheter des livres, se cultiver et participer aux débats. De fait, le peuple n'est pas encore complètement associé à cette mutation.

Le siècle des Lumières s'exprime dans toute l'Europe. Des échanges épistolaires, des voyages, des soutiens actifs, par exemple face à la censure, favorisent l'émergence d'une première « conscience » européenne...

Les Lumières s'allument partout en Europe, à différentes dates...



Le siècle des Lumières

Les Lumières annoncent et soutiennent les démocraties, favorisent les débats, mettent en avant l'individu et ses droits. Le XVIII^e siècle invente les fondements de nos sociétés actuelles.

Des lieux de rencontres, d'échanges et de débats...

La Cour du Roi n'est plus le lieu privilégié de la société en mutation.

Salons privés, cafés et clubs deviennent des lieux d'échanges « à la mode » où l'on vient certes pour se montrer, mais aussi et surtout pour apprendre à débattre sur des questions philosophiques, scientifiques, politiques, économiques et religieuses ; pour écouter des récits de voyages ; ou pour assister à des démonstrations scientifiques... Les clubs, précurseurs des partis politiques, joueront un rôle important lors de la Révolution Française.

Des Académies (sociétés savantes de Belles-Lettres et de Sciences) voient le jour dans de nombreuses villes de province. Elles éditent des périodiques pour diffuser le savoir et elles organisent des concours académiques ouverts à tous.

Émilie du Châtelet :
mathématicienne, physicienne et
femme de lettre,
elle a traduit en français les
Principia Mathematica
de Newton.

© Nicolas de Largillière, *Portrait de la marquise du Châtelet*, 18^e s., documentation du Louvre.



Le Journal des Sçavans,
aujourd'hui *Journal des
Savants*, est le plus ancien
périodique littéraire et
scientifique d'Europe.
Il a été fondé en 1665.



Denis Diderot.

© Louis-Michel van Loo, *Portrait de Denis Diderot*,
1767, Paris, Musée du Louvre.

L'Encyclopédie : la connaissance du siècle en 28 volumes

De 1746 à 1772, Diderot et d'Alembert (qui quitte le projet en 1758) mènent une entreprise de grande envergure : la rédaction de l'*Encyclopédie*, ou *Dictionnaire raisonné des arts, des sciences et des métiers*.

Cette encyclopédie (au sens actuel du terme) rassemble toute la connaissance de l'époque, dans tous les domaines des sciences, des arts et des métiers. Elle se veut indépendante de toute forme de pouvoir (politique et religieux) et accessible à tous par son effort de vulgarisation. C'est aussi une réflexion sur la société et un plaidoyer pour le progrès de la civilisation.

Malgré la censure qui a parfois retardé le projet : **140** collaborateurs ont produit **17** volumes de textes, **11** volumes de planches, pour un total de **72 000** articles...

L'héritage

Le siècle des Lumières nous a laissé en héritage des idées neuves qui fondent nos sociétés actuelles : les débats d'idées (fondement des démocraties), la liberté d'expression, la tolérance, la laïcité, l'athéisme, la reconnaissance de l'individu, les Droits de l'Homme...

À l'heure d'Internet, la diffusion du savoir n'a plus de limite : **Wikipédia** est la digne héritière de l'*Encyclopédie* de Diderot... Malheureusement, les adversaires des Lumières sont restés très actifs : dans des périodes sombres de l'Histoire récente, l'obscurantisme, le fanatisme et l'oppression ont pris des formes nouvelles et parfois terribles...



Pôle 2 : Émettre et évoquer

Ce pôle montre comment la lumière est émise de façon naturelle ou artificielle et comment on peut évoquer les sources de lumière dans l'art, en peinture par exemple. On se place donc à la source de la lumière, ou plutôt des lumières. Parmi les sources présentées, figurent : le Soleil, et plus généralement les étoiles, le feu, les aurores boréales, les lasers, les ampoules à filament et fluorescentes, les leds, la bioluminescence... les caractéristiques techniques et physiques des sources sont discutées et présentées pour permettre au visiteur de s'y retrouver.

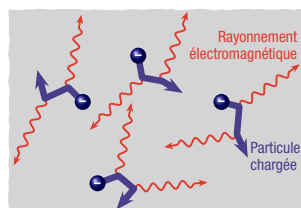
Émettre un photon visible

Émettre de la lumière visible repose sur quelques principes qui expliquent la totalité des sources de lumière.

Au niveau le plus fondamental, la lumière est émise lors de phénomènes mettant en jeu des particules électriquement chargées dans un système qui perd de l'énergie.

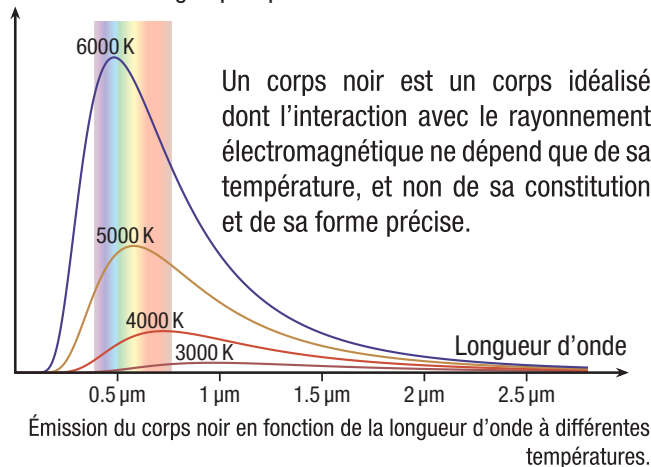
L'incandescence

L'**incandescence** est l'émission de lumière par un corps chauffé.



Tout corps dont la température est au dessus du zéro absolu ($-273,15^{\circ}\text{C}$) émet des ondes électromagnétiques. L'énergie thermique induit des mouvements aléatoires des constituants chargés du corps qui se comportent comme des micro-antennes et émettent des rayonnements électromagnétiques.

Luminance énergétique spectrale

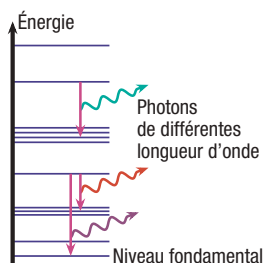


L'incandescence produit une lumière dont la distribution spectrale est continue et dépend de la température.

L'énergie de certains systèmes quantiques ne peut prendre que certaines valeurs bien précises : les **niveaux d'énergie** sont quantifiés.

La luminescence

Niveaux quantifiés d'un système quantique : le niveau le plus bas est le **niveau fondamental**. Le système est dit **excité** s'il n'est pas dans ce niveau : il peut alors redescendre vers un autre niveau en émettant un photon dont la longueur d'onde $\lambda = c/\nu$ dépend de la différence d'énergie entre les niveaux.



La luminescence produit une lumière dont la distribution spectrale est constituée de raies ou de bandes étroites.

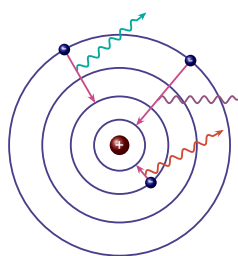
Divers systèmes quantiques produisent de la luminescence.

Un **atome** est constitué d'un noyau chargé positivement entouré d'électrons chargés négativement répartis sur des orbites d'énergies quantifiées. L'énergie totale de l'atome dépend de la distribution des électrons sur ces orbites.

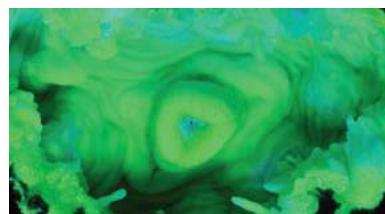
Les **semi-conducteurs** sont des matériaux dans lesquels les états disponibles pour les électrons ont des énergies réparties dans des bandes. Une **molécule** a des niveaux d'énergies quantifiées qui dépendent de la répartition des électrons de ses atomes constitutifs, des modes de vibrations des atomes les uns par rapport aux autres et des modes de rotation de la molécule.

Certaines molécules peuvent absorber de la lumière et perdre ensuite cette énergie en émettant des photons. Le processus peut être instantané, c'est la **fluorescence**, ou beaucoup plus lent, c'est la **phosphorescence**. Dans un cas, la transition se fait directement, alors que dans l'autre, un niveau d'énergie intermédiaire est accessible et ralentit le processus. Ici l'intérieur d'une géode émettant en fluorescence.

La **luminescence** est l'émission de photons lorsqu'un système quantique passe d'un niveau d'énergie quantifié à un autre. Comme l'énergie d'un photon correspond à la différence entre deux niveaux d'énergie, seules certaines fréquences sont permises, selon la relation $E = h\nu$ avec h la constante de Planck et ν la fréquence.



Dans un atome, lorsqu'un électron quitte son orbite pour rejoindre une orbite de plus basse énergie (plus proche du noyau), l'énergie est libérée sous forme d'un photon.



Caractéristiques des sources

Quelles sources pour quels usages et dans quelles conditions de dépenses énergétiques ?

Durée de vie et rendement



© KMJ



© Jonathan M



© Thavlosk



© Jan Mehlich

Le **rendement lumineux** est le rapport entre le flux lumineux dans le domaine visible, exprimé en lumens (lm), et la puissance électrique consommée par la source, en watt (W) : c'est donc la puissance utile à la vision comparée à la puissance consommée par la source.

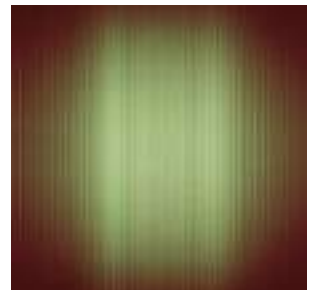
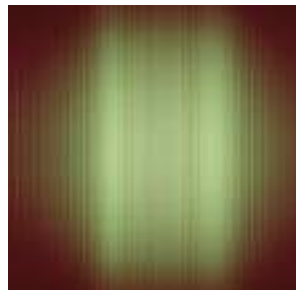
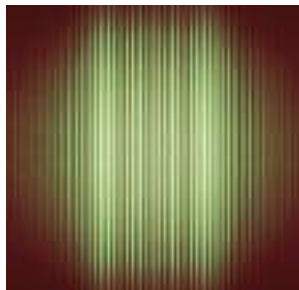
- 1 - Ampoules à filament 100W = 17 lm/W.
- 2 - Bougies = 0.3 lm/W.
- 3 - Leds blanches = 200 lm/W.
- 4 - Tubes fluorescents = 100 lm/W.

Une caractéristique importante d'une source est sa **durée de vie** dans une condition de fonctionnement donnée. Aucune source ne dure indéfiniment car il y a toujours des interactions avec l'environnement extérieur qui finissent par détériorer ses propriétés.

Pour quels usages ?

Pour que l'homme puisse voir la nuit, des sources de lumière artificielles remplacent le Soleil. C'est le cas des ampoules à filament et de leurs dérivés, et désormais des leds blanches. Bien que le spectre d'émission de ces sources se rapproche le plus possible du spectre visible du Soleil, chacune produit un « blanc » particulier : le « blanc chaud » tend vers le jaune, le « blanc neutre » vers un vrai blanc et le « blanc froid » vers le bleu.

Pour le physicien, dans l'expérience des trous d'Young, les franges d'interférence ne sont visibles que si la source est brillante : si la largeur spectrale est trop importante ou si la taille de source est trop grande, les franges se brouillent. On perd de l'information, ce qui rend difficile l'observation du caractère ondulatoire de la lumière.



Simulation de l'effet de la taille d'une source sur une figure d'interférence : de gauche à droite, l'effet ondulatoire s'estompe avec l'augmentation de la taille de la source car le faisceau est de moins en moins cohérent.

© E. Salançon

Aujourd'hui pour le grand public, avec les lasers, le monde ondulatoire est ouvert à tous de façon quasi quotidienne. Les physiciens ne sont plus les seuls à pouvoir jouer avec des sources de lumière aux propriétés étonnantes.



Le light painting consiste à utiliser un temps d'exposition long dans un environnement sombre en y déplaçant une source de lumière ou en bougeant l'appareil photo. Ici un laser balaye un paysage urbain pendant un long temps de pause.

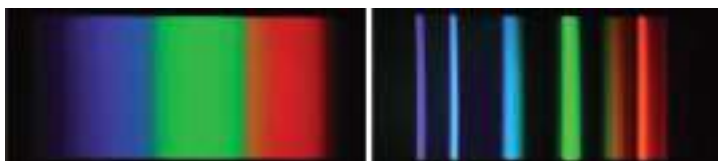
© davejdoe

La physique des sources

Les grandeurs physiques qui permettent de comparer les sources de lumière sont la largeur spectrale et la brillance.

Largeur spectrale

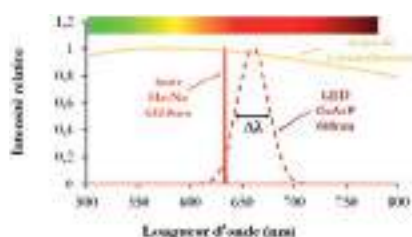
Spectre d'émission d'une lampe à incandescence (à gauche) et d'une lampe fluorescente compacte (à droite).



Une source de lumière émet dans plusieurs longueurs d'onde, qu'un système dispersif, comme un prisme, permet de séparer. En mesurant l'intensité à ces différentes longueurs d'onde, on construit le **spectre d'émission** qui caractérise la couleur de la source.

L'étendue en longueur d'onde de ce spectre est la **largeur spectrale** de la source. Elle se note $\Delta\lambda$.

Spectres d'émission d'un laser hélium-néon (He-Ne) montrant la grande pureté spectrale caractéristique des lasers ; d'une LED rouge (arséniure et phosphure de gallium, GaAsP) dont $\Delta\lambda = 30 \text{ nm}$; et d'une ampoule à incandescence, dont le spectre est quasi continu dans le domaine visible.

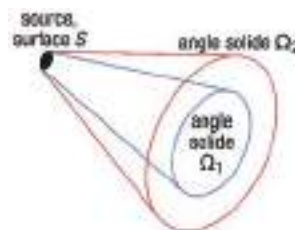


Brillance

La **brillance** est reliée à l'intensité $I(\lambda)$ émise à une longueur d'onde λ donnée par une source de surface S sous un angle solide Ω , par la relation :

$$B = \frac{I(\lambda)}{S \cdot \Omega}$$

Elle s'exprime en nombre de photons par seconde, par mètre carré et par stéradian (unité d'angle solide). Le terme d'intensité est diminué d'autant plus que la largeur spectrale de la source augmente : plus la largeur spectrale est étroite, plus la brillance est élevée, c'est le cas des lasers. De même, si la taille de source S diminue, la brillance augmente. Dans les laboratoires de recherche, on réalise des sources très brillantes car elles sont de taille atomique !



À intensité émise égale, la source de surface S qui émet sous l'angle solide Ω_1 est plus brillante que celle qui émet sous l'angle solide Ω_2 .

L'angle solide Ω est, dans l'espace, l'équivalent de l'angle ordinaire dans le plan. Les paramètres importants qui déterminent la brillance d'une source sont donc :

- l'intensité d'émission,
- la largeur spectrale,
- la taille de la source,
- l'angle solide sous lequel la source émet.

La **brillance** est une notion employée pour toutes les sources de particules (photons, électrons,...).

Photométrie

L'œil ne perçoit pas toutes les longueurs d'onde du spectre de la lumière de la même façon. La **photométrie** a pour but de caractériser les sources de lumière du point de vue de cette perception en prenant en compte le spectre de sensibilité des capteurs de l'œil.

Toutes les grandeurs photométriques se déduisent de trois unités :

- le **lumen** est l'unité de flux lumineux qui exprime la puissance en Watt d'un rayonnement perçu par l'œil humain,
- le **lux** est l'unité d'éclairement lumineux qui exprime la puissance par unité de surface en W.m^{-2} perçu par l'œil humain,
- le **candela** est l'unité d'intensité lumineuse qui exprime la puissance angulaire en W.sr^{-1} perçu par l'œil humain.

Depuis 1948, la candela, l'unité d'intensité lumineuse, remplace la bougie (1cd = 1.018 bougies).



© Lusitana



Manipulations

La brillance au coeur des sources : spectres lumineux

Une fibre optique peut être orientée de façon à capter le signal émis par plusieurs types d'ampoules. Le visiteur choisit la lampe dont il veut voir le spectre. Il peut ainsi observer le spectre continu d'une ampoule à filament ou les pics d'émission en fluorescence d'une ampoule basse consommation.



© E. Salançon

La lumière au carré

Kaléidoscope carré de 60 cm de côté et de 40 cm de haut dans lequel plusieurs types d'objets lumineux sont placés : des leds colorées, des fioles remplies de liquides fluorescents éclairées en lumière ultraviolette... En observant sous le bon angle, le visiteur croit voir Las Vegas se poursuivre à l'infini !

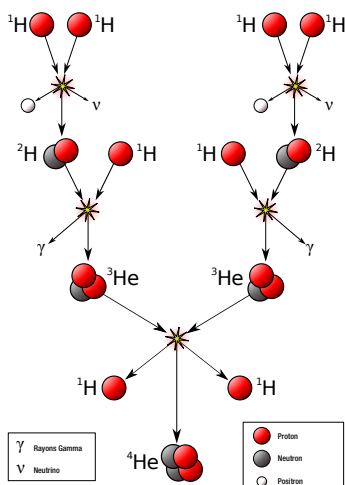


©T. Masson / Manipulation : Fernande et Michel Vedel

Les lumières du ciel

Longtemps énigmatiques, les lumières du Soleil, des étoiles, des éclairs et des aurores boréales sont les plus anciennes sources naturelles connues.

Les étoiles et le Soleil



La chaîne proton-proton est la plus importante des deux chaînes de réaction de fusion nucléaire au cœur du Soleil.

Une étoile est une boule de gaz, principalement de l'hydrogène et de l'hélium, qui tend à s'effondrer sur elle-même sous l'action des forces de gravitation. Cette contraction élève la température du gaz, ce qui déclenche des réactions nucléaires de fusion. La boule de gaz se stabilise dans un équilibre hydrostatique où la pression de radiation, entretenue par les réactions de fusion, compense la gravité.

Deux réactions nucléaires transforment l'hydrogène en hélium et fournissent l'énergie d'une étoile : la chaîne proton-proton et le cycle carbone-azote-oxygène. Ces réactions sont mises en jeu en fonction de la température du cœur : pour une étoile massive, donc chaude, le cycle du carbone est très efficace et fournit l'essentiel de l'énergie, mais il consomme rapidement l'hydrogène.

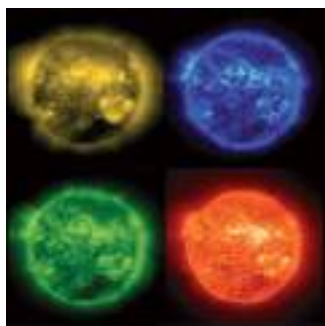
La lumière incandescente émise par une étoile provient de sa partie externe, la photosphère. Cette lumière est riche d'informations : température, gravité de surface, composition chimique...

La masse et l'état d'évolution d'une étoile déterminent la quantité de lumière qu'elle émet et sa couleur.

Voir annexe 1 page 92.

Le Soleil est une étoile commune : il en existe plus de 100 millions de semblables dans notre galaxie. En milieu de vie, il est âgé d'à peu près 5 milliards d'années. Sa température de surface est proche de 6000°C. La lumière du Soleil est la principale source d'énergie de la vie sur Terre.

Ces images en lumière ultraviolette du Soleil dans différentes longueurs d'onde révèlent l'activité dans différentes couches de l'atmosphère solaire.



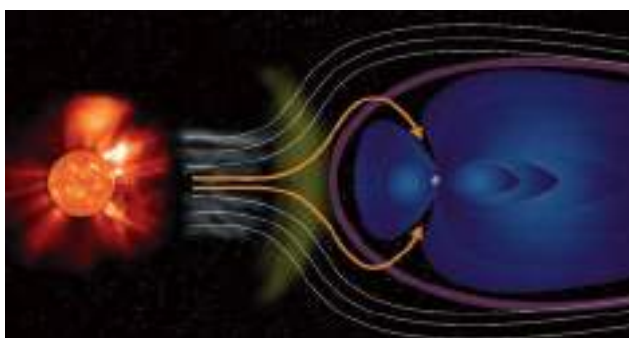
© ESA, NASA / SOHO

Les éclairs

Dans un nuage, la différence de température entre le bas et le haut induit des déplacements d'air. Par friction, l'air se charge et crée des zones de forte différence de potentiel électrique, jusqu'à 100 millions de volts. Lors de la décharge, le plasma créé induit une expansion explosive de l'air, c'est le bruit du tonnerre, et les atomes de l'air excités retrouvent leur état fondamental en émettant des photons, c'est la lumière des éclairs.

Les aurores boréales

Lors d'une éruption solaire, des particules chargées éjectées par le Soleil entrent en collision avec la magnétosphère de la Terre, région où le champ magnétique terrestre joue un rôle prépondérant, et pénètrent dans l'atmosphère terrestre aux deux pôles.



© ESA



© A. Rouvin

Les particules chargées excitent ou ionisent les atomes de la haute atmosphère qui retrouvent leur état fondamental en émettant des photons. Comme la nature des ions dépend de l'altitude, les nuages prennent des teintes très variées, sous forme de draperies, rideaux, arcs, rayons... Ce sont les **aurores boréales**.

Sources artificielles

Le développement de sources de lumière artificielles est guidé par le souci de reproduire la lumière du Soleil.

Sources métalliques



Ampoules à filament métallique, dites aussi à incandescence.



Les **ampoules à filament métallique** émettent de la lumière par incandescence : lorsque le courant électrique parcourt le filament, le métal est chauffé par effet Joule. La majeure partie du spectre d'émission se situe dans le domaine infrarouge et il est quasiment continu dans le domaine visible : le rendement de ces ampoules est faible mais elles produisent une impression de « chaleur » qui les rend agréables.

Dans un **tube au néon**, des décharges électriques répétées excitent quantiquement le gaz néon. Par luminescence, le néon émet une lumière rouge caractéristique du spectre d'émission de l'atome de néon. Selon le même principe, les **lampes à vapeur de sodium** émettent de la lumière de couleur orangée, caractéristique du spectre d'émission de l'atome de sodium.

Tube au néon produisant une lumière rouge caractéristique. Ces tubes ont été longtemps utilisés pour des enseignes lumineuses.

Les **tubes fluorescents** fonctionnent en deux étapes. Le gaz contenu dans le tube est d'abord excité par des décharges électriques et il émet des photons ultraviolets par luminescence. Ensuite, le matériau fluorescent déposé en couche mince sur la surface interne du tube émet par fluorescence de la lumière visible. Le gaz interne est souvent une vapeur de mercure et le matériau fluorescent est choisi en fonction de la couleur désirée. Le blanc est obtenu par mélange de différentes poudres fluorescentes.



© A. J. Fialkowski

Les **flammes** sont des sources gazeuses dont l'apport d'énergie se fait par combustion. L'émission de lumière met en jeu plusieurs mécanismes. Par exemple, la flamme d'une bougie est composée de deux parties : la zone bleue correspond à la luminescence produite par la désexcitation de la molécule de dioxyde de carbone et la zone jaune correspond à l'incandescence des suies de carbone présentes dans le gaz chauffé à 1500°C.

Flammes de becs Bunsen. De gauche à droite, plus il y a d'oxygène, plus la combustion est complète : il y a moins de suies chaudes qui émettent de la lumière blanche et jaune par incandescence et le bleu de la luminescence du dioxyde de carbone est plus visible.

Sources gazeuses



Éclairage d'autoroute par des lampes de vapeur de sodium, de couleur orangée.



Tubes fluorescents de différentes couleurs utilisant différents matériaux fluorescents.

Nouvelles sources artificielles

Au cours du XX^e siècle, l'avènement de la physique quantique a contribué à l'invention de nouvelles sources de lumière.

Les leds

Les **leds** (*Light Emitting Diodes* en anglais, diodes électroluminescentes en français) émettent de la lumière par luminescence dans un système quantique basé sur des semi-conducteurs. Les premières leds rouges datent de 1962, puis des leds de différentes couleurs ont été produites, par exemple vertes et jaunes. En 1994, I. Akasaki, H. Amano et S. Nakamura, Prix Nobel de physique 2014, ont mis au point les premières leds bleues à forte brillance. Cette découverte majeure a permis d'élargir le champ d'utilisation des leds.



Les leds sont utilisées dans des **dispositifs d'affichage** constitués de pixels rassemblant des leds rouges, vertes et bleues. La brillance des leds permet un affichage en milieu très lumineux, par exemple en extérieur. La taille de ces dispositifs peut atteindre des dizaines de mètres. Aujourd'hui, des écrans de tablettes ou de téléphones portables utilisent des OLED, des leds basées sur des matériaux organiques.

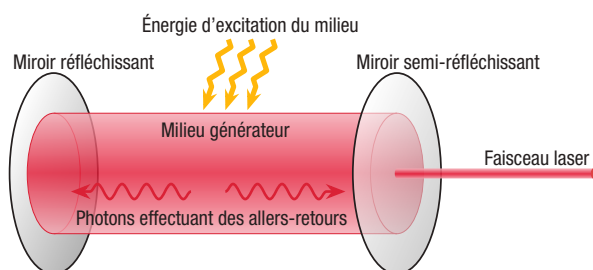


Les leds vertes et rouges, produites depuis longtemps, sont largement présentes dans notre quotidien, à chaque coin de rue...

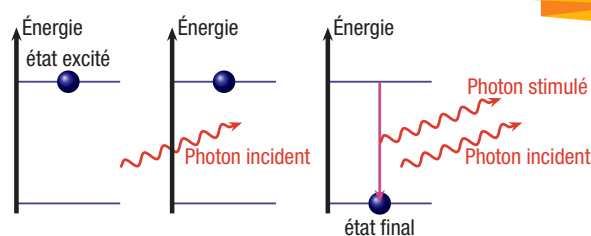
Les leds sont aujourd'hui des **sources d'éclairage** à forte brillance et très haut rendement. La lumière blanche est obtenue par fluorescence d'un matériau recouvrant une led bleue-UV ou par synthèse additive combinant des leds rouges, vertes et bleues. Ces deux techniques permettent aussi d'obtenir une large gamme de couleurs.

26

Dans un atome, une molécule ou un semi-conducteur, l'émission d'un photon par un système excité peut être stimulée par un photon de même énergie. Le photon stimulé a alors les mêmes caractéristiques que le photon incident : direction de propagation, phase, énergie, polarisation.



Le laser



Cette **émission stimulée**, prédite par Einstein en 1917, est à la base du fonctionnement des **lasers** inventés en 1953 : grâce à des miroirs disposés en vis-à-vis, des photons font des allers-retours dans un milieu générateur, par exemple un gaz excité par un apport d'énergie externe, où ils stimulent l'émission de clones à chaque passage.

Le faisceau de photons produit est cohérent et extrêmement brillant, ce qui le rend intéressant dans de nombreuses applications : expériences scientifiques, chirurgie, découpe de matériaux, lecture de CD et DVD...

« Un laser sur la ville », opération réalisée par la SFP-Provence pour fêter les 50 ans du laser. Le laser émetteur est situé au centre universitaire de Saint Charles à Marseille. Le faisceau vise un miroir placé au pied de la statue de Notre Dame de la Garde, qui renvoie la lumière vers sa source. Ce dispositif reproduit l'expérience historique de Fizeau de mesure de la vitesse de la lumière avec des moyens modernes.



© J.-M. Laugier



© J.-M. Laugier



Manipulations

Le disque plasma

Le disque présenté ici est un ensemble étanche (comme une ampoule) dans lequel une pression partielle de gaz (hydrogène) est maintenue. Un générateur haute tension permet d'alimenter une antenne radiofréquence qui excite les atomes du gaz qui en se désexcitant émettent un photon : le bleu est caractéristique de l'hydrogène. En approchant un tube à décharge, le gaz contenu à l'intérieur du tube subit le rayonnement radiofréquence de la même façon que dans le disque. Le tube s'allume sans être alimenté ! Le visiteur est donc interpellé par cette observation qui semble sortir de « La guerre des étoiles » !



© E. Salançon

Enfilez des lunettes à réseaux pour lire dans les ampoules !

Ce joli totem comportant plusieurs « trous » lumineux peut être observé avec des lunettes comportant des réseaux de diffraction. Le visiteur enfille les lunettes et peut ainsi voir les raies de diffraction correspondant au spectre d'émission de chaque ampoule placée à l'arrière. Le visiteur curieux peut jouer à reconnaître le spectre pour en déduire le type d'éclairage utilisé comme un jeu de piste.



© F. Amat



© F. Amat

Sources de rayons X

Les rayons X sont une lumière précieuse pour regarder et explorer le monde.

Les rayons X

Les **rayons X** sont des ondes électromagnétiques dont l'énergie est comprise entre 100 eV et 100 keV, alors que celle de la lumière visible est de l'ordre de 2 à 3 eV. Cela correspond à des longueurs d'onde entre 0,01 nm et 10 nm alors que la lumière visible est comprise entre 390 nm et 780 nm. Leur découverte, par le physicien allemand Wilhelm Röntgen, date de 1895.

Les rayons X impressionnent des plaques photographiques, ils produisent du rayonnement de fluorescence et ils sont absorbés par la matière : plus un atome a une masse atomique élevée, plus il est absorbant. Les rayons X forment une lumière ionisante qui pénètre facilement la matière molle : ils sont dangereux pour l'organisme. Heureusement, ils sont naturellement absents sur Terre et ceux venant de l'espace sont absorbés par l'atmosphère.



Wilhelm Röntgen (1845–1923), découvreur des rayons X, a été le premier lauréat du Prix Nobel de physique en 1901 pour cette découverte. Il s'agit de la main de son épouse : Anna Röntgen.

Des satellites d'observation ont montré qu'il existe de nombreuses sources naturelles de rayons X dans l'Univers : étoiles, amas de galaxies, trous noirs, étoiles à neutrons, quasars. Ces sources ont un point commun : elles sont le siège de phénomènes énergétiques intenses mettant en jeu des particules chargées.

Les sources naturelles

Le Soleil émet des rayons X de hautes énergies, visibles ici en fausses couleurs vertes et bleues, superposées sur une image ultraviolette du Soleil en teinte rouge.



© NuSTAR, SDO, NASA

Les sources artificielles

L'émission artificielle et contrôlée de rayons X repose sur trois mécanismes fondamentaux :

- lors de la **transition atomique** d'un électron vers une couche interne, proche du noyau ;
- lorsqu'une particule chargée est brusquement freinée, c'est le **rayonnement de freinage** ;
- lorsqu'une particule chargée très énergétique change de direction sous l'effet d'un champ magnétique, c'est le **rayonnement X synchrotron**.

Lorsqu'un électron de haute énergie change de direction sous l'action d'un champ magnétique, il y a émission d'un rayonnement X synchrotron.

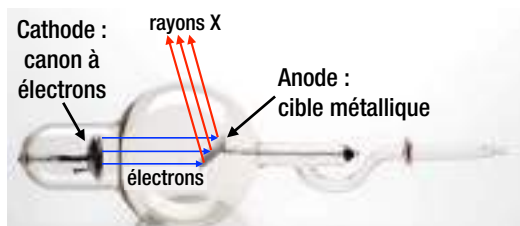


Dans une source basée sur l'**interaction électrons/métal**, des électrons de haute énergie sont envoyés sur un métal :

1. les électrons pénètrent au cœur des atomes et éjectent des électrons placés sur des couches internes : les atomes retournent dans leur état fondamental en émettant des photons X ;
2. les électrons sont brutalement freinés par le métal, ce qui produit un rayonnement X de freinage.

Ces sources sont les plus utilisées dans les hôpitaux, les aéroports et les laboratoires. Leur rendement est faible : moins de 1% de l'énergie des électrons est récupérée en rayonnement X.

Le tube à rayons X utilise l'interaction électrons/métal : dans le vide, des électrons sont éjectés de la cathode par chauffage et ils sont accélérés vers l'anode par une tension électrique. L'interaction avec le métal de l'anode induit un faisceau de rayons X.



Les sources basées sur le **rayonnement synchrotron** produisent un faisceau X dont les rayons sont presque parallèles, avec un spectre en fréquence étendu et continu et une intensité très importante. Le spectre synchrotron ne se limite pas aux rayons X : il couvre aussi l'infrarouge, le visible et l'ultraviolet.

Les lumières du vivant

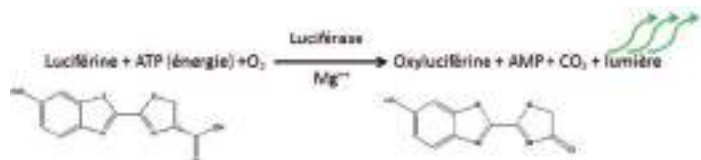
Certains êtres vivants sont capables d'émettre de la lumière ou de la transformer. Ces propriétés du vivant ont de nombreuses applications en biologie.

La bioluminescence



© Herky

Réaction enzymatique d'oxydation de la luciférine conduisant à l'émission de lumière représentée par les flèches vertes.



Le lampyre – ver luisant, *Lampyris noctiluca* – émet de la lumière par la partie terminale de son abdomen.

Fluorescence et phosphorescence



© J. Emis

Certaines méduses, comme *Aequorea victoria*, produisent de la lumière par **fluorescence**, émise par une protéine appelée Green Fluorescent Protein (GFP). Par contre, on ne sait toujours pas à quoi sert cette fluorescence : attirer des proies, se camoufler, se protéger des rayons UV ?

Le mécanisme d'excitation de la GFP isolée de la méduse *Aequorea victoria* a pu être élucidé lorsque la structure tridimensionnelle de la protéine a été résolue : cette protéine, en forme de tonneau, possède en son cœur trois acides aminés photo-activables par une lumière bleue/ultraviolette (entre 395 et 475 nm). Le retour à un état stable s'accompagne d'une émission de lumière verte à 504 nm. Certains champignons sont **phosphorescents**, probablement pour attirer les insectes nocturnes et favoriser la dispersion des spores transportées par ces insectes.

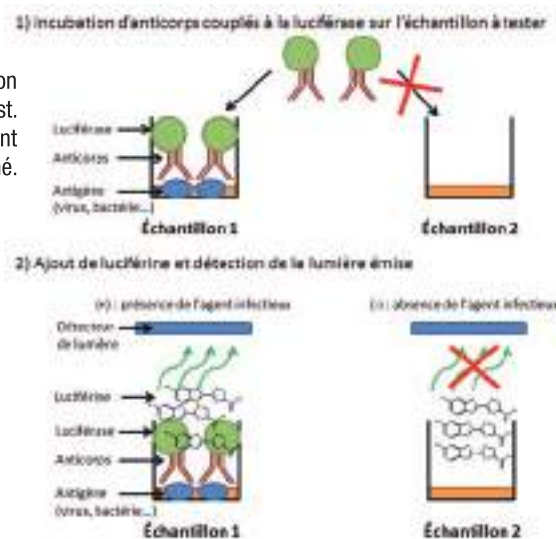
Applications en biologie

Représentation schématique d'un protocole d'immunotest. La détection d'un signal lumineux révèle indirectement la présence de l'agent infectieux recherché.

La bioluminescence et la fluorescence sont exploitées au quotidien pour la recherche en biologie. Par exemple, dans des tests d'immunodétection, la luciférase est utilisée pour détecter la présence d'agents infectieux.

L'utilisation de la protéine GFP a révolutionné la manière d'observer les mécanismes biologiques à l'intérieur d'une cellule ou d'un organisme. En fusionnant par génie génétique le gène de la GFP au gène d'une protéine à étudier, cette dernière devient fluorescente. Il est alors possible de détecter très facilement sa présence pour savoir si tel ou tel gène est fonctionnel ou de suivre la protéine dans son environnement, dans une bactérie, une cellule ou un organisme.

Colonies de bactéries *Escherichia coli* observées en lumière ultraviolette. Les colonies vertes produisent la GFP et démontrent la présence d'un gène fonctionnel, alors que les colonies blanches ne possèdent pas le gène fonctionnel.



Évoquer la lumière en peinture

Comment évoquer la lumière sans disposer d'une source lumineuse ? C'est le défi relevé par les peintres.

Technique du clair-obscur

Le clair-obscur permet de donner une impression de relief en jouant sur les zones d'ombre et de lumière. Ce procédé est connu dès le début de la Renaissance. Le Caravage en a développé la pratique.

Le **luminisme** accentue la lumière dans certaines parties du tableau, afin de rendre des couleurs chaudes.

Par une utilisation d'une lumière directe et sans diffusion, le **ténébrisme** accentue les contrastes ombre-lumière pour conduire à un effet plus sombre. Les volumes s'en détachent d'avantage.



Joseph Wright of Derby, *The Orrery*, vers 1766, Derby, Museum and Art Gallery.

« une lumière unie, qui arrive de côté sans reflet, comme dans une chambre aux murs noirs, éclairée par une fenêtre ; les ombres très sombres et les lumières très claires donnent du relief à la peinture »

Mancini, *Considerazioni sulla pittura*, 1619-1621.



Le Caravage, *Le Souper à Emmaüs*, 1606, Milan, Pinacothèque de Brera.

Paul Signac, *La calanque*, 1906, Bruxelles, Musées royaux des Beaux-Arts de Belgique.

Georges Seurat (1859–1891) a élaboré les principes du pointillisme après avoir lu différents ouvrages scientifiques sur la lumière. La technique repose sur l'addition et la soustraction des couleurs.

Dans la « Série des Cathédrales » de Rouen, Claude Monet parvient à retranscrire différentes conditions d'éclairage, selon la position du soleil ou l'humidité de l'atmosphère.



1- Claude Monet, *Le Portail, brouillard matinal*, vers 1892, Essen, Musée Folkwang.

2- Claude Monet, *Le Portail, brouillard matinal*, vers 1892, Essen, Musée Folkwang.

3- Claude Monet, *La Cathédrale de Rouen*, effet de soleil, fin de journée, vers 1892, Paris, Musée Marmottan Monet.



La lumière dans les ex-voto

Sur de nombreux ex-voto peints, la lumière qui émane du Ciel est utilisée pour symboliser la représentation du protecteur céleste à qui est dédié le tableau.

Un ex-voto est un objet placé dans un lieu de culte en remerciement d'un vœu exaucé. L'ex-voto peint figure à la fois le ou les donateurs, représentés la plupart du temps dans la circonstance du danger encouru – maladie, accouchement, chute, accident de la circulation ou du travail, naufrage, etc –, et le protecteur céleste à qui est dédié le tableau, très souvent la Vierge Marie.

Personnage céleste entouré de lumière



N-D des Lumières.

© B. Cousin

Lorsque le personnage céleste est la Vierge du sanctuaire de Notre-Dame des Lumières (dans le Vaucluse), à l'aura lumineuse s'ajoutent parfois de petites flammes.

Figuré souvent comme une apparition au milieu des nuées, le personnage céleste de l'ex-voto est généralement entouré d'une aura lumineuse qui exprime sa puissance protectrice.



© B. Cousin

N-D de la Galine Marseille.

Intervention du saint matérialisée par un rayon lumineux



© B. Cousin

N-D de Consolation Hyères.

L'ex-voto peint est le récit, en une seule image, d'une petite histoire : l'homme ou la femme qui a remis le tableau s'est trouvé dans une situation de danger grave, dont il estime avoir été préservé par une intervention céleste. Un des moyens que le peintre d'ex-voto emploie pour figurer cette protection est de représenter un rayon lumineux émanant du personnage céleste et descendant sur le personnage humain en danger.

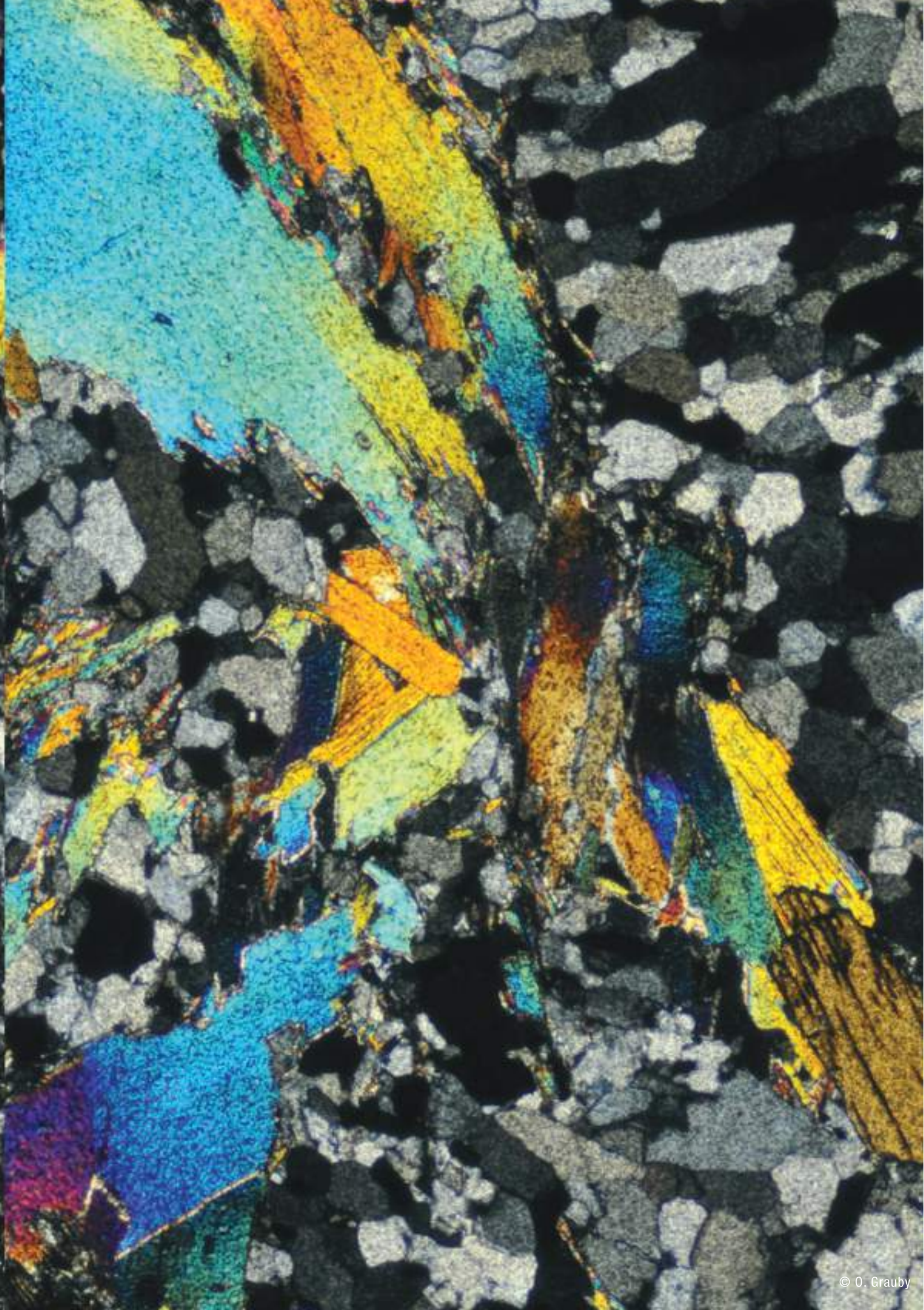
Une lumière venue du ciel

Sur l'ex-voto marin, dans un ciel sombre de tempête, l'aura lumineuse autour de la Vierge éclaire jusqu'à la scène humaine. Au XIX^e siècle, sur quelques ex-voto marins, le personnage céleste n'est plus représenté, mais une légende au bas du tableau précise bien qu'il s'agit d'un ex-voto. A défaut de la représentation de la Vierge dans le ciel, une simple lueur venant des nuées peut alors signifier son intervention.



© B. Cousin

N-D Garoupe Antibes.



Pôle 3 : Transporter et transmettre

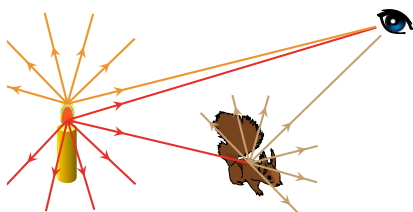
Ce pôle montre comment on peut transporter et transmettre la lumière d'un lieu à un autre, soit naturellement, soit à l'aide de technologies de pointe ; il montre l'intérêt de maîtriser ce transport dans ces différentes composantes ; il évoque enfin la transmission de la lumière en architecture. C'est dans ce pôle que nous présentons comment la lumière se propage suivant le milieu ou la nature du faisceau : une bonne occasion pour comprendre les mirages, la réfraction ou le transport d'information par fibre optique...

Photo page de gauche : La polarisation de la lumière est utilisée en minéralogie. Un échantillon de roche est préparé pour obtenir une lame mince quasi transparente de 30 μm d'épaisseur puis il est observé au microscope en lumière polarisée. Les propriétés de biréfringence de nombreux cristaux permettent de déterminer quantitativement les minéraux contenus dans la roche.

Optique géométrique

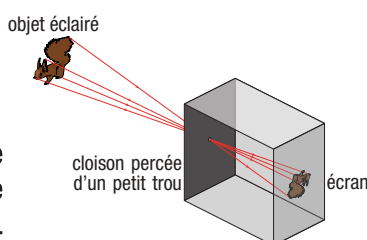
En optique géométrique, la lumière est modélisée sous forme de rayons lumineux. Cela permet de comprendre le fonctionnement des miroirs et des lentilles.

Les rayons lumineux



Les sources de lumière émettent des rayons lumineux dans toutes les directions et les objets éclairés renvoient ces rayons dans certaines directions. Nous voyons les sources et les objets éclairés par les rayons qui atteignent notre œil.

L'**ombre géométrique** d'un objet éclairé par une source de lumière est la zone où les rayons issus de la source ne passent pas, car interceptés par l'objet.

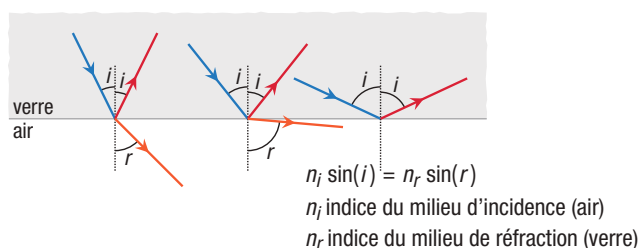


La chambre noire, *camera obscura*, ancêtre de l'appareil photo, met en évidence la propagation rectiligne des rayons lumineux.

34

En optique géométrique, les milieux transparents sont caractérisés par leur indice, un nombre sans dimension qui est relié à la vitesse de la lumière dans ce milieu : plus l'indice est élevé, plus la lumière va lentement dans le milieu. L'indice du vide est fixé à $n=1$; l'eau a un indice d'environ $n=1,3$; le verre ordinaire a un indice compris entre $n=1,4$ et $n=1,9$.

Lorsqu'un rayon lumineux atteint l'interface entre deux milieux, une partie de la lumière est **réfléchi**e et une partie est **réfractée**, c'est-à-dire qu'elle pénètre dans le second milieu en changeant de direction. Les **lois de Snell et Descartes** décrivent la géométrie des rayons réfléchis et réfractés.



Loi de la réflexion : les angles formés par les rayons incident et réfléchi par rapport à la normale (pointillés) sont égaux : angle i .

Loi de la réfraction : les angles formés par les rayons incident, angle i , et réfracté, angle r , par rapport à la normale sont reliés aux indices des milieux par la formule des sinus donnée sous le schéma.

Réflexion totale : lorsque l'indice du milieu incident est supérieur à l'indice du milieu réfractant, l'angle r est supérieur à i . Pour une valeur de i assez grande, r atteint 90° , et la lumière n'est plus réfractée : elle est complètement réfléchi.

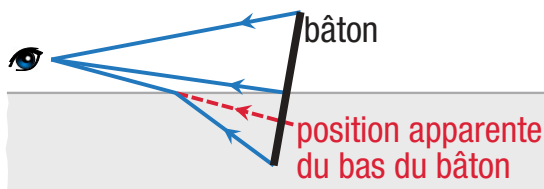
Manipulations

Le Sténopé (ou chambre noire)

Le visiteur place sa tête sous le drap. Un écran diffusant permet d'observer par l'arrière l'image qui se forme lorsque la lumière perçue ne passe qu'à travers un petit trou de la chambre. L'observateur remarque que l'image se forme à l'envers et est d'autant plus nette que l'objet est loin et bien éclairé. Un diaphragme réglable permet d'agrandir la dimension du trou et d'observer ainsi l'effet sur la netteté de l'image.



© F. Amat



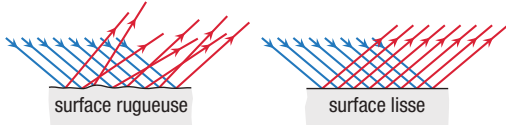
La réfraction des rayons lumineux donne l'illusion qu'un bâton rectiligne plongé dans l'eau est brisé : le dessin montre que le bas du bâton semble plus relevé qu'il ne l'est en réalité.



© Brocken Inaglory

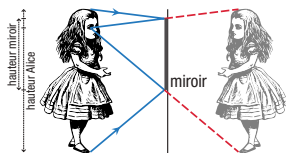
Phénomène de réflexion totale à l'interface air/eau.

Miroirs



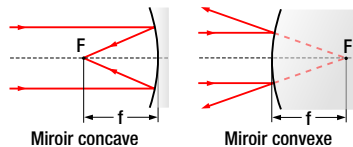
Les surfaces rugueuses, comme le papier, renvoient des rayons incidents parallèles dans toutes les directions : la lumière réfléchi est vue selon plusieurs directions et ne peut pas former une image. Au contraire, une surface plane et lisse produit des rayons réfléchis parallèles : la lumière réfléchi n'est vue que dans une seule direction et peut former une image.

Les **miroirs** sont conçus pour favoriser une réflexion totale de la lumière sur une surface lisse, de telle façon que les rayons réfléchis forment une image. En général, la surface réfléchissante est un métal minutieusement poli, souvent déposé en couche très mince sur un support en verre.



Compte-tenu de la géométrie des rayons lumineux réfléchis, le miroir d'Alice doit faire au moins la moitié de sa hauteur pour qu'elle puisse se voir en pied. Pour passer au travers, c'est une autre histoire...

Un miroir concave fait converger les rayons lumineux réfléchis, alors qu'un miroir convexe les fait diverger.

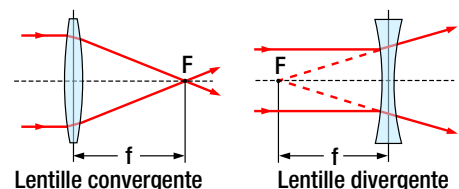


Les miroirs ne sont pas nécessairement plans et leurs propriétés optiques changent en fonction de leur forme globale.

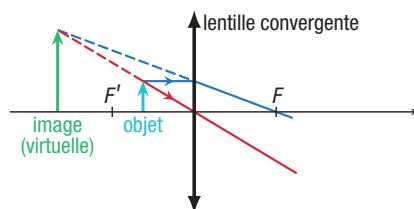
Les **lentilles** sont des milieux transparents conçus pour favoriser la réfraction des rayons incidents. La forme d'une lentille et l'indice du milieu sont choisis pour obtenir des propriétés optiques spécifiques.

Il existe deux grands types de lentilles. Les **lentilles convergentes** font converger des rayons incidents parallèles en un point F, le foyer de la lentille. Les **lentilles divergentes** font diverger des rayons incidents parallèles, qui semblent tous venir d'un point F. La longueur f , appelée **distance focale**, est une caractéristique essentielle de la lentille.

Lentilles



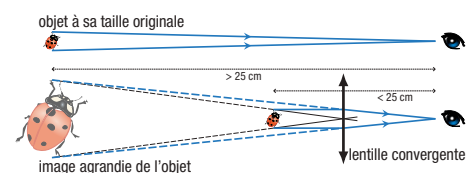
© T. Masson



Une loupe est une lentille convergente : le schéma montre que pour un objet situé entre la lentille et le foyer, l'image est reculée et agrandie. Cette image est virtuelle : elle ne peut pas être projetée sur un écran.

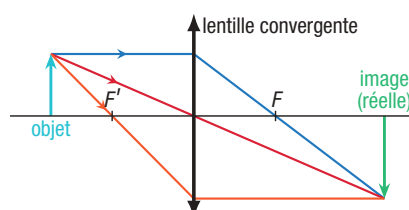
Pour voir les détails d'un objet, on l'approche de notre œil. Mais on ne peut pas aller en deçà de la distance minimale d'accommodation de l'œil, le *punctum proximum*, d'environ 25 cm.

L'image d'un objet produite par une loupe se situe en arrière de celui-ci et cette image est plus grande : l'œil accommode sur l'image, qui peut se trouver au delà de 25 cm. Comme l'image est agrandie, il voit plus de détails : c'est l'**effet grossissant des loupes**.



Sans la loupe, l'œil ne peut pas s'approcher de l'objet à moins de 25 cm. Avec la loupe, l'œil accommode sur l'image virtuelle, plus grande que l'objet : plus de détails sont visibles.

Notre Dame de la Garde à Marseille vue à travers une loupe : le schéma montre que pour un objet éloigné, au delà du foyer F, l'image est retournée verticalement. Cette image est réelle : elle peut être projetée sur un écran.



© T. Masson

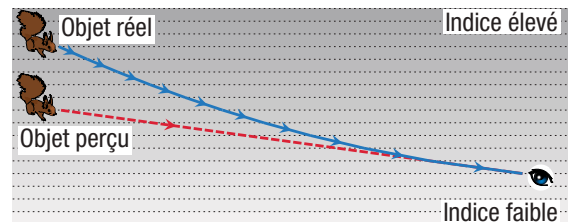
Courber les rayons lumineux

L'optique géométrique explique comment, dans certaines situations spécifiques, la lumière ne suit plus des lignes droites.

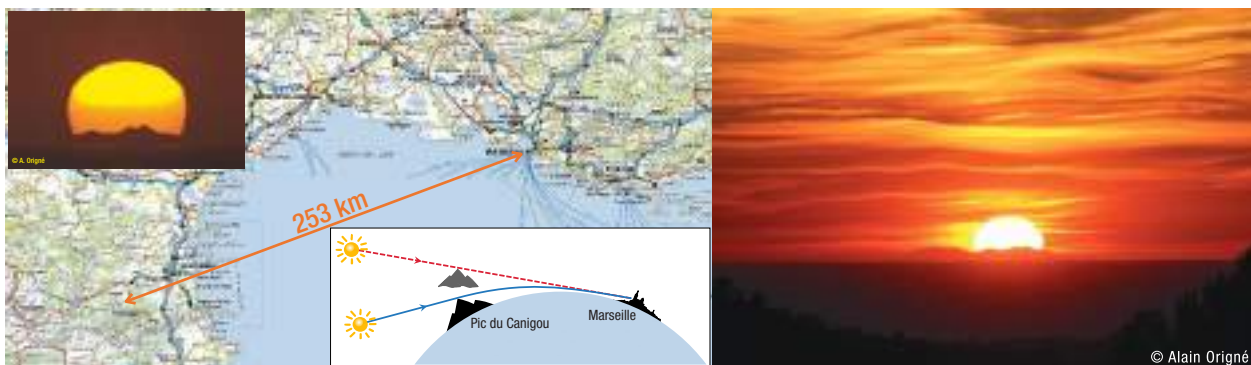
Réfraction et mirages

Dans un milieu où l'indice n'est pas homogène, la loi de la réfraction montre qu'un rayon lumineux ne suit pas nécessairement une ligne droite.

L'indice de l'air dépend de la température, de la pression, du taux d'humidité et de sa composition : par exemple, plus l'air est froid, plus son indice est élevé. Un rayon lumineux traversant des couches d'air dans différents états est alors incurvé.

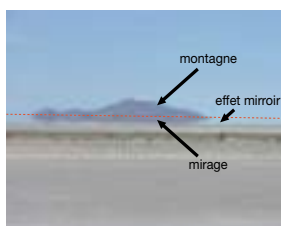


Les différentes couches d'air ont des indices croissant vers le haut : le rayon bleu est incurvé. Notre cerveau prolonge « en ligne droite » les rayons lumineux qui parviennent à l'œil : il croit voir l'objet là où il n'est pas réellement situé.

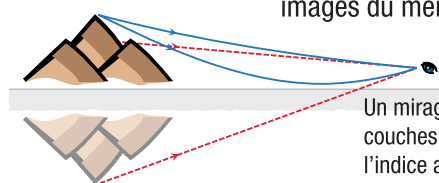


Le Pic du Canigou, dans les Pyrénées, est invisible depuis Marseille car il est sous l'horizon. Cependant, dans certaines conditions pour lesquelles l'indice de l'air est plus élevé dans les basses couches, le sommet est visible depuis des hauteurs de Marseille et de ses environs. Le phénomène est très remarquable deux fois par an, lorsque le soleil couchant est dans l'alignement du Pic du Canigou et de Marseille. Ce phénomène est connu depuis 1808.

Un **mirage** est un phénomène optique qui présente deux images du même objet, dont l'une est souvent inversée.



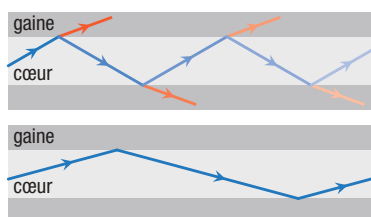
© J. Galvin



Un mirage chaud sur le Grand Lac Salé aux États-Unis : les couches d'air au sol étant plus chaudes que celle en altitude, l'indice au sol est plus faible qu'en hauteur. Un effet miroir se produit, donnant l'impression de la présence d'une nappe d'eau.

La **fibre optique** à saut d'indice guide les rayons lumineux en utilisant le phénomène de réflexion totale : l'indice du milieu dans lequel la lumière se propage est plus élevé que le milieu qui l'entoure et l'angle d'incidence est assez grand. La lumière est ainsi guidée par la fibre optique, même si celle-ci est courbée.

Principe de la fibre optique à saut d'indice : l'indice du cœur est supérieur à celui de la gaine. En haut, le rayon lumineux est à la fois réfléchi et réfracté : il s'atténue dans le cœur. En bas, l'angle d'incidence est tel qu'il n'y a que des réflexions totales : le rayon ne s'atténue pas et peut se propager sur une longue distance.



En télécommunication, les fibres optiques sont utilisées pour transmettre à grand débit des informations codées dans le signal lumineux sur des distances intercontinentales de plusieurs milliers de kilomètres.

Les fibres optiques



© Hedeshian / CC



Manipulations

Fontaine optique

Un rayon lumineux provenant d'un laser placé à l'arrière d'une fontaine transparente, est guidé par le jet d'eau. Le visiteur peut observer la lumière en plaçant sa main sous le jet d'eau. L'eau a un indice optique supérieur à l'indice de l'air. A l'interface eau/air, une réflexion totale a lieu permettant ainsi au rayon lumineux de suivre le parcours de l'eau.



© E. Salançon

Chaîne hi-fi spectrale

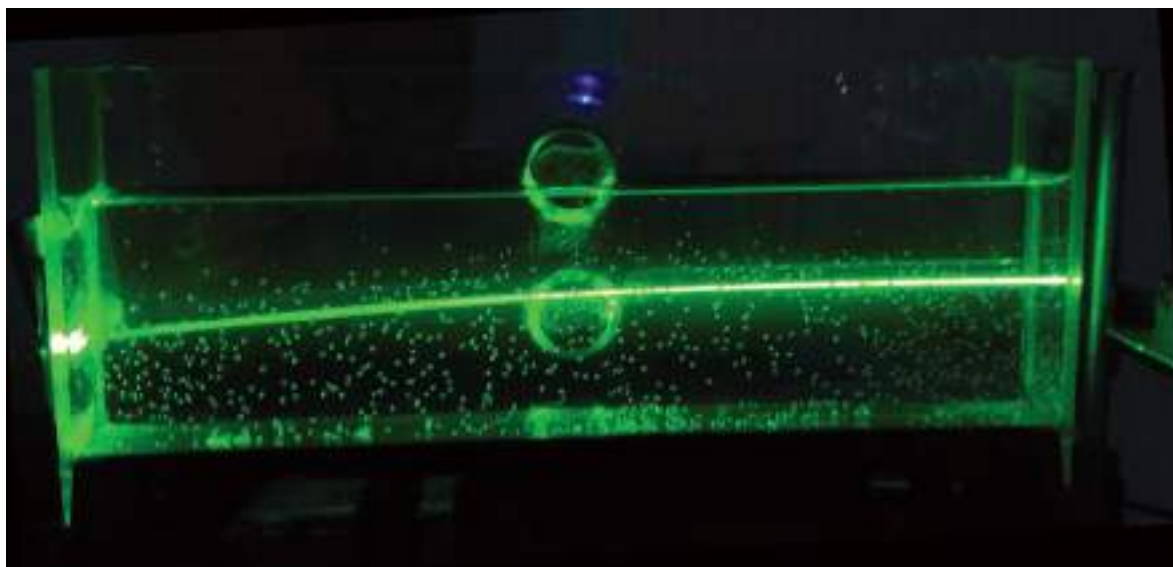
Un faisceau laser modulé (en amplitude) par un signal sonore est détecté par un photodétecteur. Le signal reçu est démodulé et amplifié avant d'alimenter des haut-parleurs. Le visiteur peut passer la main entre l'émetteur et le récepteur, il coupe alors le faisceau lumineux, donc le son émis. Le principe de modulation/démodulation est utilisé avec les ondes radio mais aussi dans les fibres optiques, en télécommunication dans l'infrarouge.



© E. Salançon

Mirage

Un faisceau laser pénètre dans un bain de sucre de canne et d'eau dans lequel la *fluorescéine*, un milieu diffusant, a été mélangé. La densité du liquide change de façon progressive de sorte que l'indice optique évolue sur la hauteur du récipient. Le faisceau se courbe par réfraction.



© F. Amat, expérience : M. Vedel

Optique ondulatoire

L'optique ondulatoire décrit la propagation de la lumière en tant qu'onde.

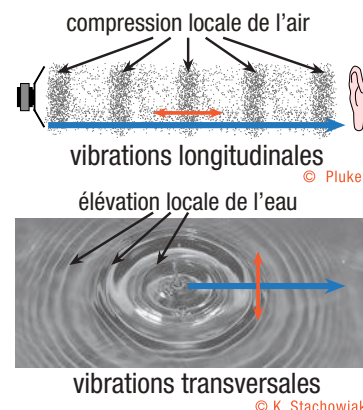
Les ondes

Une onde mécanique est une perturbation locale autour d'une valeur moyenne des propriétés d'un milieu. Elle se propage de proche en proche à une vitesse qui dépend du milieu et de la nature de cette perturbation. Une onde peut transporter de l'énergie sans déplacer de matière.

Les **ondes longitudinales** sont des vibrations dans la direction de propagation de l'onde tandis que les **ondes transversales** sont des vibrations perpendiculaires à la direction de propagation.

En haut, une onde sonore est longitudinale : la vibration en orange se fait parallèlement à la propagation en bleu.

En bas, une onde à la surface de l'eau est transversale : la vibration est perpendiculaire à la propagation.



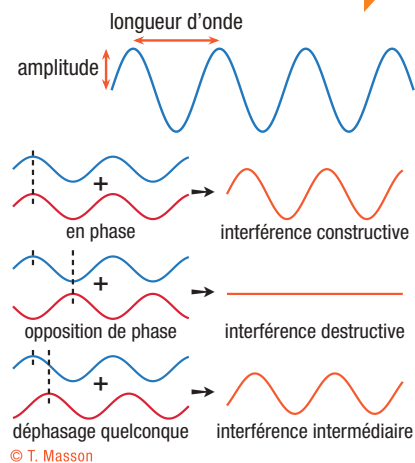
En optique ondulatoire, la lumière est décrite comme une onde transversale se propageant à la vitesse de $c = 299\,792\,458$ mètres par seconde dans le vide.

Le **principe de superposition** : deux ondes, ou plus, peuvent se combiner pour produire une onde résultante. Réciproquement, toute onde, même compliquée, se décompose en **ondes simples** de longueurs d'onde déterminées.

Dans de nombreuses situations, ce principe justifie de pouvoir analyser un problème avec une onde simple à une longueur d'onde fixée.

Une **onde simple** a la forme caractéristique d'une fonction sinusoïdale. On peut lui associer une **longueur d'onde**, qui dans le cas de la lumière correspond à une couleur de l'arc-en-ciel, et une **amplitude**, qui est liée à l'intensité de la lumière.

Propriétés des ondes



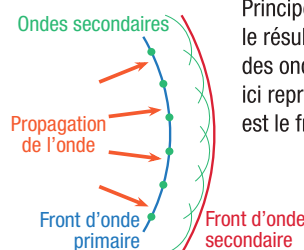
Les **interférences** : lorsque deux ondes simples de même longueur d'onde se superposent, l'onde obtenue dépend du déphasage relatif des ondes, qui correspond au décalage relatif des maxima.

Exemples d'interférences de deux ondes simples de même longueur d'onde et de même direction pour différents déphasages relatifs, indiqués par les traits en pointillés. L'interférence constructive renforce l'intensité de l'onde, alors que l'interférence destructive l'annule.

À cause des interférences, deux ondes lumineuses de même couleur peuvent s'annuler et donc « produire du noir ».

Principes de l'optique ondulatoire

Le **principe de Huygens-Fresnel** stipule que tout point de l'espace qui reçoit une onde de lumière émet à son tour une onde sphérique secondaire de même longueur d'onde, de même amplitude et de même phase. Les interférences des ondes sphériques secondaires permettent d'expliquer de nombreux phénomènes lumineux.



Principe de Huygens-Fresnel : le résultat de l'interférence des ondes secondaires, ici représentées en nombre fini, est le front d'onde secondaire.

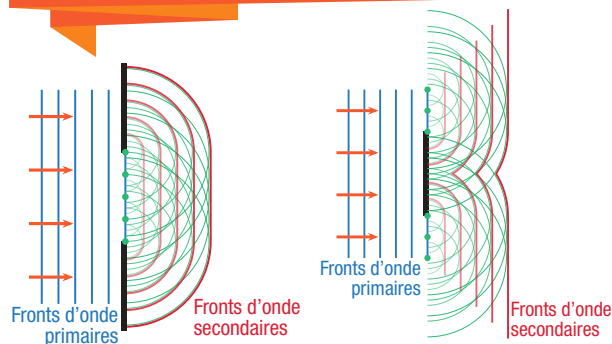
Le modèle des ondes de lumière de l'optique ondulatoire est issu des travaux de Fresnel vers 1815, qui s'appuyait sur des idées de Huygens du XVII^e siècle. Ce modèle décrit la propagation de l'onde lumineuse qui est identifiée à une onde mécanique transversale de déformation de l'éther, un fluide supposé remplir tout l'espace.

La théorie ondulatoire complète de la lumière a été élaborée par Maxwell vers 1865 dans le cadre de l'électromagnétisme. Cette théorie confirme et complète le modèle de Fresnel et permet de décrire aussi l'interaction de la lumière avec la matière (pour les phénomènes non quantiques).

La diffraction de la lumière

L'optique ondulatoire permet d'expliquer comment la lumière interagit avec des obstacles de petite taille pour donner des images surprenantes.

Contourner l'obstacle : la diffraction



Lorsque le front d'onde d'une onde lumineuse rencontre un obstacle, le principe de Huygens-Fresnel permet de décrire l'infléchissement de l'onde derrière l'obstacle : c'est le phénomène de **diffraction**.

Une **figure de diffraction** est le résultat, vu sur un écran, de l'interférence des ondes secondaires produites par un obstacle. La forme de l'obstacle éclairé par une onde plane détermine la forme du front d'onde secondaire et permet de produire des figures de diffraction caractéristiques de ces obstacles.

Passant par un trou ou rencontrant un obstacle, l'onde de lumière n'est pas nulle dans « la zone d'ombre » décrite par l'optique géométrique.

On peut « lire » dans une figure de diffraction la géométrie de l'obstacle : à gauche, figure de diffraction obtenue par un obstacle carré ; à droite par un obstacle hexagonal.

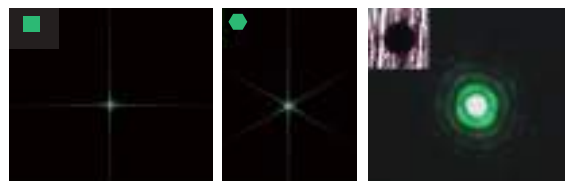


Figure de diffraction de la lumière par un trou de 90 µm de diamètre, observée à une distance de 40 cm du trou.



Figure de diffraction de deux cheveux croisés éclairés par une onde plane.



Figure de diffraction d'un cheveu éclairé par une onde sphérique : c'est son ombre physique.

La forme de l'onde, plane ou sphérique, détermine aussi la forme des figures de diffraction. Pour une onde sphérique, les rayons lumineux semblent provenir d'un point source et induisent l'**ombre physique** de l'obstacle, différente de l'ombre géométrique car elle est modulée par des franges d'interférence.

Réseau d'obstacles

Lorsque les obstacles, trous ou occultations, se répètent régulièrement dans l'espace, les figures de diffraction révèlent cette régularité et les symétries.

Utilisée avec des rayons X, cette même méthode permet de déterminer la structure d'un cristal.

Voir annexe 2 page 92.

Un **réseau de diffraction à transmission** est constitué d'un très grand nombre de fentes parallèles régulièrement disposées (plusieurs centaines de fentes par millimètre). Un tel réseau produit des figures d'interférences semblables à celles de l'expérience des deux fentes d'Young. Grâce au nombre élevé de fentes, les maxima de brillance sont beaucoup plus nets et plus étroits.

Éclairée en lumière blanche, l'expérience des deux fentes d'Young montre une dispersion des couleurs. Lorsque le nombre de fentes augmente, la dispersion est plus prononcée.

Un réseau de diffraction disperse la lumière selon les longueurs d'onde, tout comme un prisme.



(a) et (b) : expérience des fentes d'Young pour deux lumières monochromatiques verte et rouge produisant des figures d'interférence différentes. (c) : en lumière polychromatique, la frange centrale est blanche et en s'éloignant du centre la dispersion des couleurs est de plus en plus nette.

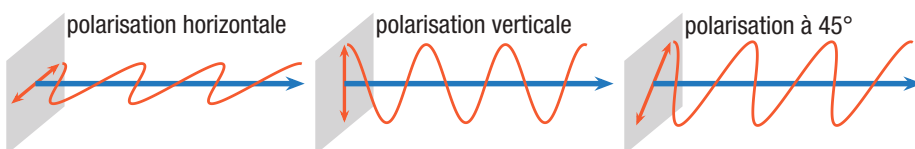
Dans un **réseau de diffraction à réflexion**, les fentes sont remplacées par des lignes réfléchissantes : les phénomènes observés sont de même nature. Par exemple, la dispersion de la lumière est visible par réflexion sur CD-ROM, dont le réseau de sillons en fait un réseau de diffraction à réflexion.

La polarisation de la lumière

L'onde de lumière peut être polarisée, ce qui induit des effets étonnants et utiles.

Ondes polarisées

Pour des ondes transversales, comme les ondes de lumière, la direction des vibrations peut être quelconque dans le plan perpendiculaire à la propagation : c'est la **direction de polarisation** de l'onde. En ce qui concerne la lumière, c'est la direction d'oscillation du champ électrique qui définit la direction de polarisation. **Voir annexe 6 page 94.**



Différentes directions de polarisation qui restent fixes lorsque l'onde progresse : ce sont des **polarisations rectilignes**.

Les sources de lumière usuelles produisent de la lumière non polarisée : dans un faisceau lumineux, toutes les directions de polarisation sont présentes de façon aléatoire.

La diffusion de la lumière par l'atmosphère polarise partiellement la lumière du Soleil. De même, la lumière réfléchie par une surface non métallique, comme l'eau ou le verre, est partiellement polarisée dans la direction parallèle à la surface réfléchissante.

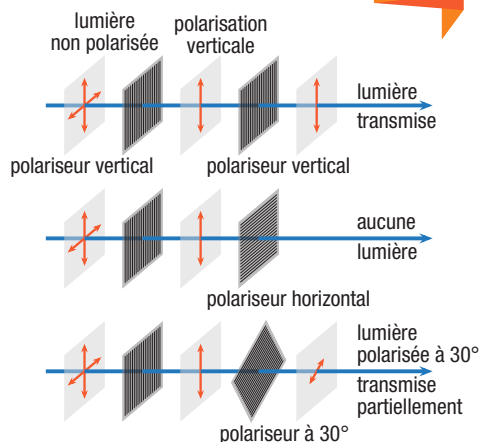
Un **polariseur**, ou verre polarisant, est un système optique qui ne laisse passer que la lumière polarisée dans une direction préférentielle.

Polariseurs

40

La lumière non polarisée est d'abord polarisée verticalement par le premier polariseur. Selon l'orientation du second polariseur, elle est transmise intégralement, absorbée ou transmise partiellement.

À la sortie du premier polariseur, la lumière est polarisée verticalement. Selon l'orientation du second polariseur, elle est transmise intégralement, absorbée ou transmise partiellement.



Les lunettes de soleil à verres polarisés verticalement absorbent une grande partie de la lumière réfléchie sur la mer ou sur la neige, évitant ainsi l'éblouissement. Les verres polariseurs sont aussi utilisés en photographie pour atténuer les reflets des surfaces non métalliques.



© E. Salançon



© E. Salançon

Deux photographies d'un bord de mer : À gauche, sans filtre polarisant, à droite, l'orientation du filtre polarisant est choisie pour réduire les reflets du Soleil.

Matière et ondes polarisées

Selon leurs propriétés physiques ou chimiques, certains matériaux peuvent avoir des effets sur la lumière polarisée qui les traverse.

Dans les **matériaux biréfringents**, l'indice de réfraction dépend de la direction de la polarisation de la lumière.

Le **pouvoir rotatoire** est la propriété qu'ont certains composés de faire tourner la polarisation de la lumière. Selon le sens de rotation, les composés sont dextrogyres, comme le saccharose, ou lévogyres, comme le fructose.

© M. Natsan, L. Wiggler, H. Bilar



La molécule limonène a deux arrangements différents dans l'espace, reflète l'un de l'autre dans un miroir : l'un est lévogyre et donne l'arôme de citron, l'autre est dextrogyre et donne l'arôme d'orange. La lumière polarisée permet de les distinguer.

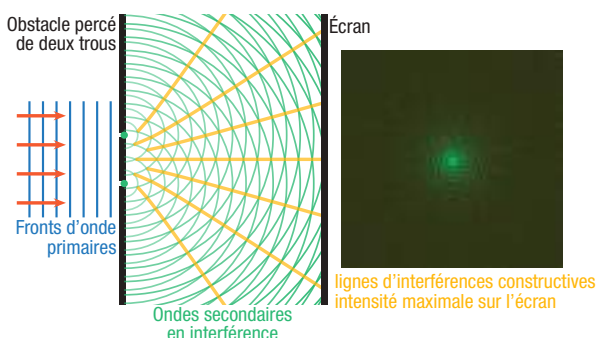


Manipulations

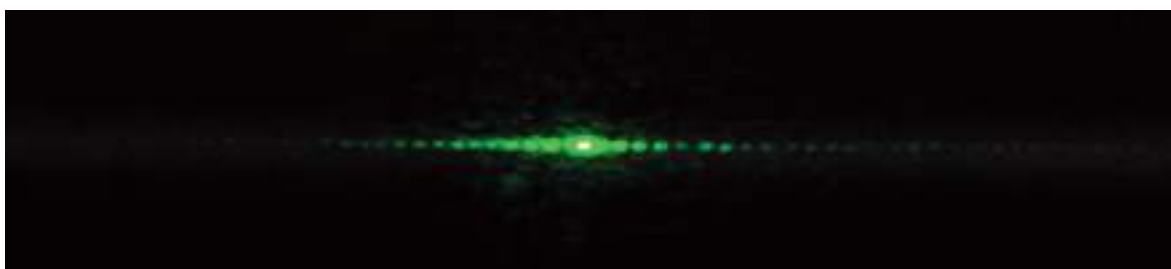
Les fentes d'Young - voir page 13

L'image produite par l'éclairement d'une double fente par une diode laser est composée :

- de la figure de diffraction par une fente : avec la tache centrale deux fois plus grande que les lobes qui l'entourent,
- de la figure d'interférences liée à la présence de deux sources (les traits régulièrement espacés et plus fins) qui module la première.



Expérience des deux trous d'Young : l'onde primaire induit deux ondes sphériques secondaires qui interfèrent sur l'écran, d'où l'alternance des zones claires d'interférences constructives et des zones sombres d'interférences destructives. Sur l'image simulée à droite, la distance entre deux zones éclairées dépend de la longueur d'onde, de la distance entre les trous et de la distance entre les trous et l'écran.



© E. Salançon

Diffraction par un réseau cristallin : la lumière aide « à voir » et « à comprendre »

Ici, le visiteur peut éclairer une ou plusieurs diodes lasers devant lesquelles sont positionnées des grilles micrométriques de formes et de tailles différentes. L'image en microscopie optique du réseau « réel » - la forme de la grille - est placée à côté du bouton poussoir. Le visiteur peut essayer de pronostiquer la forme de la figure de diffraction avant d'appuyer sur le bouton ! Hexagones, carrés, trous... : toutes les formes ou presque qui permettent de découvrir les axes de symétrie.



© E. Salançon



© E. Salançon

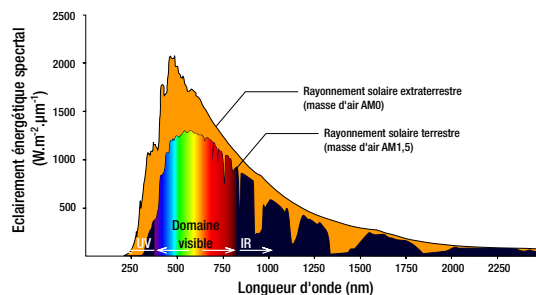
Percevoir la couleur

La lumière qui nous entoure produit une impression de couleur : c'est un mélange de différentes longueurs d'onde de lumières monochromatiques.

La distribution spectrale de la lumière

La **lumière monochromatique** est une onde lumineuse de longueur d'onde précise. Il faut des conditions particulières pour produire ce type de lumière : une source spécifique, comme un laser, ou une source avec un filtre monochromatique.

La lumière qui nous entoure est **polychromatique** : c'est une superposition continue de lumières monochromatiques. Une telle lumière est caractérisée par sa **distribution spectrale** : c'est une courbe qui indique la quantité de lumière en fonction de la longueur d'onde. La **lumière blanche** est une distribution spectrale homogène dans le domaine visible.



La distribution spectrale du Soleil dans l'espace (AM0) et sur Terre (AM1,5) : l'atmosphère absorbe une partie de la lumière dans certaines fréquences. Vu de l'espace, le Soleil est blanc, alors que vu de la Terre, il paraît jaune.

La couleur d'un objet est déterminée par la distribution spectrale de la lumière visible qui parvient à notre œil.

Reproduire la couleur

42

Dans la pratique, il existe deux méthodes essentielles pour produire la couleur.

La **synthèse soustractive** enlève des parties du spectre à la lumière blanche (absorption) pour créer une distribution spectrale colorée. C'est la méthode utilisée pour les objets courants, par dépôt de pigments, teintures, peintures, encres...

La **synthèse additive** compose une distribution spectrale de lumière visible en combinant des lumières presque monochromatiques. C'est la méthode utilisée dans les écrans de téléviseurs et d'ordinateurs.

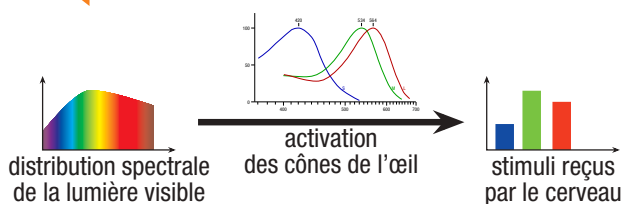


Les peintres élaborent leurs couleurs en mélangeant des pigments dans un liant (huile, émulsion acrylique...).



De très près, un écran apparaît comme une trame régulière de lumières rouge, verte et bleue. De loin, l'œil perçoit des couleurs variées par synthèse additive.

Un espace à trois paramètres



Le cerveau reçoit des stimuli de couleur transmis par seulement trois types de photorécepteurs – cônes de la rétine. Une bonne partie de l'information contenue dans une distribution spectrale de la lumière visible est donc ignorée.

La vision humaine peut confondre plusieurs distributions spectrales de la lumière visible.

De telles distributions spectrales correspondent à des couleurs **métamères** (ou **homochromes**) : la sensation du vert peut provenir d'un vert du spectre visible (vers 530 nm) ou d'un mélange de bleu et de jaune.

En 1931, l'espace possible de toutes les couleurs perçues par l'œil humain a été normalisé sous la forme d'un diagramme à trois paramètres : l'intensité (la **luminance**) est caractérisée par un paramètre et la **chromaticité**, la couleur rapportée à une luminance de référence, par deux paramètres.

Numériser la couleur

En informatique, la couleur est codée par des nombres à des fins de traitement et de reproduction.

Les systèmes d'encodage

Vue très rapprochée d'un écran d'ordinateur qui montre le rendu trichromique (RVB) de l'image.



© T. Masson

Les systèmes d'encodage des couleurs en informatique reposent sur les synthèses additive (écran, projection) et soustractive (impression) basées sur un **nombre réduit de couleurs primaires**.

Le **système de codage RVB** utilise la synthèse additive de trois couleurs primaires : le rouge, le vert et le bleu. Ce système est utilisé par les écrans d'ordinateurs et de téléviseurs. L'intensité des couleurs primaires est codée par un nombre entier entre 0 et 255 : cela permet d'atteindre plus de 16 millions de couleurs.

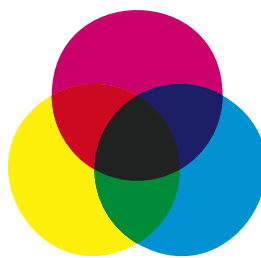
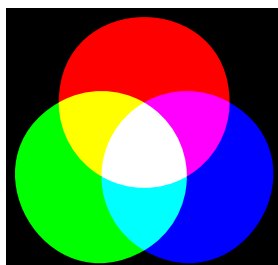


Vue très rapprochée d'un document imprimé dans le système CMJN. On distingue des taches régulières plus ou moins grosses des quatre encres de base : cyan, magenta, jaune et noir.

Le **système de codage CMJN** utilise la synthèse soustractive de trois couleurs primaires, le cyan, le magenta et le jaune, auquel on ajoute le noir (quadrichromie). Ce système est utilisé dans l'impression de documents numériques. L'intensité des quatre couleurs primaires est donnée en pourcentage.

D'autres systèmes de codage sont adaptés à certains besoins. Par exemple, le **système de codage TSL** (teinte, saturation, luminosité) permet de coder les dégradés de couleur : c'est un exemple de **système ordonné de couleurs**. La teinte est donnée par un angle en degrés ; la saturation et la luminosité en pourcentages.

Avec trois éclairages rouge, vert et bleu, il est possible de créer une grande gamme d'effets de couleurs par synthèse additive (système RVB). Le blanc est obtenu par mélange des trois couleurs : la lumière qui en résulte sature les trois cônes de l'œil, d'où une impression de « blanc », bien que la distribution spectrale résultante ne soit pas homogène dans le visible !



Avec les trois couleurs primaires cyan, magenta et jaune, il est possible de créer une grande gamme d'effets de couleurs par synthèse soustractive. Lorsque les trois couleurs sont présentes, la lumière qui en résulte paraît « sans couleur » pour l'œil humain, mais elle est encore grise : le système CMJN ajoute de l'encre noire pour remédier à ce problème.

Nos scanners, appareils photo argentiques ou numériques, imprimantes, écrans, vidéo-projecteurs... essaient de rester fidèles aux couleurs. Mais aucun de ces appareils de perception ou de reproduction de la couleur ne peut couvrir la totalité du diagramme de chromaticité de l'œil humain.

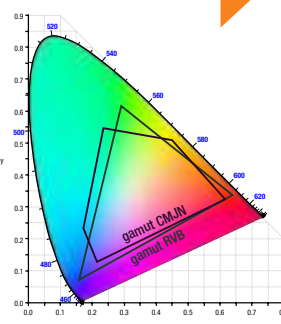
Le **gamut** est l'espace chromatique couvert par un appareil : il dépend du système d'encodage des couleurs, mais aussi de choix technologiques, tels que les couleurs primaires des pixels élémentaires et des encres, le support d'impression, ou encore la sensibilité chromatique des capteurs... Gamut « moyen » des systèmes RVB et CMJN : chaque appareil utilisant un de ces systèmes de codage a un gamut spécifique proche de ceux-ci.



Afin d'uniformiser le rendu des couleurs sur Internet, l'**espace de couleur normalisé sRVB** a été défini en 1996 pour les écrans d'ordinateurs : son gamut est presque identique à celui du système RVB.

Un document imprimé peut avoir des couleurs très différentes de sa version sur écran. De l'acquisition à la reproduction finale, les professionnels de la publication assistée par ordinateur utilisent le **profil de couleur** (profil ICC, *International Color Consortium*) de chaque appareil de la chaîne graphique pour uniformiser le rendu des couleurs.

Gamut et profil couleur

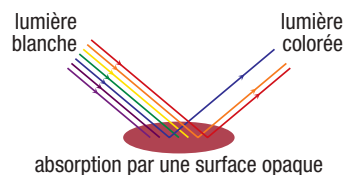


Du blanc à la couleur

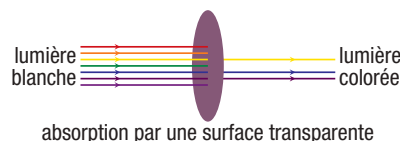
La lumière interagit avec la matière, ce qui modifie sa distribution spectrale et donc sa couleur. Quatre mécanismes fondamentaux sont à l'œuvre.

L'absorption de la lumière

Après absorption par une surface opaque ou transparente, la distribution spectrale réfléchie ou transmise est modifiée, donnant l'impression d'une lumière colorée.

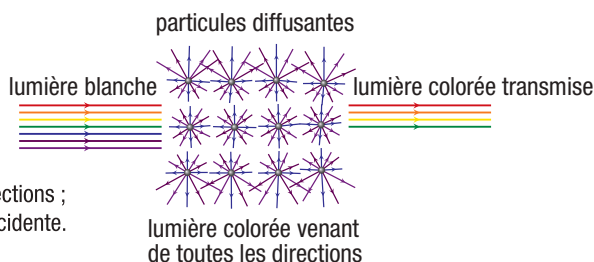


Certaines composantes du spectre de la lumière peuvent être **absorbées** par un corps opaque ou transparent. La couleur des objets les plus courants est produite de cette façon lorsqu'ils sont éclairés par une lumière blanche. Le noir est l'absorption totale de la lumière du domaine visible. Un objet noir retient donc toute l'énergie du spectre visible et il s'échauffe.



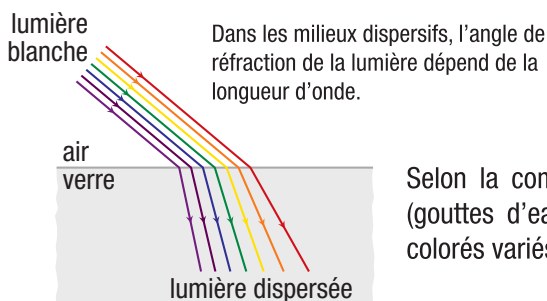
La lumière qui traverse un nuage de particules (comme des gouttes d'eau) ou un gaz (comme l'atmosphère) est déviée dans différentes directions : c'est la **diffusion de la lumière**. La distribution spatiale de la lumière diffusée, homogène ou dans certaines directions, dépend de la longueur d'onde du rayonnement incident et de la taille des particules diffusantes.

La diffusion de la lumière



La lumière diffusée peut sembler venir de toutes les directions ; la lumière non diffusée a une couleur différente de la lumière incidente.

La dispersion par réfraction



Dans les milieux dispersifs, l'angle de réfraction de la lumière dépend de la longueur d'onde.

La **réfraction** de la lumière à l'interface de deux milieux transparents obéit à la loi de Snell-Descartes. Dans certains milieux, l'indice de réfraction, et donc l'angle de réfraction, dépend de la longueur d'onde : les composantes monochromatiques de la lumière sont dispersées dans différentes directions.

Selon la complexité du système optique rencontré par la lumière, naturel (gouttes d'eau) ou artificiel (prisme), la réfraction donne lieu à des effets colorés variés, parfois iridescents.

Les interférences

Comme les phénomènes d'**interférence** sont sensibles à la longueur d'onde, les composantes monochromatiques de la lumière interfèrent de façons différentes lorsqu'elles sont renvoyées par un ensemble régulier d'obstacles séparés par des distances proches de la longueur d'onde du visible (≈ 500 nm). Une lumière polychromatique est réfléchie comme dans un miroir par cet ensemble d'obstacles et produit des couleurs iridescentes très vives. Les plumes d'oiseaux, les ailes de papillon, les CD... forment des réseaux dont les dimensions sont proches des longueurs d'onde du domaine visible. Il en est de même de l'épaisseur des « couches minces » produites par une bulle de savon ou une tache d'huile.

La lumière est doublement réfléchiée aux deux interfaces d'une couche mince. Les deux rayons émergents interfèrent de façon constructive ou destructive en fonction de leur longueur d'onde.





Manipulations

Le papillon

Ce magnifique *Morpho* nous a été donné par Serge Berthier. Placé sous une vitrine avec un éclairage dont on peut changer l'orientation, le visiteur peut admirer les différentes couleurs iridescentes produites par les microstructures présentes sur les ailes du papillon.



© S. Berthier

Les papillons ont des couleurs iridescentes car leurs ailes forment des surfaces microstructurées comme un réseau. Certaines couleurs sont transmises, d'autres réfléchies suivant les angles d'incidence de la lumière indiqués entre parenthèses. La structure de l'aile est visible aux microscopes optique et électronique.

Le coucher de soleil

Un récipient transparent contient une très faible quantité de lait écrémé. Cela produit un milieu diffusant parfait car les tailles de vésicules de graisse (environ 300 nm) présentes dans ce liquide mettent en oeuvre la diffusion de Mie (blanc « partout » comme les nuages) et la diffusion Rayleigh. Lorsque l'observateur regarde le côté du récipient, il comprend que la composante bleue de la lumière diffuse avant la composante rouge qui pénètre plus loin. Les angles de diffusion peuvent aussi dépendre de la longueur d'onde. L'ensemble explique la couleur bleue du ciel produite par un éclairage direct traversant peu d'atmosphère avec le soleil au zénith et la couleur rouge du lever ou du coucher de soleil, par un éclairage rasant traversant une épaisseur plus importante d'atmosphère.



© E. Salançon

Lumière et architecture

Forme et matière : l'architecture interagit avec la lumière par le biais des formes qui composent la ville et les bâtiments.

Urbanisme et lumière du Soleil



fig. 1 Quartier Rotermanni, Tallinn, Estonie. Reflets solaires sur l'espace public.

Les conditions lumineuses des espaces urbains varient en fonction des caractéristiques formelles de la ville, de l'état du ciel ou du moment de la journée. Les **zones ensoleillées**, les **masques**, c'est-à-dire les ombres des bâtiments ou de la végétation, et les **reflets** fabriquent une ambiance lumineuse (fig. 1).

Les principaux paramètres qui agissent sur la lumière naturelle sont l'orientation et la largeur de la rue, la hauteur des bâtiments et les matériaux de leurs façades, ainsi que la place dévolue à la végétation.

En se basant sur des principes géométriques simples, le rayonnement lumineux peut être mis au service de l'architecture. Plusieurs dispositifs couramment utilisés profitent de cette logique :

- le **brise-soleil** permet de se protéger du rayonnement direct en été, lorsque le Soleil est haut, tout en laissant pénétrer la lumière l'hiver, lorsque le Soleil est bas (fig. 2),
- le **puits de lumière** favorise l'éclairage d'espaces profonds sans exposition directe aux rayons du Soleil,
- les dispositifs à **claire-voie**, qui ne laissent passer que quelques raies de lumière, assurent l'entrée de lumière tout en conservant l'intimité,
- le **panneau solaire thermique** permet de chauffer l'eau tandis que le **panneau solaire photovoltaïque** permet de produire de l'électricité.

Géométrie et course solaire



fig. 2 Maison du Brésil à la Cité Internationale Universitaire, Paris, 1956, architecte : Le Corbusier.

© Ignacio Requena

Stratégies lumineuses en architecture



© Ignacio Requena

Au niveau du bâtiment, plusieurs stratégies d'interaction avec la lumière sont possibles.

L'architecture peut **capter** la lumière grâce à l'orientation et l'inclinaison des façades, **transmettre** la lumière en fonction de l'orientation et de la taille des ouvertures ainsi que des matériaux des surfaces intérieures, **distribuer** la lumière selon la répartition des fenêtres et l'aménagement intérieur, **se protéger** de la lumière par la création d'éléments de masque des rayons solaires, ou **contrôler** la lumière par l'éclairage artificiel (fig. 3).

fig. 3 Galerie commerciale Ahlens, Stockholm, Suède, 1964. Impact de l'éclairage artificiel des magasins sur des espaces publics.

Les caractéristiques des matériaux de construction impactent les conditions lumineuses des espaces. Les matériaux **transparents** laissent passer la lumière sans la disperser. Les matériaux **translucides** permettent le passage de la lumière en la diffusant et il est donc impossible de voir à travers. Les matériaux **réfléchissants** renvoient une partie importante de la lumière tandis que les matériaux **phosphorescents** absorbent la lumière du jour et en réémettent dans l'obscurité (fig. 4).

Matériaux et lumière



fig. 4 Chemin de pavement photoluminescent « Van Gogh Path » Pays Bas, 2012, concepteurs : Studio Roosegaarde.

© I. Requena

L'idée de la lumière en peinture

Pour les peintres, la lumière a connu au cours des siècles différentes acceptations. À travers la représentation de la lumière, les peintres nous transportent vers le divin, l'ailleurs et au-delà du visible.

De la Renaissance jusqu'à la Révolution française, la lumière est le véhicule du divin et transmet l'idée de vie éternelle. À partir du XIX^e siècle, les peintres voyageurs célèbrent de nouvelles lumières, avant d'abandonner progressivement la figuration au profit de la seule étude de la perception lumineuse.

La lumière du divin



Gerard van Honthorst, *L'Adoration des Bergers*, 1622, Cologne, Wallraf-Richartz Museum.

À la période moderne, la lumière a une fonction médiatrice entre la Terre et le Ciel à l'exemple de la lumière qui vient apporter la vie éternelle aux martyrs.

Ici, saint François reçoit les stigmates du Christ sous la forme de cinq rayons émanant d'un séraphin.

Dans l'iconographie chrétienne, la lumière est le symbole du divin.

Posé à même le sol d'une étable, l'Enfant Jésus illumine déjà le monde de sa présence et apporte une lumière consolatrice et rédemptrice aux fidèles plongés dans l'obscurité.



Giotto di Bondone, *Saint François d'Assise recevant les stigmates*, vers 1295-1300, Paris, Musée du Louvre.

Pour les romantiques, le renouvellement du paysage passe par l'exploration de nouveaux territoires et d'inquiétantes lumières.

Lumières d'ailleurs



Caspar David Friedrich, *La Mer de glace*, 1823, Hambourg, Kunsthalle.

Comme le montre ce navire prisonnier des glaces, les forces hostiles de la nature sont l'occasion de célébrer l'étrangeté de la lumière nordique dans ce « paysage de tragédie ».

À partir de 1830, les artistes européens embarquent pour l'Afrique pour y découvrir de nouvelles luminosités. Phénomène culturel et artistique majeur, l'Orientalisme encourage les artistes à peindre le chatoiement et la poésie de la lumière africaine, une lumière désormais étudiée pour elle-même puisque le désert n'offre que peu de sujets de représentation.

Gustave Guillaumet, *Le Sahara dit aussi Le Désert*, 1867, Paris, Musée d'Orsay.



Au seuil du visible : vers l'art abstrait



Henri-Edmond Cross, *Les Îles d'or* (Îles de Hyères, Var), 1891-1892, Paris, Musée d'Orsay.

Au début du XX^e siècle, de nombreux artistes abandonnent le sujet figuratif au profit de la seule représentation de la lumière.

Dans cette composition néo-impressionniste, où la touche est fragmentée à la manière d'une mosaïque, le rivage, la mer, les montagnes et le ciel sont ramenés sur un même plan vertical. Grâce aux jeux de transparence et aux reflets étincelants, la lumière confère une dimension décorative et abstraite à ce paysage varois.

Étudiée à travers les reflets venant cogner sur la vitre, la fenêtre se confond avec le châssis du tableau et ne s'ouvre plus sur la représentation du monde mais sur l'immatérialité de la lumière, à l'origine du monde.



Robert Delaunay, *Fenêtres ouvertes simultanément*, 1912, Londres, Tate Modern.



Pôle 4 : Capter et appréhender

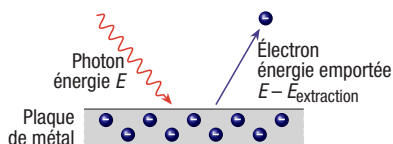
Ce pôle montre comment la lumière est collectée, captée ou perçue à différents niveaux. Après l'émission (Pôle 2) et la transmission (Pôle 3), il s'agit donc de la fin du « voyage » de la lumière. Ce pôle évoque les différents capteurs de lumières, naturels ou artificiels : œil, photographie argentique et numérique, télescopes, collecteurs de photons, détecteurs CCD, caméras rapides...

Capter et détecter des photons

Capter un photon repose sur quelques principes fondamentaux utilisés dans des détecteurs.

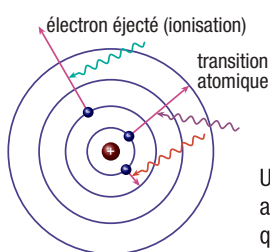
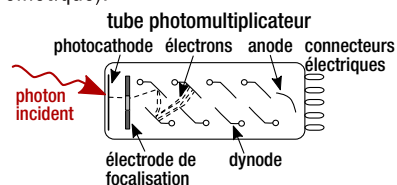
Principes généraux

Au niveau le plus fondamental, un photon est absorbé lors de phénomènes mettant en jeu des particules électriquement chargées dans un système qui gagne de l'énergie. Dans l'effet **photoélectrique**, un photon est absorbé par un électron du métal qui peut alors être éjecté.



Dans l'effet photoélectrique, l'électron qui absorbe le photon est éjecté si ce photon a une énergie supérieure à l'énergie d'extraction, qui est l'énergie nécessaire à l'électron pour sortir du métal. Le reste de l'énergie du photon est convertie en énergie de mouvement (énergie cinétique).

Les **tubes photomultiplicateurs** utilisent l'effet photoélectrique pour détecter la lumière. L'électron éjecté de la photocathode par un photon heurte une dynode et induit des électrons secondaires. L'effet est répété sur plusieurs dynodes pour obtenir un courant électrique détectable à l'anode.



Un atome peut absorber des photons d'énergie spécifique lors d'une transition atomique. Si l'énergie est assez grande, l'électron peut être éjecté de l'atome, qui devient un ion chargé positivement.

Les **atomes** absorbent des photons dont l'énergie est égale à la différence entre deux niveaux d'énergie de l'atome. L'atome ainsi excité peut émettre un nouveau photon de même énergie ou un photon d'énergie inférieure par fluorescence ou phosphorescence, ce qui permet de détecter l'absorption du premier photon. C'est le principe des écrans fluorescents pour « voir » les rayons X.

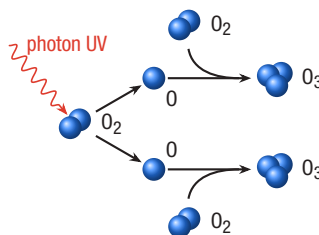
Utilisation de semi-conducteurs

Les semi-conducteurs ont des états d'énergies réparties en bandes. Un photon qui a une énergie supérieure au gap est absorbé par un électron qui passe d'une bande à une autre. La bande de conduction d'un semi-conducteur éclairé en continu avec des photons d'énergie suffisante est partiellement remplie, ce qui modifie la conductivité du semi-conducteur : c'est la **photoconductivité**. La mesure de cette conductivité permet d'estimer l'éclairement.

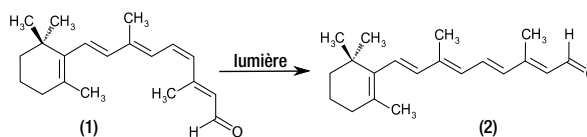
Dans un agencement de semi-conducteurs de type diode, un champ électrique force les électrons de la bande de conduction à se déplacer. Lorsque cet agencement est éclairé, des électrons passent dans la bande de conduction et il se crée un courant électrique : c'est l'**effet photovoltaïque**. Il permet de détecter des photons et de produire de l'électricité à partir de la lumière.

Utilisation de molécules

De nombreuses réactions chimiques se déroulent sous l'action de la lumière. La **photolyse** est une réaction chimique dans laquelle un composé chimique est dissocié en composés plus simples sous l'action de la lumière. La destruction des plastiques par les rayons UV est une photolyse. Le **photochromisme** est la transformation réversible, sous l'action de la lumière, d'une espèce chimique d'une forme (1) vers une forme (2). Parfois le phénomène a lieu dans les deux sens avec des lumières différentes. Parfois le retour de (2) à (1) est spontané.

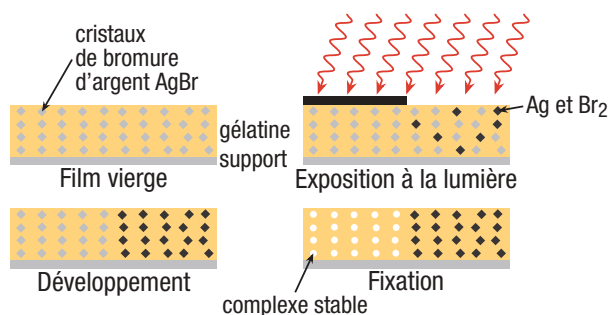


Dans la stratosphère, entre 13 et 40 km d'altitude, l'ozone (O_3) est produit suite à la photolyse des molécules de dioxygène (O_2). Cet ozone intercepte plus de 97 % des rayons UV du Soleil.



Le **rétinal**, une des trois formes de la vitamine A, est la molécule de la vision : par photochromatisme, il change de forme lorsqu'il absorbe un photon, ce qui déclenche un signal dans le nerf optique.

Le récepteur photosensible d'un film argentique est un cristal de bromure d'argent AgBr. Lorsque ce cristal est exposé à la lumière, des ions Br^+ et Ag^- se séparent et produisent des molécules Br_2 et des atomes Ag. Le développement du film amplifie cette transformation, encore trop ténue pour donner une image visible, et la fixation transforme les cristaux AgBr résiduels en un complexe stable insensible à la lumière.



Manipulations

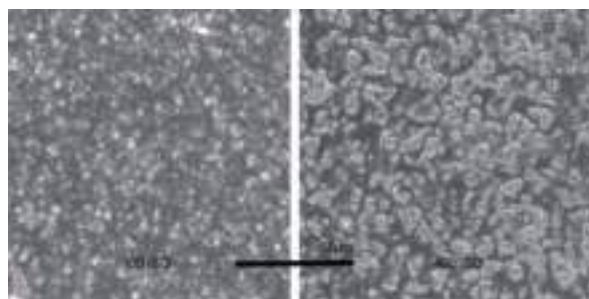
Capter les photons, détection en argentique et en numérique

« La lumière est un corps : Einstein nous a expliqué l'effet photoélectrique » voir page 13

L'effet photoélectrique observable avec des métaux est difficile à mettre en œuvre pour une exposition itinérante : les électrons éjectés ne peuvent se propager que sous vide. Cela implique d'avoir une expérience plus lourde avec un système de pompage associé. De façon à illustrer le transfert de quantité de mouvement, nous avons choisi de réaliser l'expérience avec une cellule photovoltaïque, qui met en évidence l'absorption de l'énergie du photon sans extraction d'électrons.

En accolant deux matériaux semi-conducteurs soumis à un éclairage, un champ électrique se crée à l'interface entre les deux matériaux. Ce champ électrique met en mouvement les électrons. L'intensité mesurée est donc bien liée à la façon dont les photons sont absorbés par l'un ou l'autre des matériaux.

La taille des grains d'argent dans un film analogique varie en fonction de la sensibilité du film. Sur cette image, prise en microscopie optique, les grains sont environ 4 fois plus petit pour une pellicule de 100 ISO que pour une pellicule de 400 ISO.



© E. Salançon

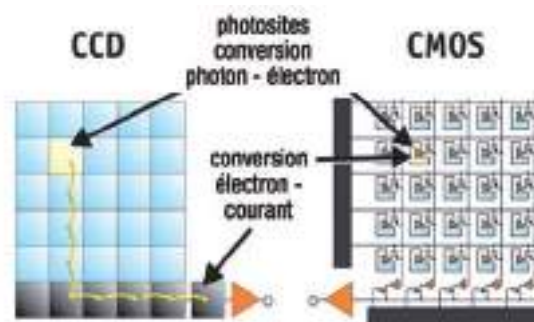


© E. Salançon

En photographie argentique, il est donc préférable d'utiliser un film dont le grain est fin pour garder la résolution sur l'image mais il faut alors plus de lumière (ou une plus longue exposition).

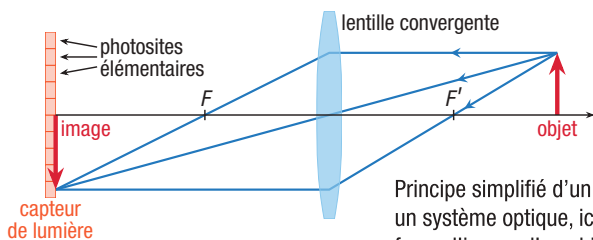
Les **capteurs des appareils photo numériques** sont des assemblages réguliers de capteurs photosensibles à base de semi-conducteurs, les **photosites**.

Dans un **capteur CCD** (Charged Coupled Device), chaque photosite conserve ses électrons dans la bande de conduction pendant le temps d'exposition : ces électrons sont ensuite collectés séquentiellement. Dans un **capteur CMOS** (Complementary Metal-Oxyde-Semiconductor), chaque photosite est une photodiode indépendante : la collecte des électrons est simultanée.



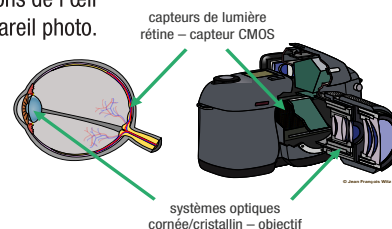
Composer des images

L'œil et l'appareil photo sont des capteurs d'images qui partagent de nombreuses caractéristiques.

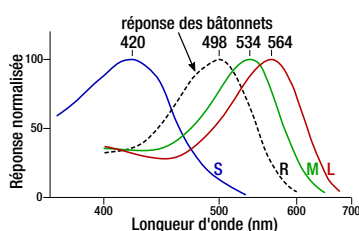


Principe simplifié d'un capteur d'image : un système optique, ici une lentille convergente, forme l'image d'un objet sur un capteur de lumière constitué de photosites élémentaires.

Organisations de l'œil et d'un appareil photo.

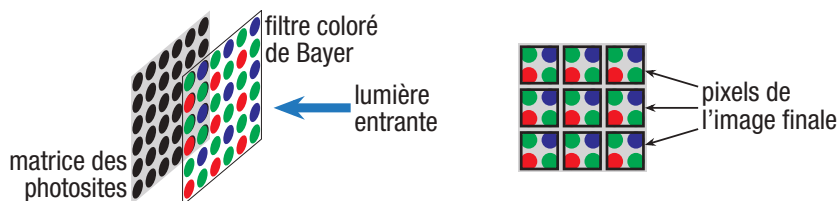


Les couleurs



Les cônes S, M et L de la rétine séparent les couleurs, car ils ont chacun une réponse à la lumière centrée sur une longueur d'onde différente. Les bâtonnets ne séparent pas les couleurs car leur réponse est centrée sur une seule longueur d'onde.

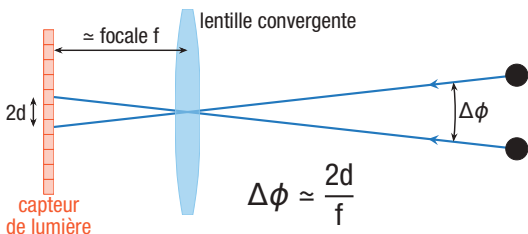
Les photosites de la **rétine** sont les bâtonnets et les cônes. La détection de la couleur par l'œil est due à la présence de trois types de cônes. Un **capteur CMOS** d'appareil photo est une matrice de photodiodes sensibles à tout le spectre visible : pour différencier les couleurs, des filtres colorés sont déposés au-dessus de chaque photodiode.



Un capteur CMOS est une matrice de photodiodes recouverte d'un filtre coloré de Bayer : chaque photodiode capte une lumière élémentaire, rouge, verte ou bleue. Le traitement d'image transforme ces données en pixels colorés en regroupant les photodiodes par 4. Le filtre contient plus de pastilles vertes afin de reproduire la sensibilité plus forte de l'œil dans le vert.

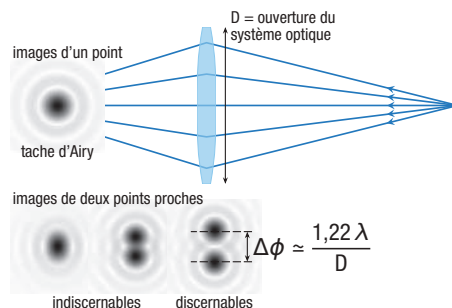
La **résolution angulaire** d'un capteur d'images correspond à l'angle minimal qui doit séparer deux points proches pour qu'ils soient discernés : elle est d'autant meilleure que la distance focale et l'ouverture du système optique sont grandes et que la taille des photosites est petite.

Le pouvoir de résolution



Le capteur ne peut pas séparer les deux points noirs si leurs images se forment sur le même photosite ou sur deux photosites adjacents : il faut au moins un photosite intermédiaire. L'angle minimal s'exprime en fonction de la focale f du système optique et de la séparation d des photosites.

L'image d'un point par un système optique est une tache. Deux points proches forment des taches qui ne sont discernables que pour une séparation angulaire minimale, qui s'exprime en fonction de la longueur d'onde λ de la lumière et de l'ouverture D du système optique.



L'aigle est l'animal qui a la plus petite résolution angulaire, 0,0036 degré : il peut voir une souris à 1,5 km... L'homme le suit de loin avec 0,007 degré.

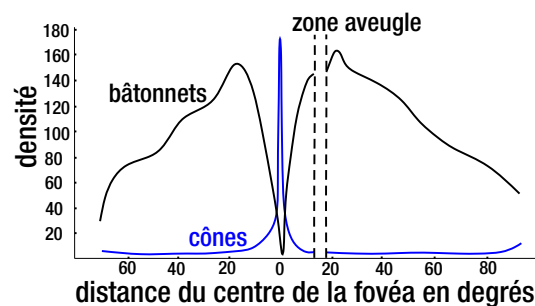
Diminuer la taille des photosites améliore la résolution angulaire, mais un photosite doit avoir une taille supérieure à la longueur d'onde de la lumière à capter, entre 0,3 μm et 0,8 μm pour le visible. Dans le règne animal, la taille minimale record des cônes est de 1 μm (2 μm chez l'homme). Les photodiodes des capteurs CMOS peuvent atteindre 2 μm .

Sensibilité et bruit d'image

Le seuil de lumière minimal pour former une image est la **sensibilité** du capteur d'images. Pour collecter plus de photons, on peut augmenter l'ouverture D du système optique. Chez l'homme, la pupille s'ouvre jusqu'à 8 mm dans l'obscurité. Sur les appareils photos, on peut jouer sur l'ouverture et sur le temps de pose pour accumuler plus de photons.

Augmenter la taille de chaque photosite améliore leur sensibilité mais diminue la résolution angulaire. Le réglage ISO des appareils photo numériques permet d'augmenter la sensibilité en regroupant, lors du traitement de l'image, le signal de photosites adjacents, mais le **bruit d'image** est alors accentué.

Le bruit d'image est une perte de netteté due à la présence d'informations parasites aléatoires qui s'ajoutent à l'image. Il est visible dans les zones peu éclairées, où le rapport signal/bruit est faible, ou dans les zones uniformes. Ce bruit est accentué par le traitement d'image lorsque la valeur ISO augmente. (images originales : www.dpreview.com)



Utilisés en faible lumière chez l'homme, les bâtonnets sont 100 fois plus sensibles que les cônes : ils peuvent répondre à un unique photon. Leur nombre, jusqu'à 100 millions sur toute la rétine, dépasse largement celui des cônes, entre 3 et 4 millions concentrés sur la fovéa.



Manipulations

Le microscope



L'objet placé sous la binoculaire est une grille de cuivre sur laquelle une membrane de carbone trouée est déposée :



© CINAM

Observés au microscope électronique, les détails sont bien plus nombreux :



© CINAM



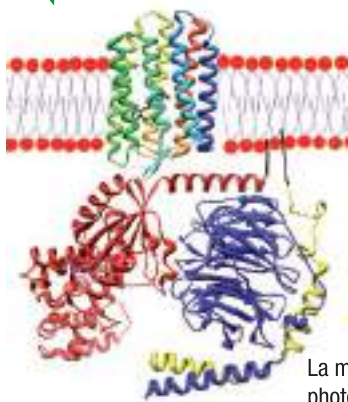
© CINAM

Le pouvoir de résolution du microscope électronique est bien meilleur qu'en microscopie optique car la longueur d'onde associée aux électrons est environ mille fois plus petite.

Droit dans les yeux

L'œil est l'organe sensoriel qui permet aux animaux de capter et d'analyser la lumière de leur environnement afin d'interagir avec lui.

L'œil et la lumière



Les informations issues des photorécepteurs sont analysées et interprétées par le **système nerveux** et provoquent une réaction de l'animal par son **système moteur**. La sélection naturelle a produit une grande diversité de comportements face à la lumière : fuite, attraction, communication, régulation des rythmes biologiques, détection de mouvements, orientation et déplacement dans l'espace...

La représentation mentale de l'environnement visuel est liée à l'espèce animale concernée. Des **systèmes optiques** élaborés et des systèmes nerveux complexes permettent d'accéder à différentes informations : profondeur, relief, mouvements, couleurs, polarisation de la lumière, ligne d'horizon...

L'organe de la perception de la lumière est avant tout constitué de cellules photosensibles, les **photorécepteurs**, qui captent la lumière qui les atteint. Leur sensibilité dépend de la longueur d'onde de la lumière.

La molécule de **rhodopsine (pourpre rétinienne)** est un pigment photosensible présent dans les photorécepteurs des yeux des Céphalopodes, des Arthropodes et des Vertébrés : c'est la molécule qui capte les photons.

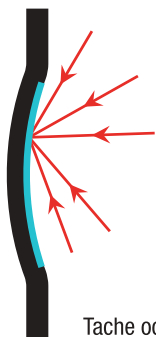
La représentation mentale de l'environnement visuel est subjective à l'espèce animale concernée.

(A) Une araignée sauteuse embrasse un très large champ de vision grâce à ses 8 yeux. (B) Un chat a une vision nocturne très efficace grâce à une couche réfléchissante située au fond de l'œil, ce qui provoque les reflets de la lumière du flash. (C) L'aigle impérial a un système optique qui lui procure une vision de loin très précise.



© araignée : J. Niland / © chat : T. Masson / © aigle : Pixelk

La diversité des yeux



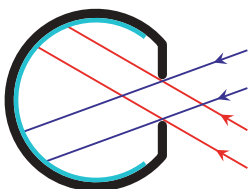
Les premiers yeux remontent à au moins 600 millions d'années. Leur diversité actuelle est le résultat des multiples usages de la lumière par les espèces animales.

La **tache oculaire** est l'organe le plus simple pour détecter la lumière : il regroupe un nombre réduit de photorécepteurs, moins de quelques dizaines et il n'est pas sensible à la direction d'origine des rayons lumineux.

L'évolution a conduit à deux grands schémas d'organisation de l'œil pour acquérir l'information sur la direction des rayons lumineux incidents : l'œil à chambre oculaire et l'œil composé.

Tache oculaire : chaque photorécepteur (en bleu) reçoit de la lumière sur près de 180°.

Dans une chambre oculaire, la zone des photocapteurs (en bleu) qui est éclairée par la lumière indique la direction incidente.



L'œil à **chambre oculaire** permet de localiser l'origine de la lumière en fonction de la zone des photocapteurs qui reçoit la lumière. Ce système optique peut être amélioré de deux façons : réduire la taille de l'ouverture et former ainsi une chambre noire, au prix d'une perte de sensibilité à la lumière ; placer un système réfractant, cornée et/ou cristallin, à l'entrée de la chambre oculaire.

Les calmars, à gauche, et les chevaux, à droite, ont des yeux à chambre oculaire fort semblables : l'œil à chambre oculaire fermé par un système réfractant (lentille) est apparu au moins 8 fois de façons indépendantes dans le processus évolutif.



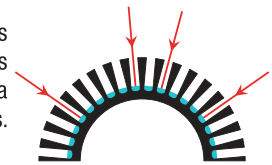
© T. Masson



© T. Masson

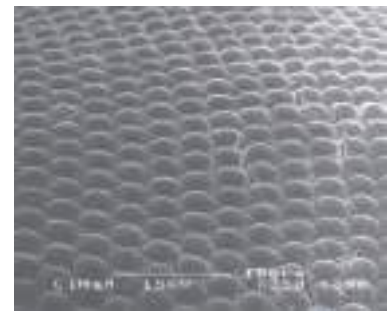
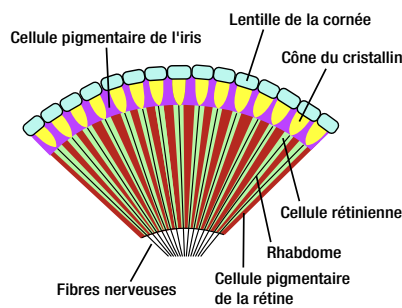
L'**œil composé** regroupe des yeux simples en forme de tubes orientés dans différentes directions. Un système réfractant, cornée et/ou cristallin, peut fermer chaque œil simple pour améliorer ce système optique.

Dans un œil composé, seuls les photorécepteurs (en bleu) situés dans les yeux simples orientés vers la lumière incidente sont activés.



© T. Shahan

Photos, schéma et vue au microscope électronique des yeux composés d'insectes. L'acuité visuelle est faible, mais les insectes peuvent percevoir jusqu'à trois cents images par seconde, là où l'homme n'en perçoit que vingt-quatre, et ils sont sensibles à l'ultraviolet. Certains insectes perçoivent la lumière polarisée, ce qui est utile pour se diriger en vol : l'orientation de la polarisation dépend des positions de l'observateur, du soleil et du point visé.

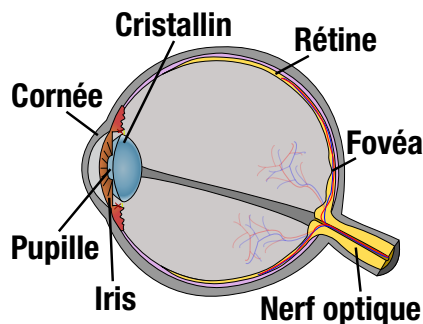


L'**œil humain** est un récepteur très sensible, capable de s'adapter à différentes situations.

“L'essentiel est invisible pour les yeux.”

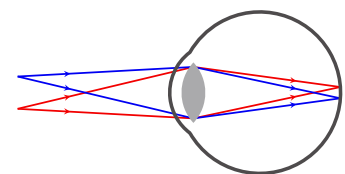
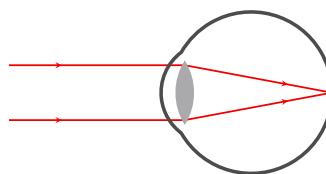
A. de Saint-Exupéry, *Le Petit Prince*

Le système optique



Coupe simplifiée de l'œil

Un œil au repos voit net un objet situé à l'infini. Lorsque l'objet se rapproche, le cristallin se déforme pour produire une image nette sur la rétine.

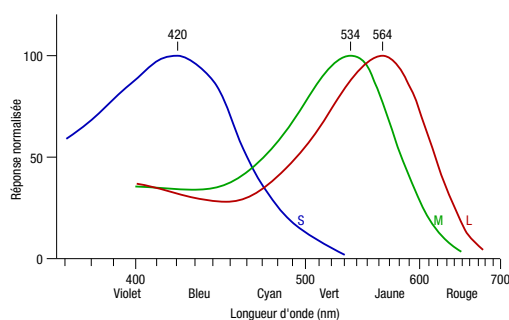


Le cristallin est une lentille à focale variable permettant d'accommoder notre vision à une distance précise.

Le point visible le plus éloigné de l'œil s'appelle le *punctum remotum* et le point le plus proche, le *punctum proximum*, déformation maximale du cristallin qui diminue avec l'âge : c'est le défaut de **presbytie**.

L'œil peut être assimilé à un système optique comprenant :

- un doublet de lentilles convergentes : la **cornée** de focale fixe et le **cristallin** de focale variable ;
- un écran sur lequel se forment les images : la **rétine** ;
- un diaphragme : l'**iris**, la partie colorée de l'œil, peut occulter plus ou moins l'entrée de la chambre oculaire pour éviter l'éblouissement.



Sensibilité normalisée des trois cônes S, M et L de l'œil humain.

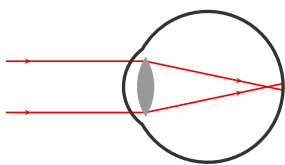
Les capteurs de lumière

La rétine est une membrane de 0,5 mm d'épaisseur qui tapisse 75% de la face interne du globe oculaire. Elle est formée de cellules photoréceptrices, les **bâtonnets** et les **cônes**, qui transforment l'image lumineuse en signaux électriques transmis au cerveau toutes les 40 ms par le nerf optique - seul endroit de la rétine non sensible à la lumière, appelé « **tache aveugle** ».

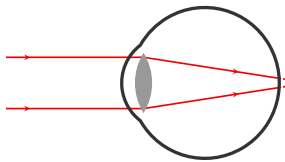
- Les 120 millions de bâtonnets servent à la vision nocturne en « niveaux de gris ».
- Les 5 millions de cônes, rassemblés dans la fovea, zone de $0,5 \text{ mm}^2$ au centre de la rétine, servent à la vision diurne. La densité des cônes procure à l'œil un pouvoir séparateur de $0,3 \text{ mrad}$: ainsi, l'œil peut distinguer les carreaux d'une moustiquaire jusqu'à un mètre mais pas au-delà. Grâce au recouvrement des courbes de sensibilité des 3 types de cônes, la vision humaine peut percevoir 8 millions de nuances de couleurs.

Les défauts de l'œil

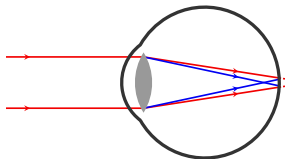
Les 5 défauts optiques de l'œil sont la myopie, l'hypermétropie, l'astigmatisme, la presbytie et l'anisétropie, qui produit deux images de taille différentes.



La **myopie** : le point focal est en avant de la rétine. Les objets lointains apparaissent flous.



L'**hypermétropie** : le point focal est en arrière de la rétine. L'hypermétrope est obligé d'accommoder en permanence pour avancer le point focal : les objets proches apparaissent flous quand les capacités d'accommodation sont dépassées.



L'**astigmatisme** est généralement causé par une cornée irrégulière : les rayons lumineux sont focalisés en deux foyers distincts sur la rétine.

Les défauts de vision dus à une dégénérescence de la rétine sont souvent génétiques et liés à une anomalie des photorécepteurs. Certaines n'évoluent pas dans le temps, comme le daltonisme - anomalie des cônes - ou l'achromatopsie - absence totale de la couleur. D'autres sont dégénératives et conduisent à une cécité progressive, comme la rétinite pigmentaire ou l'amaurose.



© J. Ahlmann Simulation de différentes visions : normale (en haut à gauche), daltonienne deutéranope (en haut à droite), daltonienne tritérope (en bas à gauche) et daltonienne protanope (en bas à droite).



Manipulations

Disque de Newton

Un disque comprenant l'ensemble des couleurs de l'arc en ciel est monté sur un moteur que le visiteur actionne. Lorsque le disque tourne, il effectue un tour en moins de 40 millisecondes. Or la rétine de l'œil est « lue » toutes les 40 : millisecondes, on parle du temps de rémanence de l'œil. Ainsi l'œil perçoit le mélange de toutes les couleurs, c'est-à-dire du blanc.



Du soleil pour la vie

La lumière du Soleil permet à la Terre d'abriter la vie. Elle en est aussi la principale source d'énergie.

Une planète habitable

Voir annexe 3 page 93

La Terre reçoit de l'énergie du rayonnement du Soleil : 70 % de cette énergie est absorbée sous forme de chaleur dans l'atmosphère et en surface (océans, sols et glaces).

Cette chaleur est source d'émission d'un rayonnement infrarouge, que les gaz à effet de serre de l'atmosphère, comme l'eau (H_2O), le dioxyde de carbone (CO_2) ou le méthane (CH_4), absorbent en grande partie : l'atmosphère terrestre est transparent pour la lumière du Soleil mais opaque pour le rayonnement infrarouge.

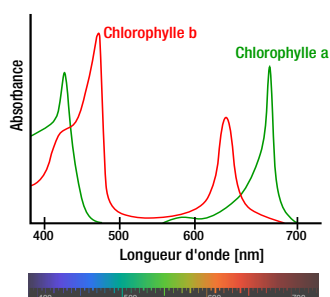
Sans ce mécanisme, appelé **effet de serre atmosphérique**, la température à la surface de la Terre serait de $-18^\circ C$, alors qu'elle est en moyenne de $15^\circ C$. Cela permet à l'eau d'être présente sur Terre sous forme liquide, vapeur et glace, condition favorable, voire nécessaire, à l'apparition et au maintien de la vie sur Terre.

Évolution de la teneur en dioxyde de carbone dans l'atmosphère sur 50 ans. Les activités humaines sont responsables de l'augmentation de la teneur en CO_2 dans l'atmosphère et de son impact sur le réchauffement climatique (gaz à effet de serre). Les fluctuations annuelles (encart) sont dues à l'activité saisonnière des plantes qui consomment du CO_2 par photosynthèse (plus intense dans l'hémisphère nord).

Le soleil émet principalement de la lumière entre l'ultraviolet (UV) et l'infrarouge (IR). Selon les doses et leur longueur d'onde, les rayons UV peuvent être nocifs ou bénéfiques à la biologie de la vie. Heureusement, les rayons UV nocifs sont absorbés par la couche d'ozone (les UV-C et une partie des UV-B).

La **photosynthèse** est une réaction biochimique qui permet aux plantes, aux algues et à certaines bactéries de stocker l'énergie de la lumière du Soleil sous forme de glucides, par exemple des glucoses (sucres). Ces glucides sont ensuite utilisés par les cellules de l'organisme comme source d'énergie. Les organismes capables de photosynthèse sont dit **autotrophes**. La photosynthèse consomme du dioxyde de carbone (CO_2) et de l'eau (H_2O), et rejette de l'oxygène (dioxygène O_2).

L'énergie de la vie



À gauche, spectre d'absorption des pigments *chlorophylle a*, de couleur apparente verte, et *chlorophylle b*, de couleur apparente jaune. En bas, chloroplastes contenant la chlorophylle a qui donne la couleur verte caractéristique des plantes siège de la photosynthèse.



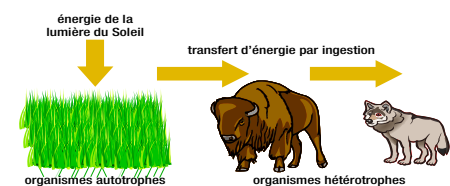
Au sein des chloroplastes, les réactions clé de la photosynthèse ont lieu dans des complexes contenant de nombreux éléments : protéines, molécules diverses (dont la chlorophylle a), ions métalliques... Ici le complexe photosystème II, le premier à intervenir dans les réactions de photosynthèse.



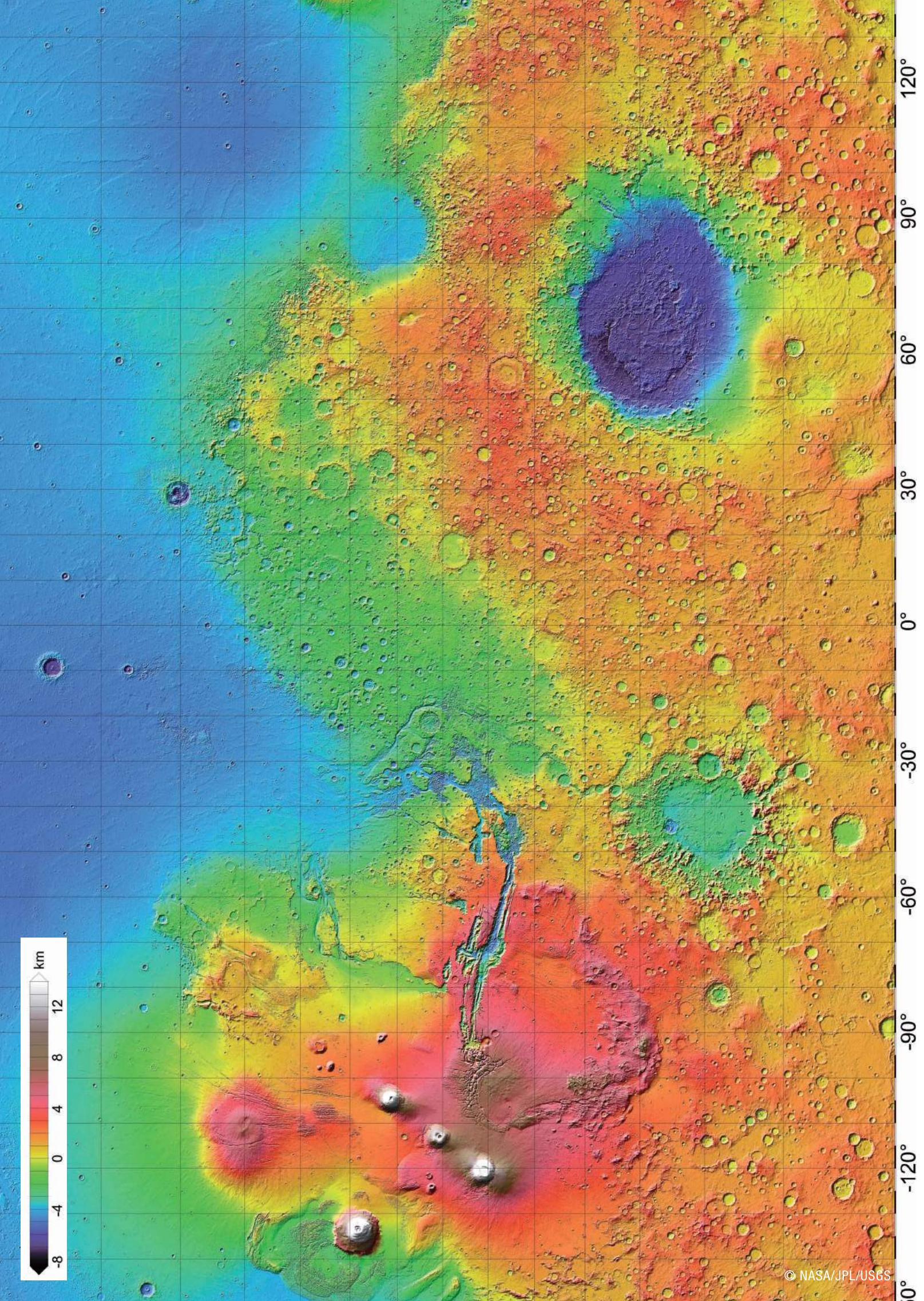
Chez les plantes et les algues, la photosynthèse a lieu dans les **chloroplastes**, qui sont des organites contenues dans les cellules, celles des feuilles par exemple. La photosynthèse s'effectue en deux temps : dans la phase lumineuse, la lumière est captée sous forme d'énergie chimique par un pigment contenu dans les chloroplastes, comme la **chlorophylle** ; puis dans la phase obscure, la synthèse des glucides est réalisée à partir de cette énergie chimique. Seulement 2 % de la lumière reçue par une feuille sert à la photosynthèse.

Tous les organismes vivants ont besoin d'énergie. Les organismes **hétérotrophes** (non autotrophes, comme les animaux ou les champignons) puisent leur énergie en ingérant des organismes autotrophes ou leurs déchets : c'est le principe de la chaîne alimentaire dans laquelle l'énergie et certaines molécules organiques sont transférées d'organismes en organismes.

La lumière du Soleil est la source de l'énergie de la vie sur Terre.



La chaîne alimentaire est un transfert de l'énergie de la lumière du Soleil vers les organismes hétérotrophes. Les organismes autotrophes forment la production primaire de cette chaîne.



Pôle 5 : Utiliser et maîtriser

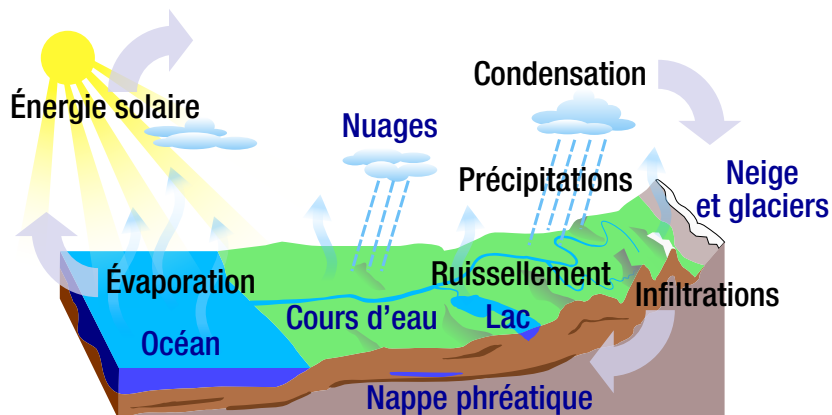
Ce pôle illustre l'utilisation de la lumière dans différents domaines : la lumière comme source d'informations, la lumière pour soigner et guérir, la production d'énergie à partir de la lumière, la maîtrise de la lumière en architecture et en urbanisme... Différentes technologies sont décrites et expliquées, comme les cellules photovoltaïques ou les télémètres laser.

Le Soleil, source d'énergie

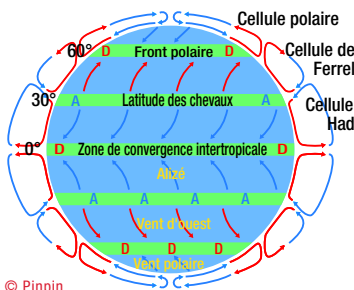
Pour ses activités, l'homme a su maîtriser différentes sources d'énergies issues de la lumière du Soleil.

L'énergie des fluides

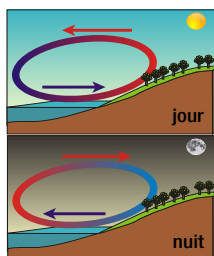
Dans le **cycle de l'eau**, la lumière du Soleil intervient dans la phase d'évaporation. L'**énergie hydraulique** de l'eau de ruissellement est facilement récupérable. Elle est aujourd'hui principalement transformée en électricité et représente environ 16% de la production d'électricité mondiale.



Le moteur du cycle de l'eau est l'énergie de la lumière du Soleil.



© Pinpin



© Corso / T. Masson

À gauche, circulation atmosphérique terrestre à l'échelle du globe, que la rotation de la Terre rend tourbillonnaire. À droite, explication de la brise de mer : le jour, les terres s'échauffent plus que la mer et la nuit elles se refroidissent plus, ce qui induit des convections d'air inversées jour/nuit.



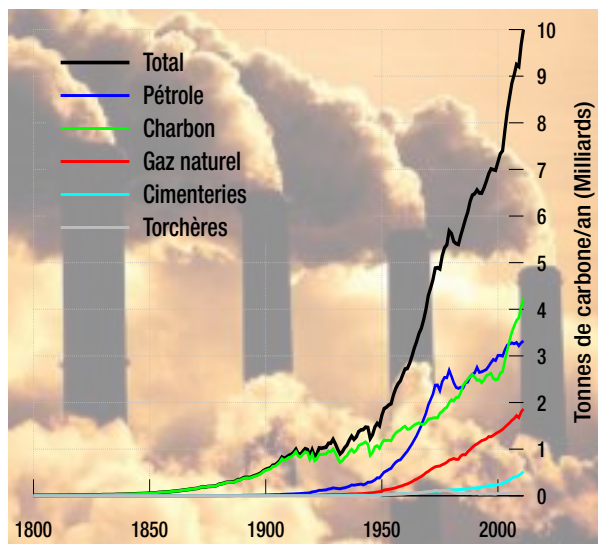
© T. Masson



Diverses technologies existent pour récupérer l'énergie éolienne.

La lumière du Soleil ne chauffe pas l'atmosphère de façon homogène, ce qui induit des différences de pression qui engendrent des **flux de circulation atmosphérique**. L'homme récupère l'**énergie éolienne** de diverses façons : moulins pour l'énergie mécanique, éoliennes pour produire de l'électricité, voiles pour la locomotion...

Les énergies combustibles



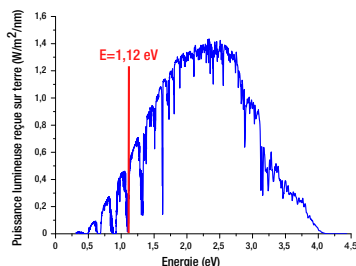
© M. Thorpe / T. Masson, données Marland, Boden, Andres, 2007

La photosynthèse permet aux végétaux de capturer du carbone grâce à l'énergie de la lumière du Soleil. C'est une réserve d'énergie exploitable par **combustion**. Les **énergies fossiles**, pétrole, charbon, gaz et tourbes, résultent de la méthanisation sur plusieurs millions d'années de la matière organique de plantes ou d'animaux morts. Cette énergie stockée résulte de l'accumulation de l'énergie de la lumière du Soleil sur de longues périodes.

La combustion d'énergies fossiles depuis le XIX^e siècle a rejeté dans l'atmosphère une grande partie du gaz carbonique (CO₂) que des végétaux y avaient puisé par photosynthèse pendant des millions d'années.

L'énergie des photons

Les **capteurs solaires photovoltaïques** produisent par effet photovoltaïque de l'électricité en absorbant les photons solaires. Leur rendement théorique maximal est de 29% pour le silicium, mais ils atteignent difficilement 20%. Ils produisent de l'ordre de 175 kWh par mètre carré et par an.



Courbe de l'éclairement solaire en fonction de l'énergie, avec l'indication de l'énergie minimale requise par un photon pour produire un courant dans une cellule photovoltaïque au silicium. L'énergie excédentaire des photons est dissipée en chaleur et fait baisser le rendement.

La **photocatalyse** cherche à imiter la photosynthèse naturelle : l'énergie d'un photon rend disponible une paire électron/trou dans un semi-conducteur, ce qui active une réaction chimique. Selon la nature du semi-conducteur, différentes réactions chimiques peuvent être réalisées, comme la décomposition de l'eau (H_2O) en dihydrogène (H_2) et dioxygène (O_2).



Nanotubes de TiO_2 pour réaliser la décomposition de l'eau en dihydrogène et dioxygène par photocatalyse. La géométrie tubulaire permet d'augmenter la surface active et favorise la capture des photons.



© Jeromeguyon

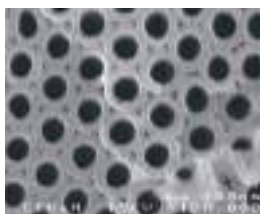


© Koza1983

À gauche, chauffe-eau solaire monobloc domestique. À droite, centrale électrique solaire thermique en Espagne : des miroirs pivotants concentrent les rayons du Soleil sur une tour centrale.

Les **capteurs solaires thermiques** communiquent l'énergie thermique du rayonnement du Soleil à un fluide caloporteur, gaz ou liquide. Leur rendement est proche de 80% et ils peuvent produire jusqu'à 500 kWh par mètre carré et par an.

Diverses pistes sont explorées pour améliorer le rendement des cellules photovoltaïques : technologie hybride photovoltaïque/thermique, où l'énergie excédentaire des photons est récupérée sous forme de chaleur ; remplacement du silicium par d'autres matériaux, comme les pérovskites...



© L. Santinacci, CiNaM



© L. Santinacci, CiNaM

La photocatalyse par des rayons ultraviolets permet de détruire des polluants organiques présents dans l'eau.



Manipulations

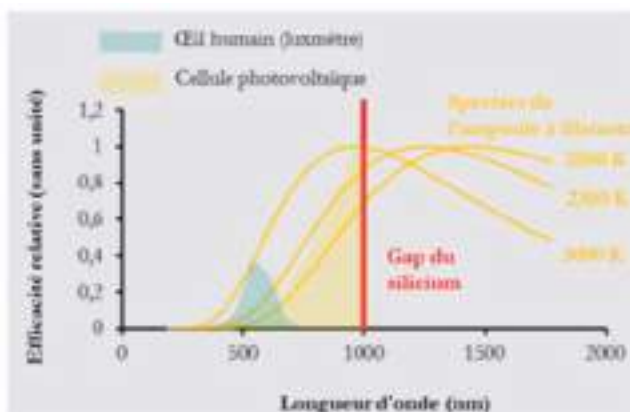
Le soleil, source d'énergie

Reprenons l'expérience « **La lumière est un corps : Einstein nous a expliqué l'effet photoélectrique.** » Voir page 13.

Les intensités mesurées sur le luxmètre et aux bornes de la cellule photovoltaïque ne sont pas proportionnelles.

Le filament de l'ampoule émet des spectres différents en fonction de la température du filament (ou de l'intensité électrique qui le traverse), or :

- la sensibilité de l'œil est centrée à 550 nm, les UV et infrarouges ne sont pas mesurés par le luxmètre (éclairage perçu par l'œil humain),
- la cellule photovoltaïque transforme un photon absorbé d'énergie supérieure à 1,12 eV en un électron : seuls les photons dont la longueur d'onde est inférieure à 1100 nm (infrarouge) sont recombinés, le surplus d'énergie est transformé en chaleur.



Passer aux rayons X

Par leurs propriétés, les rayons X sont une lumière de choix pour explorer la matière.

Traverser la matière



© O. Guillon, CICRP Marseille



© O. Guillon, CICRP Marseille

Les rayons X ont la capacité de traverser certains matériaux et d'être absorbés par d'autres. Cela permet d'obtenir des images de l'intérieur d'objets opaques, par exemple du corps humain en imagerie médicale.

La radiographie aux rayons X est utilisée dans la restauration d'œuvres d'art : ici, elle montre la présence d'au moins quatre couches et plusieurs reprises des mains et du visage. Piéta, anonyme romain du XVII^e, Musée Fabre de Montpellier.

La microtomographie

La **microtomographie à rayons X** est une technique d'imagerie en 3 dimensions basée sur les rayons X pouvant atteindre des détails de l'ordre du micromètre. C'est une technique non destructrice qui permet de visionner l'intérieur d'un objet et d'obtenir une représentation de ses propriétés : composition, agencement, défauts, porosité... Voir annexe 2 page 92.

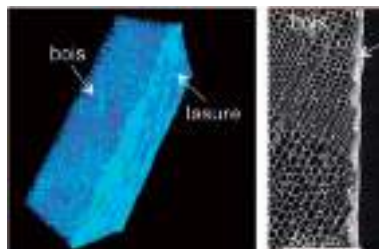
L'image est un modèle informatique 3D en haute résolution recomposé à partir d'enregistrements d'une série de radiographies numériques effectuées sur l'objet en rotation. La structure interne de l'objet est ainsi accessible, par exemple à travers des coupes virtuelles, et il est possible de caractériser certaines structures en mesurant des distances, des surfaces ou des volumes.



Images 3D obtenues par microtomographies à rayons X.

© El Albani, Mazurier

Observation d'une couche de lasure recouvrant du bois afin d'identifier des modifications de sa texture, de sa porosité et de sa composition lors de son vieillissement naturel provoqué par les rayons UV du Soleil, la pluie, ou le gel.



© CEREGE

© CEREGE

La microtomographie à rayons X a de nombreuses applications dans des domaines très divers : structure interne de matériaux, biologie végétale et animale, paléontologie, archéologie, industrie agro-alimentaire, cosmétique...

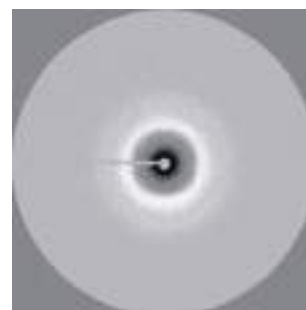
Diffusion et diffraction

Les rayons X sont diffusés principalement par les électrons de la matière : l'intensité et l'angle de diffusion dépendent de la nature des atomes et de leurs distributions. En mesurant l'intensité de **diffusion aux petits angles**, on peut déterminer la structure d'objets de tailles micrométriques, avec une résolution de l'ordre du nanomètre. Cette méthode est très utilisée dans l'étude de grandes molécules comme les polymères, les protéines, les virus...

Les matériaux cristallins sont ordonnés périodiquement à l'échelle atomique. Les rayons X sont diffractés par de tels réseaux d'atomes. La **diffraction des rayons X** permet de déterminer la structure atomique de la matière, avec une résolution de l'ordre de 0,1 nm. Elle est utilisée dans de nombreux domaines de recherche : matériaux, industrie pharmaceutique, biologie...



© V. Heresanu



© V. Heresanu

À gauche, cliché de diffraction d'un cristal de sucre : l'information sur les atomes est contenue dans toutes les taches présentes dans l'image.

À droite, signal de diffusion aux petits angles de l'eau sucrée : l'information est contenue dans la petite partie noire au centre de l'image.

En mesurant les **spectres d'absorption** ou d'**émission** par fluorescence des atomes dans le domaine des rayons X, il est possible de faire des analyses chimiques très précises, en terme de résolution spatiale et de seuil de détection.

L'imagerie médicale

L'imagerie médicale est un outil de diagnostic et de soin devenu indispensable.

Pour obtenir une image de l'intérieur du corps, il faut utiliser une lumière qui traverse et interagit avec nos tissus et organes : les rayons X ou les rayons gamma.

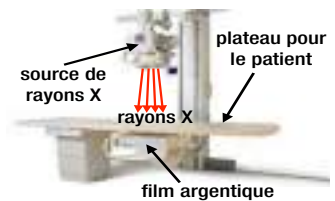
La radiographie

Les rayons X pénètrent facilement dans certains matériaux et sont absorbés par d'autres. La **radiographie** exploite cette propriété : un faisceau de rayons X issu d'une source traverse en ligne droite les tissus à examiner et vient exposer un film argentique ou éclairer un écran fluorescent. Aujourd'hui, l'enregistrement numérique de l'image, plus sensible, permet de diminuer les doses d'exposition et d'utiliser des traitements informatiques pour analyser les images.



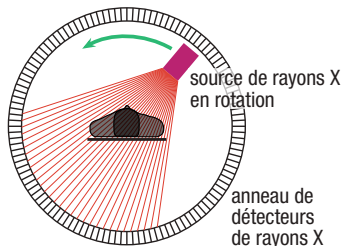
Une radiographie représente l'ombre géométrique produite par les rayons X : l'image ne conserve pas l'information sur la position en profondeur des organes et des tissus.

Radiographie du thorax d'une femme. Les zones blanches correspondent à une forte absorption des rayons X. On discerne la silhouette de la structure osseuse et de certains organes mous.



Appareil moderne, où l'image est enregistrée sur un film argentique.

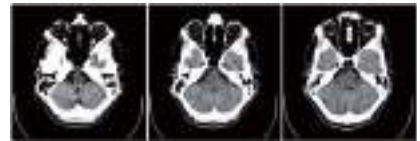
Mis au point en 1972, le **scanner à rayons X**, ou **tomographie à rayons X**, recompose une image en 3 dimensions capturée par « tranches » successives. Chaque tranche d'image est obtenue par rotation de la source de rayons X créant un faisceau de faible épaisseur : le pourtour de l'anneau est recouvert de détecteurs reliés à l'ordinateur.



Scanner à rayons X : à l'intérieur de l'anneau, la source met environ une seconde pour faire un tour complet et le faisceau illumine ainsi une tranche du corps entre 1 mm et 10 mm d'épaisseur. Lorsque le plateau a avancé, la tranche suivante est enregistrée.

Différentes tranches d'une tomographie à rayons X d'un crâne humain, de sa base à son sommet. Un liquide intraveineux a été utilisé pour intensifier les contrastes.

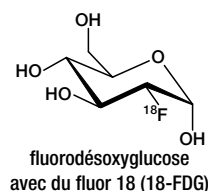
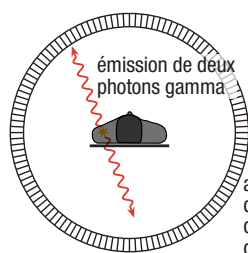
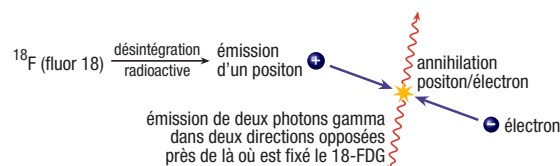
Les informations collectées par les détecteurs nécessitent un traitement par un algorithme mathématique compliqué pour produire des images en 3 dimensions de résolution spatiale de l'ordre du millimètre.



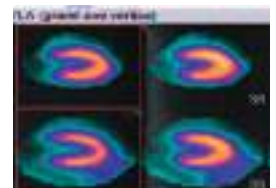
© Department of Radiology, Uppsala University Hospital

La scintigraphie

La **scintigraphie**, apparue dans les années 1970, consiste à injecter chez le patient un traceur radioactif qui, après s'être fixé sur les organes à étudier, va émettre des rayonnements gamma de l'intérieur. La détection de ce rayonnement **produit une image fonctionnelle en 3D** qui suit en direct l'activité des organes à étudier. Le traceur, une molécule dont un atome a été remplacé par un isotope radioactif, est choisi en fonction de la pathologie et des organes à explorer. Sa toxicité est faible et elle s'élimine naturellement au bout de quelques heures.



Scintigraphie myocardique : le traceur radioactif qui se fixe sur le myocarde ventriculaire est du Thallium 201, analogue au potassium.



En tomographie par émission de positons (TEP), l'élément radioactif, souvent du fluor 18 incorporé dans le fluorodésoxyglucose (18-FDG), un sucre semblable au glucose, émet un positon, l'antiparticule de l'électron. Ce positon s'annihile avec un électron voisin en émettant deux photons gamma qui partent dans deux directions diamétralement opposées. La détection combinée de ces deux photons permet de localiser leur origine et d'obtenir une image en 3 dimensions.

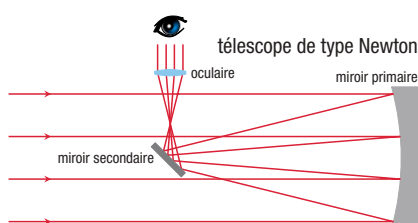
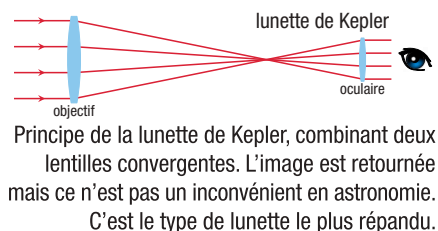
Lunettes et télescopes

Les lunettes et les télescopes sont des systèmes optiques conçus pour voir loin. Ils ont élargi notre regard sur l'Univers.

Lunette ou télescope ?

La **lunette** est un assemblage d'au moins deux lentilles. On ne sait pas qui en est l'inventeur au tout début du XVII^e siècle.

La première lentille, l'**objectif**, a pour but de collecter la lumière : son ouverture est grande. La seconde lentille, l'**oculaire**, agrandit l'image de la première, comme une loupe.



Dans un **télescope**, l'objectif est un miroir concave. Ce miroir renvoie les rayons dans la direction incidente : il faut donc les dévier pour les observer. Newton a trouvé la combinaison la plus pratique en plaçant l'oculaire à 90° du faisceau entrant. La configuration de Cassegrain renvoie le faisceau vers un trou central du miroir primaire.

Télescope de type Newton, dans lequel un miroir plan secondaire renvoie à 90° le faisceau du miroir primaire vers l'oculaire.

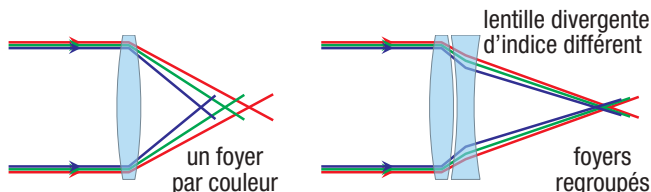
Toujours plus grand...

L'augmentation de la taille des lunettes et des télescopes a deux objectifs : améliorer la **sensibilité** afin de voir les objets célestes lointains et faiblement lumineux ; gagner en **résolution angulaire** afin de distinguer des objets célestes proches l'un de l'autre.

Augmenter la taille des lentilles pose divers problèmes, résolus en partie au XIX^e siècle : l'épaisseur étant plus grande, il faut un verre plus transparent ; il faut aussi corriger l'aberration chromatique en utilisant un doublet achromatique ; enfin, les lentilles étant maintenues par leur bord, les déformations dues à la gravité sont très sensibles.

Jusqu'au XIX^e siècle, les miroirs sont faits de métal poli, souvent du bronze qui renvoie au mieux 33% de la lumière. À partir de 1851, les miroirs sont réalisés par dépôt d'une fine couche d'argent ou d'aluminium sur un verre poli : la structure est plus légère, plus rigide, moins sensible aux variations de température et la surface est plus réfléchissante.

Aberration chromatique d'une lentille : les rayons convergent en des points différents selon leur couleur. On peut regrouper les foyers en ajoutant une lentille divergente d'indice différent et de focale plus élevée. On obtient un **doublet achromatique**, plus lourd et plus difficile à réaliser puisqu'il faut polir 4 faces.

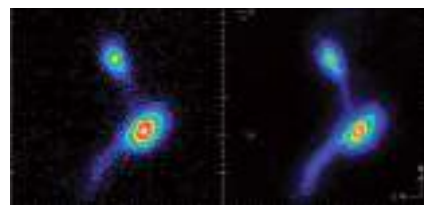


Sensibilité et résolution

L'invention de la **photographie** au XIX^e siècle a permis un gain de sensibilité, en autorisant des temps de pose très longs. À partir des années 1970, des **capteurs CCD** encore plus sensibles ont été utilisés. De plus, ces enregistreurs ont apporté une quantification plus objective de la lumière reçue des objets célestes.

Les turbulences de l'atmosphère terrestre dégradent la résolution des télescopes : dans les meilleures conditions atmosphériques, la résolution est déjà maximale avec une ouverture de 20 cm ! Placé au-dessus de l'atmosphère, le télescope spatial Hubble a été une réponse à ce problème. Pour les télescopes terrestres, une solution astucieuse est l'**optique adaptative** : de 200 à 1000 fois par seconde, un miroir secondaire « flexible » est déformé pour corriger les perturbations induites par l'atmosphère.

Deux images du couple de galaxies en interaction IRAS 09061-1248, sans optique adaptative à gauche et avec optique adaptative à droite.

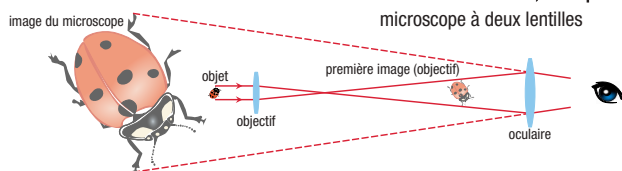


© ESO

Le microscope

Les microscopes sont des systèmes optiques qui permettent de plonger notre regard dans des mondes minuscules.

Agrandir une image



Dans un microscope à deux lentilles, l'objectif produit une première image agrandie sur laquelle l'oculaire agit comme une loupe. Les deux lentilles participent donc au grossissement.

Un **microscope** a pour but de former des images agrandies d'objets. Une lentille convergente, utilisée comme une loupe, est la solution la plus simple. Mais le grossissement ne repose que sur la puissance de l'unique lentille, ce qui en limite ses capacités. Le microscope à deux lentilles s'est révélé plus pratique et plus puissant : chaque lentille participe au grossissement.

Micrographia, publié en 1665 par Robert Hooke, est le premier livre décrivant des observations faites au moyen d'un microscope à deux lentilles. L'observation de coupes minces de liège permet à Hooke de découvrir l'unité essentielle à la vie, qu'il nomma « cellule » : la microbiologie était née.

À partir du XVIII^e siècle, la mise en place de l'optique dans un tube métallique, la mise au point précise de l'image par tige filetée ou crémaillère, la réduction des aberrations sphérique et chromatique et l'invention du barillet à objectifs interchangeables, ont permis d'obtenir des images de qualité supérieure et un meilleur confort d'utilisation.

Gagner en précision

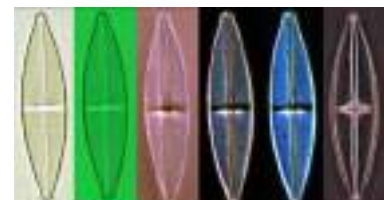


1660 1738 1820 1857-65 1875 1880 1920 Aujourd'hui
Évolution des microscopes depuis le XVII^e siècle.

La microscopie quantitative est née au XIX^e siècle avec l'étalonnage du système optique qui permet de déterminer la taille des éléments observés, l'utilisation du prisme de Nicol pour étudier des cristaux en lumière polarisée, la photographie qui permet des études comparatives...

Résolution et contraste

Microalgue aquatique vue au microscope avec diverses techniques d'éclairage : chacune peut révéler des structures et des détails différents.



lumière traversante (champ clair) lumière traversante (filtre vert) éclairage oblique circulaire champ sombre champ sombre (filtre bleu) contraste de phase
© G. Overney

Différentes techniques ont permis d'adapter la microscopie à des échantillons de natures très différentes, comme celle du **champ sombre**, qui ne laisse voir que la lumière déviée par l'échantillon, celle du **contraste de phase**, qui utilise les changements de phase de la lumière qui traverse l'échantillon, et celle du **contraste interférentiel**, qui est sensible à la biréfringence de l'échantillon.

La résolution d'un microscope optique est limitée par la longueur d'onde de la lumière visible et ne peut descendre sous 400 nm, avec un grossissement maximal de 2000 fois. Le **microscope électronique**, conçu dans les années 1930, remplace la lumière par un faisceau d'électrons. Il permet aujourd'hui d'atteindre des résolutions jusqu'à 50 pm = 10^{-12} m et des grossissements jusqu'à 10 millions de fois.

Agrandissements successifs d'un flocon de neige, de 93 à 36000 fois, par un microscope électronique à balayage.



© Brian0918

Lumières sur la ville

L'éclairage public participe de la politique urbaine : son histoire est aussi celle des sources de lumière.

Historique



Dès le Moyen Âge, pour lutter contre l'insécurité, des ordonnances obligent les citoyens à suspendre une lumière aux fenêtres. Les lanternes garnies de chandelles apparaissent au XVII^e siècle, suivies au XVIII^e par des réverbères à huile. Avec l'installation des réseaux de gaz, puis d'électricité, l'éclairage urbain devient systématique au XIX^e siècle. Jusqu'aux années 1960, l'extension du réseau d'éclairage répond en priorité aux besoins basiques : circulation nocturne sur l'espace public et sécurisation.



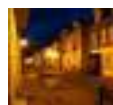
lampes à incandescence
années 1900 à 1930
consommation très importante
durée de vie faible (1000 heures = 3 mois)

ballon fluorescent à vapeurs de mercure
années 1930 à 2000
consommation plus faible
durée de vie intéressante (2 à 3 ans)
lumière blanche « fade »
restitution des couleurs moyenne



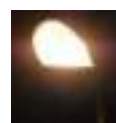
néon fluorescent
bonne efficacité lumineuse
puissance limitée par lampe
très peu utilisé en France

sodium basse pression
excellente efficacité lumineuse
lumière monochrome jaune
plutôt utilisé dans les tunnels



sodium haute pression
à partir des années 1970
efficacité lumineuse entre ballons fluos
et sodium basse pression
durée de vie de 4 à 7 ans
lumière dorée (jaune-orangée)

iodure métallique
lumière blanche de bonne qualité
efficacité lumineuse intéressante
proche sodium haute pression
durée de vie 3 à 4 ans
coût de la lampe important



led
qualité de lumière excellente
contrôle de l'intensité
pilotage informatique
durée de vie annoncée très longue
coût encore élevé

Diversité des éclairages installés et leurs caractéristiques.

Les lanternes à gaz devaient être allumées et éteintes à la main tous les jours.

La consommation énergétique

Le faible rendement lumineux des sources et une puissance électrique limitée ont d'abord contraint l'éclairage urbain. Puis l'augmentation du rendement lumineux a été telle qu'une part de puissance électrique était utilisée pour créer des ambiances dans les espaces publics. Dans les années 2000, la conscience environnementale a conduit à une diminution des niveaux d'éclairage vers des valeurs nécessaires mais suffisantes. L'Association Française de l'Éclairage en a fait son slogan : **éclairer juste**. Depuis, des directives européennes mènent à la suppression progressive des sources énergivores et des luminaires émettant vers le ciel.



© T. Masson L'éclairage public sert aussi à mettre en valeur le patrimoine urbain : ici à Marseille les Docks, la place Sadi Carnot et la préfecture.

Deux lampadaires « boule », au design contemporain sur la plage du Prado à Marseille et au style ancien sur le bord de mer à Étretat. Ces luminaires peu efficaces sont progressivement supprimés pour diminuer la dépense énergétique.



© Ville de Marseille



© T. Masson



© T. Masson

Éclairage sur la Corniche Kennedy à Marseille :

au fond à droite, la lumière orangée est produite par des sources sodium haute pression ; au premier plan, la lumière blanche est produite par des leds installées en 2015.

La pollution lumineuse



© NASA/NOAA

Image satellite de la France de nuit vue par le satellite Suomi NPP en 2012. On notera la forte lumière au dessus du Bénélux où les autoroutes sont éclairées la nuit.

Au début du XX^e siècle, les astronomes ont été les premiers à s'inquiéter de l'éclairage artificiel nocturne qui masquait le ciel étoilé et a conduit à l'arrêt d'observatoires astronomiques en zones périurbaines. Les particules en suspension et la vapeur d'eau créées par l'activité humaine stagnent au dessus des villes : la nuit, la diffusion de la lumière urbaine par ce nuage crée un halo lumineux.

L'éclairage urbain a une influence sur la faune. Les cycles biologiques jour/nuit sont perturbés. De nombreux insectes, attirés par la lumière, sont tués par des ampoules non protégées ou victimes d'une prédation plus facile. À la tombée de la nuit, nombre de prédateurs chassent ; la suppression de cet instant crépusculaire modifie les comportements et mène à la disparition ou à la migration des espèces. Le déplacement de certains oiseaux migrateurs est aussi modifié.

Pour limiter cette pollution lumineuse, différentes solutions sont envisagées : extinction totale, extinction programmée, allumage retardé...

Marseille...



© ANPCEN

En décembre 2014, le Conseil Municipal de la Ville de Marseille a validé le lancement d'un plan d'économies d'énergie de 6 000 000 € sur 5 ans :

- mesure précise des consommations pour piloter le plan ;
- variation de l'intensité de l'éclairage en fonction de l'heure de la nuit et de l'usage ;
- déploiement de luminaires performants, dont des leds dans les zones où elles sont rentables ;
- réflexion approfondie sur les espaces verts et les bordures d'espaces naturels sensibles.



Manipulations

Lumières de la ville

Quatre sources lumineuses typiques des éclairages publics éclairent le même objet. En haut, à gauche : Une lampe à incandescence de 100W, à droite : une lampe à vapeur de sodium de 150W ; En bas, à gauche : une lampe à vapeur de Mercure de 100W, à droite : une lampe aux iodures métalliques de 150W. Le choix des sources lumineuses utilisées par la ville est gouverné par la consommation de l'éclairage mais aussi par les raisons esthétiques...



© photo : E. Salançon / expérience :  MARSAILLE

Lumière, outil de mesure

Vitesse, fréquence, phase et polarisation font de la lumière un outil de mesure précis et polyvalent.

Vitesse

Depuis 1983, la vitesse de la lumière dans le vide est une constante universelle et le mètre est défini comme le trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de $1/299\,792\,458$ seconde : **la lumière est l'outil fondamental pour mesurer des longueurs**. Les **télémètres laser** mesurent le temps d'aller-retour d'un faisceau laser se réfléchissant sur une cible.



© NASA



© J. Werther

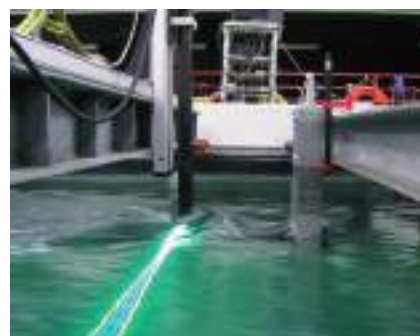
Depuis la première mission Apollo en 1969, plusieurs réflecteurs ont été installés sur la Lune. La lumière met 2,56 s pour faire l'aller-retour, la distance Terre-Lune est donc de 384467 km. Les mesures accumulées sur plus de 40 ans montrent que la Lune s'éloigne de la Terre d'environ 3,8 centimètres par an.

Un faisceau de lumière réfléchi par un objet en mouvement est décalé en fréquence : c'est l'**effet Doppler-Fizeau**. La mesure de ce décalage permet de déterminer la vitesse de l'objet. Dans un **vélocimètre laser**, un faisceau laser permet de mesurer la vitesse de particules très fines entraînées par un fluide, comme l'air ou l'eau. La vitesse du fluide porteur est ainsi mesurée localement. Le **vibromètre laser** permet de mesurer la fréquence, la phase et l'amplitude d'une surface vibrante : matériaux liquides, structures très petites ou légères, comme des membranes de haut-parleurs.

Fréquence



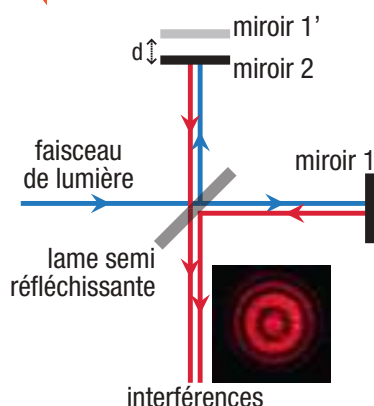
© Ifremer



© Ifremer

Mesures par vélocimétrie laser du sillage émis par une hydrolienne dans un bassin à houle.

Phase



Un **interféromètre** produit des figures d'interférences avec des faisceaux originellement cohérents ayant parcouru des chemins différents, ce qui permet de mesurer des petits déplacements, la planéité de miroirs ou de surfaces, des indices de réfractions, des longueurs d'onde...

L'**interféromètre de Michelson** a permis à Michelson et Morley de montrer, à la fin du XIX^e siècle, que la vitesse de la lumière dans le vide ne dépend pas de l'observateur.

Un **interféromètre de Mirau** est un interféromètre de Michelson monté sur un microscope : l'échantillon joue le rôle d'un des miroirs et les franges d'interférences donnent des informations sur son épaisseur et son inclinaison.

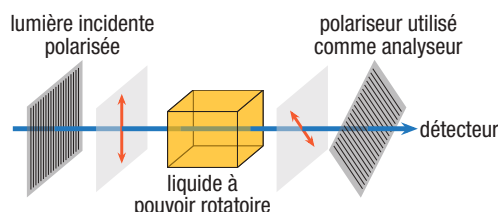
L'interféromètre de Michelson permet de mesurer les variations des longueurs de ses deux bras (rouge et bleu).

Polarisation

La polarisation de la lumière est modifiée par réflexion sur certaines surfaces.

L'**ellipsométrie** utilise cette propriété pour mesurer certaines caractéristiques de matériaux : paramètres optiques, épaisseur de couches minces, composition, nature cristalline, conductivité électrique, rugosité de surface... Certains composés chimiques ont un **pouvoir rotatoire** : ils modifient la polarisation de la lumière qui les traverse. La mesure de la déviation de la polarisation permet d'estimer leur concentration.

Le pouvoir rotatoire d'une molécule permet de déterminer sa concentration dans une solution liquide transparente, car plus la molécule est présente, plus l'effet rotatoire est important.



Les lumières du peintre

Pendant longtemps confinés entre les murs de l'atelier et à la lumière de la bougie, les peintres découvrent de nouveaux éclairages au XIX^e siècle.

Avec les progrès de l'industrie, la bougie est remplacée par de nouveaux éclairages (pétrole, gaz, électricité) qui deviennent autant de nouveaux sujets à représenter et de nouvelles lumières à utiliser et à maîtriser.

La lumière de l'atelier



Dans l'atelier du peintre, les baies et les verrières sont orientées vers le nord afin de laisser pénétrer une lumière uniforme et constante. Lieu de travail, l'atelier est aussi un espace de réception pour les peintres qui exposent leurs œuvres sous leur meilleur jour.

Après avoir traduit les effets de la lumière en plein air dans *La Grande Jatte*, Seurat poursuit ses expérimentations techniques dans son atelier. Grâce à la division de

la touche, l'artiste met en valeur une autre luminosité, plus froide et plus constante, et l'utilise pour le nu féminin.

Georges Seurat, *Les Poseuses*, 1888, Philadelphie, Fondation Barnes.



Frédéric Bazille, *L'Atelier de Bazille*, 1870, Paris, Musée d'Orsay.

Peindre à la lumière naturelle

Pour les impressionnistes, maîtriser l'intégration de la figure dans un paysage en plein air est un des enjeux de la modernité. En choisissant de cadrer en contre-plongée, Monet place son sujet dans les nuages et l'entoure d'air et de lumière. Les reflets lumineux sur les nuages, la robe et les herbes hautes participent dès lors à cette réunification.



D'abord décontenancé par la lumière – « le soleil y est ici effrayant » écrit-il en 1876 –,

Cézanne parvient à maîtriser la nature méditerranéenne qu'il peut peindre lentement en raison de sa stabilité climatique. Préférant travailler par temps gris, Cézanne utilise une lumière toujours égale et une touche très construite pour unifier les plans chauds et froids.

Claude Monet, *Femme à l'ombrelle tournée vers la gauche*, 1886, Paris, Musée d'Orsay.

Paul Cézanne, *Vue de la Montagne Sainte Victoire*, 1904, Chicago, The Art Institute.



Peindre à la lumière artificielle

Au XIX^e siècle, Paris devient la capitale de la nuit grâce aux cabarets et aux théâtres. Éclairés au gaz ou à la lumière électrique, ces lieux de plaisirs se caractérisent par la multiplicité des sources lumineuses à maîtriser.



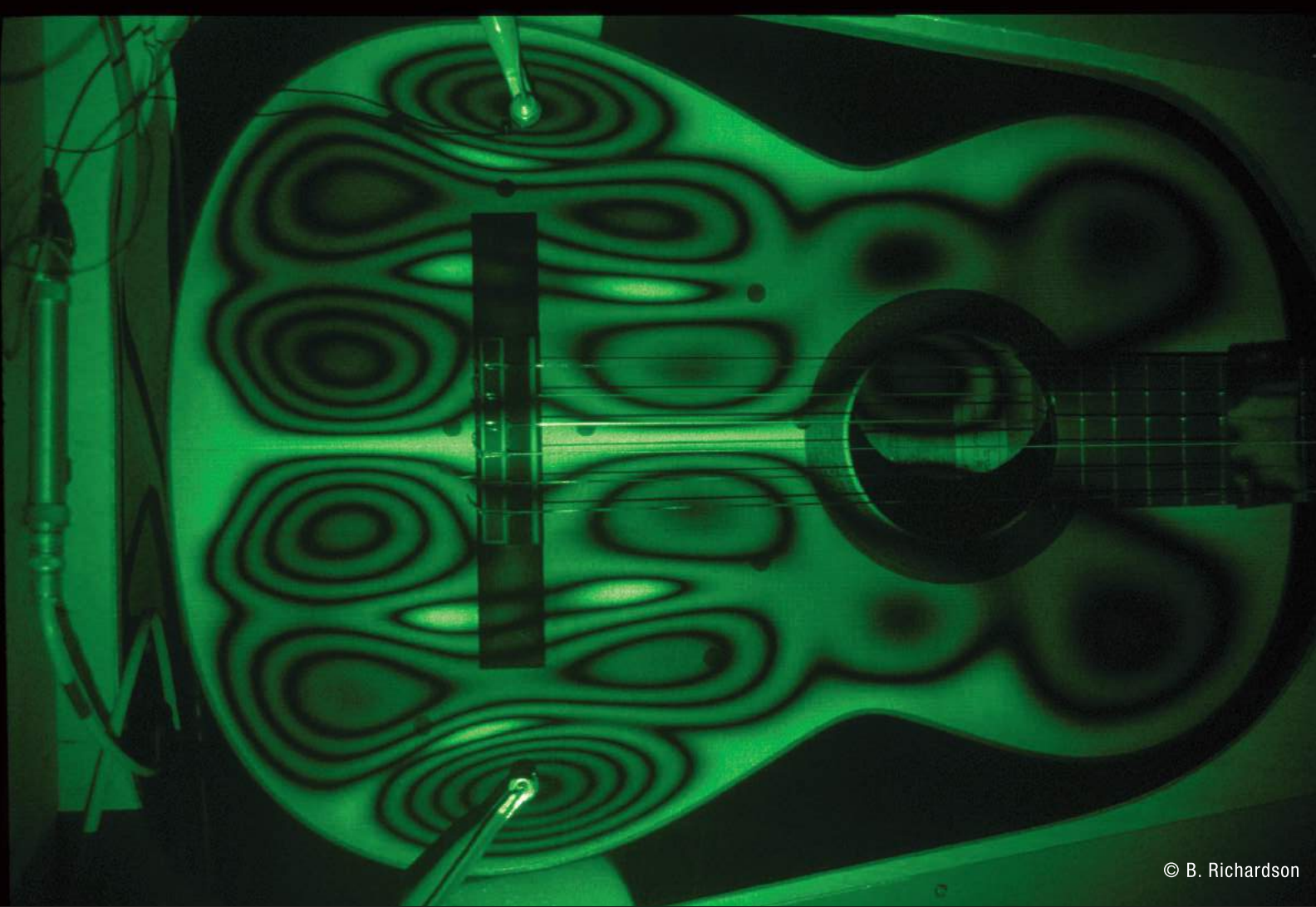
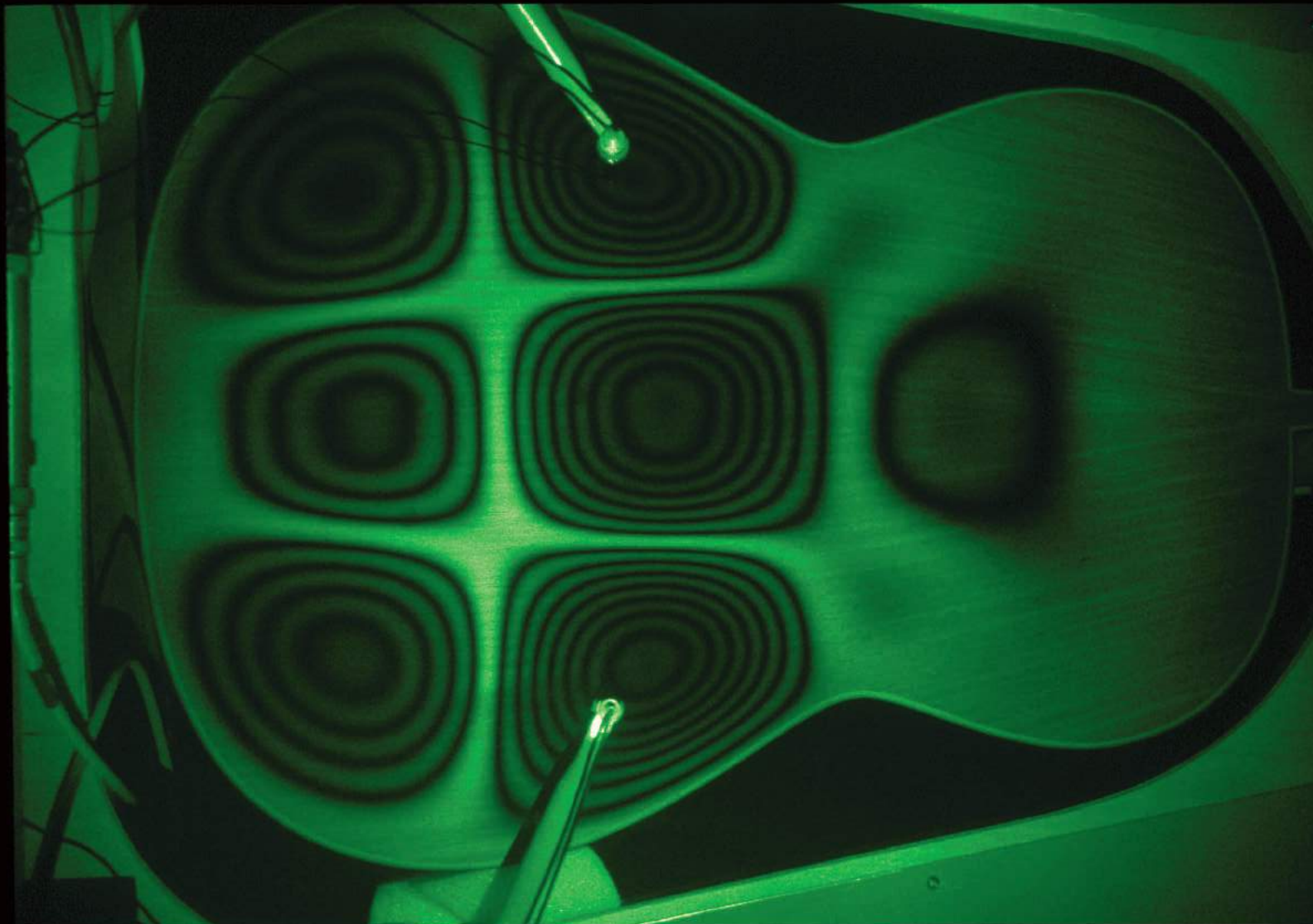
Soumis à la brutalité de l'éclairage artificiel, les visages se déforment et se parent de rouge, de vert et de bleu.

Henri de Toulouse-Lautrec, *Au Moulin Rouge, la Danse*, 1890, Philadelphie, Museum of Art.

Outre l'utilisation de réverbères qui se généralise au XIX^e siècle, les boutiques et les cafés s'illuminent également comme à Arles. Associée à la clarté des nuits dans le Midi, cette terrasse de café est l'occasion pour Van Gogh de réaliser une nocturne toute en couleurs et de représenter la douceur des nuits arlésiennes.

Vincent Van Gogh, *Terrasse du café, le soir, place du Forum, Arles*, 1888, Otterlo, Kröller-Müller Museum.





Pôle 6 : Dompter et jouer

Ce pôle montre comment on est parvenu à dompter la lumière pour notre plaisir, en évoquant l'histoire et les techniques de la photographie, le principe de l'holographie, les compositions artistiques autour de la lumière, ou encore le jeu des ombres et des lumières... Ce pôle se veut plus récréatif que les autres et propose des expériences interactives ludiques, ainsi que des objets étonnants réalisés avec et autour de la lumière (hologrammes, photogrammes, lightpainting, ambrotypes...).

La photographie

La photographie n'est pas seulement l'art du cadrage ou de l'instant : c'est aussi l'art d'utiliser quelques paramètres techniques pour aboutir à des photos plus créatives. Oublions le mode « tout automatique »...

Deux paramètres règlent l'**exposition** – nombre de photons accumulés – du capteur d'un appareil photo : l'**ouverture** du diaphragme et le **temps de pose**.

Une bonne exposition résulte d'un jeu subtil entre ouverture et temps de pose : une faible ouverture nécessite un temps de pose important pour accumuler suffisamment de lumière.

Ouverture

L'ouverture du diaphragme s'exprime par la lettre 'f' suivie d'une barre et d'un nombre : f/5, f/11, f/22, etc. Un diaphragme ouvert à f/1.8 laisse passer beaucoup de lumière et réduit donc le temps de pose nécessaire. Mais une telle ouverture réduit beaucoup la profondeur de champ, c'est-à-dire la distance sur laquelle la scène apparaît nette.

Une ouverture intermédiaire, entre f/8 et f/11, est recommandée pour obtenir un bon piqué.



© G. Baffou
Faible ouverture. La photo est nette sur une grande profondeur. 1/2 s, f/11.



© G. Baffou
Grande ouverture. La profondeur de champ est réduite. 1/60 s, f/2.

Temps de pose

Les temps de pose classiques varient de 1/8000ème de seconde à quelques secondes. Un faible temps de pose permet de figer la scène sans flou de bougé. Ce n'est pas possible si la scène est peu lumineuse : il est très difficile de prendre des photos nettes la nuit !



© G. Baffou
Court temps de pose. Et la chute d'eau apparaît figée. 1/80 s, f/4.5.



© G. Baffou
Long temps de pose. Et la chute d'eau devient cotonneuse. 1/2 s, f/29.



1.
© G. Baffou



2.
© G. Baffou



3.
© G. Baffou

1. Long temps de pose. Et les voitures de nuit se transforment en lignes lumineuses. 10 s, f/22.
2. Long temps de pose. Permet d'obtenir des scènes fantomatiques. 30 s, f/22.
3. Court temps de pose. Saisit une scène dynamique sans flou de bougé. 1/2500 s, f/6.3.

L'exposition du capteur d'un appareil photo est limitée.

Si trop de lumière parvient au capteur, il sature : des zones blanches apparaissent sur la photo. Elles sont dites **brûlées** ou **suresposées**.

Si trop peu de lumière parvient au capteur, l'image est sombre et sous-exposée.

Avec un logiciel de retouche, il est possible d'augmenter artificiellement l'exposition d'une photo sous-exposée, mais en générant du bruit sur l'image. En revanche, il n'est pas possible de récupérer des zones surexposées : il est donc préférable de sous-exposer ses photos.

Surexposition et sous-exposition



© G. Baffou

Photographies à l'ancienne

Des photographes font sortir de l'ombre des techniques photographiques anciennes pour fixer la réalité moderne.

À l'origine, la photographie est une technique destinée à enregistrer d'une façon permanente et par des moyens physico-chimiques, les images formées par la lumière dans une chambre noire.

Retour sur la « peinture de lumière »...



Joseph Nicéphore Niépce.

1812 - Joseph Nicéphore Niépce (1765–1833) invente la surface photosensible.

1819 - John Herschel (1792–1871) invente le fixateur.

1833 - William Talbot (1800–1877) invente le photogramme : l'image est obtenue en plaçant des objets sur une surface photosensible et en l'exposant directement à la lumière.

1851 - Frederick Archer (1813–1857) invente le collodion humide : surface photosensible à base de nitrate de cellulose.

1854 - James Cutting (1814–1867) invente l'ambrotype : un négatif sur plaque de verre au collodion.

1923 - Man Ray (1890–1976) invente le rayogramme : une « photographie obtenue par simple interposition de l'objet entre le papier sensible et la source lumineuse ».



Bulbe d'étrave.

© M. Parent



© M. Parent

Traitement chimique.

L'ambrotype produit un positif en noir et blanc : une épreuve unique, d'une force et d'une beauté dont le pixel, boudoir et binaire, pourra encore longtemps rêver ; une plastique intemporelle qui interpelle et interroge le spectateur et l'invite à regarder l'image de plus près.

L'ambrotype suscite la rencontre : ce procédé, par sa faible sensibilité, entre 2 et 3 ISO, nécessite un long temps de pause. Le temps devient vecteur de création.

Deux artistes font revivre ces techniques.



© J. Monnoyer

Les objets du quotidien deviennent des pochoirs qui se reconnaissent par leurs ombres et leurs transparences !

L'ambrotype

L'ambrotype est une plaque rendue photosensible par une cascade de réactions chimiques (collodion) pour donner un positif direct.

“La magie réside dans l'instant”



© M. Parent

La rencontre.

Jocelyn Monnoyer dompte la lumière grâce au photogramme, tandis que Matthieu Parent fait revivre l'ambrotype.
www.jocelyn.in
matthieuparent.net

Le photogramme

Le photogramme consiste à déposer un objet sur un papier photosensible et à y faire interagir la lumière. Le papier est ensuite traité comme pour un développement photo classique : révélation, arrêt, fixation. Pas d'appareil photo : du papier, un objet et de la lumière.

Le verre est créateur de surprises : la lumière est déviée avant d'être capturée sur le papier.

Principe de l'holographie

L'holographie est une technique de réalisation d'images en 3D. Explications...

Principe



La formation de l'image 3D passe par la reconstruction – à l'aide d'un éclairage spécifique – d'une figure d'interférences enregistrée sur un support. Cet enregistrement est produit grâce à deux faisceaux de lumière cohérents.

Inventée par Dennis Gabor en 1948, l'holographie n'a été mise en application qu'en 1963 grâce à l'invention du laser.

60 ans après la parution de l'article de Dennis Gabor, Alexandre Escarguel d'Aix Marseille Université, développe une mallette à destination du grand public.

Premier hologramme réalisé par Dennis Gabor en 1948.

Une partie de la collection d'hologrammes est aussi exposée, mettant tour à tour en évidence l'interférométrie holographique avec « l'oeuf dans l'étau », l'holographie « humaine avec le chevalier », etc... Voir Annexe page 94.



Matériel de la mallette holographique.

+



Grand public.

=

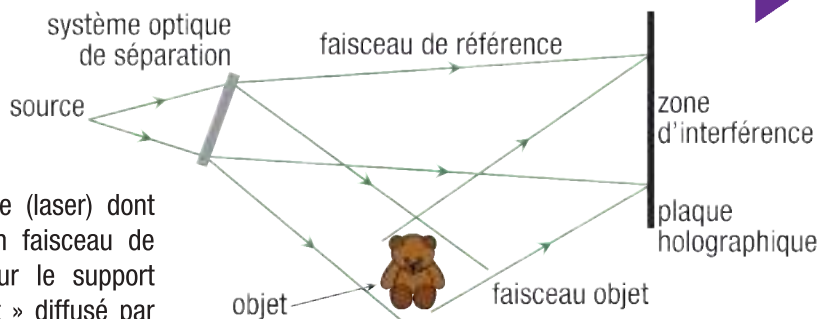


Hologramme.

Pour enregistrer un hologramme, il faut :

1. un support photosensible sur lequel sont déposés des grains de sels d'argent de taille beaucoup plus petite que ceux de la photographie argentique ordinaire.

2. une source de lumière cohérente (laser) dont on divise le faisceau en deux : un faisceau de « référence » dirigé directement sur le support photosensible et un faisceau « objet » diffusé par l'objet.



Enregistrement de l'hologramme

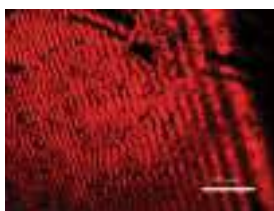
L'interférence entre deux faisceaux permet d'enregistrer sur le support photosensible l'information sur le relief de l'objet dont on fait l'hologramme.

Reconstruction de l'hologramme

Étonnant !

Il est possible de réaliser des hologrammes qui permettent de voir à travers un objet transparent ou d'autres qui permettent de tourner autour de l'image de l'objet.

Si on casse un hologramme, un seul morceau permet encore de reconstruire l'image 3D de l'objet... du moins en partie.



Franges d'interférences vues au microscope.

À voir

Le musée de l'holographie propose de beaux hologrammes : www.museeholographie.com

Hologramme d'un réveil pris sous plusieurs angles d'éclairage.



© A. Escarguel / E. Salançon

Applications de l'holographie

Les hologrammes ne sont pas que des objets décoratifs : leur diversité peut être mise à profit dans bien des domaines.

Les différents types d'hologrammes



Un **hologramme numérique** est soit enregistré par une caméra CCD, soit simulé à partir d'une vision tomographique (objet photographié selon plusieurs angles de vue). Il existe désormais des imprimantes pour fabriquer « numériquement » des hologrammes.

Hologramme en réflexion : ils sont utilisés de préférence pour les présentations au public.

Hologramme en transmission : cette technique a de nombreuses applications pratiques. Par exemple, on peut réaliser un microscope 3D en utilisant, pour la reconstruction, un faisceau de référence de plus grande longueur d'onde que celui utilisé pour l'enregistrement.



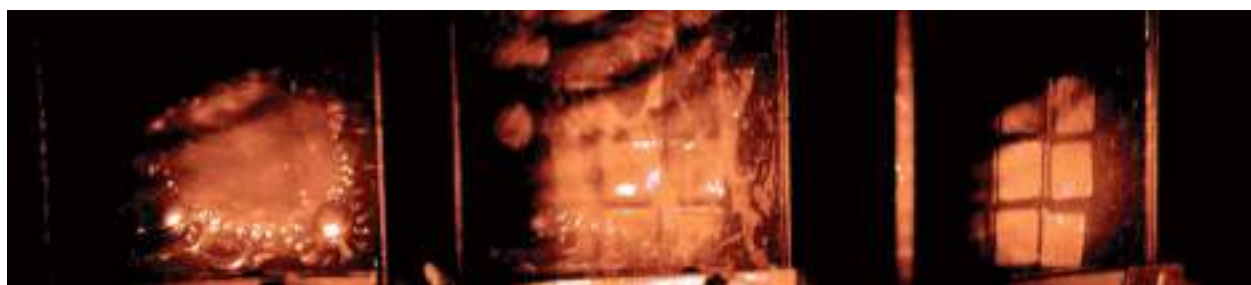
L'holographie couleur a atteint la perfection avec Yves Gentet.

www.ultimate-holography.com

Pour recomposer l'ensemble du spectre visible, trois sources laser (rouge, verte, bleue) éclairent en même temps l'objet à holographier. Trois figures d'interférence sont enregistrées. Une source polychromatique est nécessaire pour reconstruire l'hologramme en couleur. Notre œil recompose la couleur à partir du rouge, du vert et du bleu (comme pour la télévision).

Le **stockage de l'information** en HVD (Holographic Versatile Disc) décuple les capacités de stockage (3,9 To) en donnant la possibilité d'utiliser plusieurs angles de lecture.

Applications de l'holographie



Sur cette plaque holographique, on peut voir un bijou sous un angle de 40° (à gauche), un Rubik's cube sous un angle de 60° (à droite) et le mélange des deux images sous un angle de 50° (au centre).

On peut mesurer des déformations mécaniques en utilisant l'**interférométrie holographique**. L'enregistrement sur la plaque holographique se fait avant et après déformation : l'image de l'objet apparaît avec des franges d'interférence caractéristiques de la déformation.

Les faux hologrammes...

Il est d'usage d'employer le mot « hologramme » pour de nombreux systèmes de visualisation en relief. En réalité, ce sont souvent d'autres techniques qui sont employées.

Le cerveau perçoit le relief en combinant deux images planes décalées provenant de chacun de nos yeux. C'est le principe de la stéréoscopie, que plusieurs technologies mettent en œuvre : réseaux lenticulaires (« hologrammes » de sécurité, télévision 3D), polarisation de la lumière (cinéma 3D), jeu de miroirs (fantôme de Pepper)...

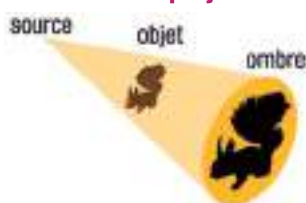
Faire des ombres

Elles nous suivent, elles nous poursuivent, elles sont notre prolongement, notre sombre portrait, impossible de nous en séparer : ce sont nos ombres.

L'ombre géométrique

Il n'est pas d'ombre sans lumière, car l'ombre est la zone sombre créée par un objet qui intercepte la lumière.

Sur une surface, l'ombre se dessine comme une silhouette sans épaisseur : c'est une projection déformée de l'objet.



© T. Masson



© E. Salançon

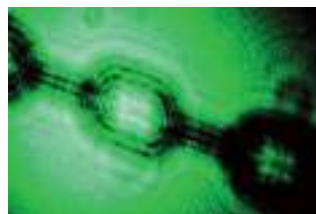
Sur cette photo, l'ombre de la tête des vis est floue alors que celle du corps des vis est nette.

L'ombre peut devenir floue lorsqu'elle grossit... Pour conserver la netteté de l'image tout en grandissant l'ombre de l'objet, la source de lumière doit être intense et ponctuelle.

Pour une source de lumière polychromatique (plusieurs couleurs), l'ombre est « **géométrique** » : l'ombre a des bords nets.



© E. Salançon

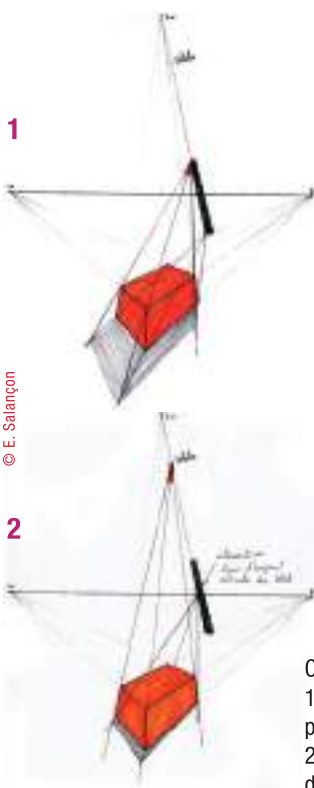


© E. Salançon

Pour une source de lumière monochromatique (une couleur), l'ombre est « **physique** » : les bords de l'ombre sont modulés par des traits.

La nature des sources guide la représentation des rayons lumineux.

Dessiner l'ombre géométrique



© E. Salançon

Les limites géométriques de l'ombre portée se représentent grâce aux points d'intersection entre les rayons lumineux qui passent par les bords de l'objet et les lignes de fuite définissant la perspective.

En dessin, la représentation des ombres est essentielle pour donner une impression d'éclairage réel.

Pour reproduire les ombres portées, il faut maîtriser les techniques de la perspective et connaître la nature et la provenance de la source de lumière.

Il faut donc distinguer :

- 1- Les sources de lumière artificielles (lampe, néon...) pour lesquelles les rayons lumineux sont divergents.
- 2- Des sources de lumière naturelles (Soleil, Lune, étoiles...), pour lesquelles les rayons lumineux sont parallèles.

Croquis de représentations des ombres.

1- Dans le cas d'une source artificielle (ponctuelle), il faut utiliser l'intersection des lignes de fuite issues du pied du lampadaire avec les faisceaux provenant de la source.

2- Dans le cas d'une source naturelle (à l'infini), il faut utiliser l'intersection des lignes de fuite issues du point d'intersection entre la verticale de la source et la ligne d'horizon avec les faisceaux provenant de la source.

L'ombre permet de se jouer de nos sens. L'art ne s'en prive pas...

Dessin des ombres

L'ombre portée est nécessaire pour apporter du réalisme à un dessin.



Sans ombre portée, l'âne de gauche semble flotter dans les airs, contrairement à son voisin.

Les photographes jouent des contre-jours en plaçant leur appareil photo dans l'ombre de l'objet. Le but est d'obtenir des images très contrastées et des silhouettes mises en valeur (détails et couleurs estompés).

L'art de la silhouette commence avec la légende de Dibutade racontée par Pliny l'Ancien : pour conserver son image, elle dessine sur un mur l'ombre de son amant qui s'en va. Jean-Baptiste Regnault, *Dibutade ou l'Origine de la peinture*, 1785, Versailles, Salon des Nobles du Château de Versailles.

Utiliser l'ombre

Qianlong Set,
Les deux guerriers, 1780, Offenbach,
Deutsches Ledermuseum.



Les théâtres d'ombres sont nés en Orient. Les premières traces remontent à 121 av. JC.



“ Peut-on faire d'heureux portraits,
Quand la beauté ne prête que son ombre ? ”

Charles-Pierre Colardeau

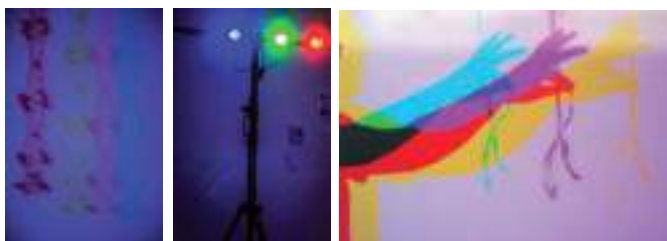
L'artiste peut créer des effets poétiques en jouant avec une représentation de l'ombre portée non conforme à ce qu'elle serait en réalité, comme par exemple sur la couverture de ces deux livres.

La lumière de face



Manipulations

Fabrique de couleurs



Trois leds de couleurs rouge, verte et bleue éclairent un objet face à un mur blanc. L'ombre de l'objet formée par la led verte, apparaît couleur magenta, mélange du rouge et du bleu ; celle formée par la led rouge apparaît couleur cyan ; celle formée par la led bleue apparaît jaune. Un jeu grandeur nature pour le visiteur...

Brillance au cœur des sources : l'ombre



Une source étendue à base de leds, équipée d'un diaphragme que le visiteur peut actionner, éclaire une diapositive transparente. L'ombre formée est floue lorsque le diaphragme est ouvert mais bien visible sur l'écran ; lorsque le diaphragme est fermé, l'ombre est nette mais moins visible. Le visiteur peut ainsi appréhender la notion de cohérence spatiale. Plus la source est étendue, moins les effets ondulatoires peuvent apparaître.

Les ombres en architecture

Au cours du temps, artistes et architectes ont travaillé avec la lumière, et donc avec l'ombre, pour différentes raisons.

L'ombre, c'est l'absence de lumière. Mais il n'y a pas qu'une ombre... Elle présente différentes caractéristiques selon l'intensité ou l'orientation de la source de lumière qui la produit.

Faire vivre une expérience sensorielle



Voyage à Nantes, artiste : Elsa Tomkowiak, Théâtre Graslin, Nantes, 2014.

Par la lumière naturelle ou artificielle, il est possible de vivre des expériences sensibles, c'est-à-dire qui sollicitent tous les sens. Dans ce cas, grâce à des installations constituées d'éléments variés, la lumière est rendue presque palpable pour donner l'impression de s'y plonger complètement ! Cela peut créer des ombres très fortes avec lesquelles on peut jouer ou au contraire, les faire disparaître.

“ L'architecture est le jeu, savant, correct et magnifique des volumes sous la lumière. ”

Le Corbusier, *Vers une architecture*. Paris, Crès, 1923.



© C. Drozd Exposition MONUMENTA, artiste : Anish Kapoor, Leviathan, Grand Palais, Paris, 2011.



© C. Drozd Ombres de la verrière du Grand Palais, Paris.

Montrer le temps qui passe

La course du soleil dessine sur les parois latérales et horizontales des taches de soleil qui varient au cours de la journée et au cours de l'année. Le déplacement des taches permet de montrer de manière plus évidente le temps qui passe. Les matériaux utilisés peuvent également accentuer cette perception en créant des ombres franches. C'est le principe du cadran solaire, mais à grande échelle !



Vulcania, Saint-Ours-les Roches, France, architecte : Hans Hollein, 2002.



Monastère des Hiéronymites, Lisbonne, Portugal.

Réaménagement des quais de Loire à Indre, France, concepteurs : Forma 6 et Phytolab, 2009.

Révéler l'espace par l'ombre et la lumière

En lien avec certaines activités, les concepteurs souhaitent mettre en avant une caractéristique particulière de l'espace en attirant le regard vers une volumétrie à souligner, un mobilier appelant un usage, un effet de matière, etc. Dans ce cas, la lumière sera dirigée et intense dans un espace perçu comme plutôt sombre.



© C. Drozd

Lumière, art, Op art

De la simple illusion d'optique à l'art véritable, quelques artistes ont étudié et utilisé les faiblesses de la perception visuelle pour produire des œuvres originales.

Les formes, les couleurs et les intensités lumineuses peuvent être utilisées dans des mises en scène optiques pour tromper notre système visuel, depuis l'œil jusqu'au cerveau.

Anamorphoses



Cette anamorphose nécessite un miroir cylindrique.

L'**anamorphose** consiste à déformer tout ou partie d'une œuvre par un système optique ou une transformation mathématique.

Afin de rétablir l'image originale, il faut utiliser le système optique adapté – miroir, lentille – ou prendre un point de vue particulier – angle, perspective.



Anamorphose végétale réalisée par François Abélanet en mai 2011 sur le parvis de l'Hôtel de Ville de Paris.

Une fenêtre – cadre métallique – indiquait le lieu exact du point de vue.



Réalisation d'une anamorphose.

© 007_&_07

Ce qu'on voit dépend de comment on le voit ! L'Op art est basé sur ce principe. L'artiste

cherche à déstabiliser l'œil du spectateur en s'appuyant sur des **illusions d'optique** : répétition de lignes et de motifs, forts contrastes, zones de couleurs uniformes, juxtaposition de couleurs intenses... Il en résulte des impressions de mouvements et d'ambiguïtés dans l'espace. Cet art admirable n'a pour but que l'effet visuel provoqué, sans se préoccuper de l'apport émotionnel.

Illusions d'optique et Op art



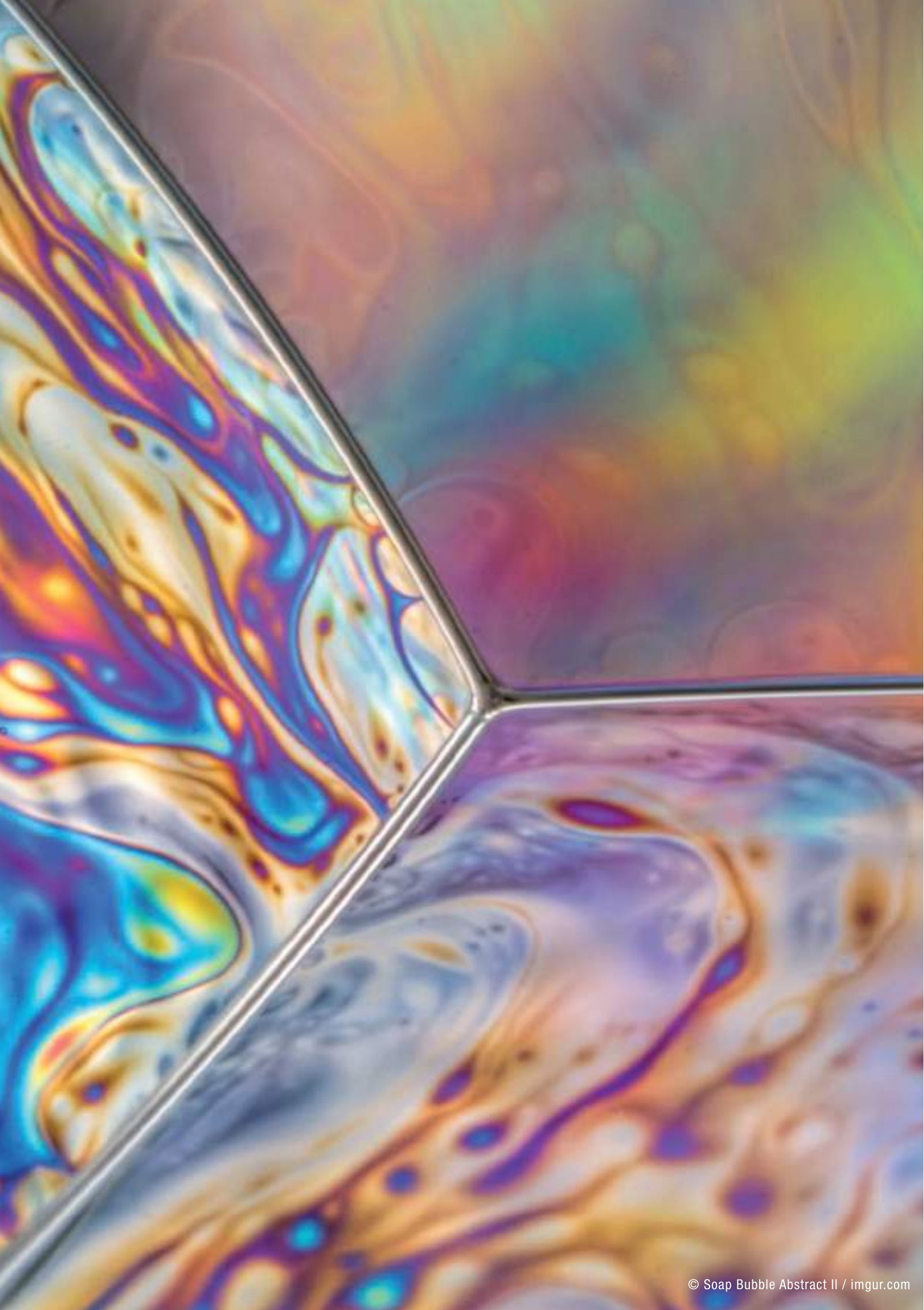
Le motif de départ est superposé avec sa rotation de quelques degrés pour faire apparaître une structure qui n'existe que dans notre perception.

En superposant deux structures répétitives, les artistes créent un effet de moiré bien connu en optique. L'interférence optique entre les motifs peut faire émerger des structures surprenantes.



Un des *VEGA* de Victor Vasarely, exposé à la Fondation Vasarely, Aix-en-Provence, Cette tapisserie suggère des volumes bombés.
« Vega-Anneaux » 582 x 582 cm 1969 - 1975, Tapisserie réalisée à Aubusson.

© Anne Fourès - Agence Luce



Pôle 7 : Comprendre et analyser

Ce pôle s'intéresse à la compréhension du phénomène de la lumière, en évoquant l'histoire des théories de la lumière et de leur mathématisation ; à la compréhension de l'Univers grâce à l'analyse des informations portées et apportées jusqu'à nous par la lumière (rayonnement fossile, détermination des distances dans l'Univers, études des objets peuplant l'Univers...). Il s'agit d'un pôle de connaissances fondamentales.

La théorie de la lumière

Comprendre la nature de la lumière, les lois auxquelles elle obéit, ses interactions avec la matière : toutes ces questions ont stimulé les plus grands penseurs depuis l'Antiquité...

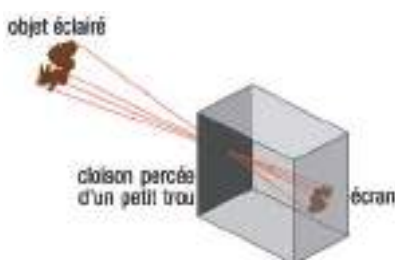
La lumière dans l'Antiquité



L'**atomiste** Lucrèce pense que la vision est semblable au toucher : tout objet émet des répliques matérielles fidèles à lui-même, appelées **membranes** ou **simulacres**, qui viennent toucher l'œil.

Pour **Platon**, la sensation de la vision d'un objet résulte de la communion de deux « semblables » : le **feu extérieur** issu de l'objet exposé à la lumière du jour et le **feu intérieur** de notre âme qui est émis à travers l'œil.

La **chambre noire** – *camera obscura* – a été largement utilisée par Alhazen pour ses expériences sur la lumière. Elle a été adoptée par les peintres et elle est à l'origine de l'appareil photographique.



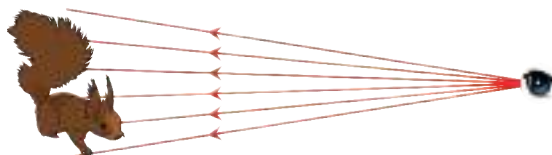
Onde ou corpuscule ?

À la fin du XVIII^e siècle, on sait fabriquer des miroirs et on comprend les lentilles. Mais on ne connaît toujours pas la nature exacte de la lumière.

Christian Huygens élabore une **théorie des ondes lumineuses** qui explique la réfraction, la biréfringence et qui s'accorde avec le **principe de moindre temps** de Fermat. Ce modèle repose sur le principe suivant : tout point de l'espace atteint par une onde lumineuse devient source d'une onde lumineuse sphérique de même fréquence et de même phase.

La réfraction selon Huygens : à l'interface air/verre, les points (en vert) atteints par l'onde lumineuse (en bleu) émettent des ondes sphériques dans le verre, à une vitesse moindre que dans l'air. L'onde résultante dans le verre (en orange), superposition des ondes sphériques, est tournée par rapport à l'onde initiale dans l'air.

Les philosophes grecs s'intéressent principalement à l'explication de la vision.



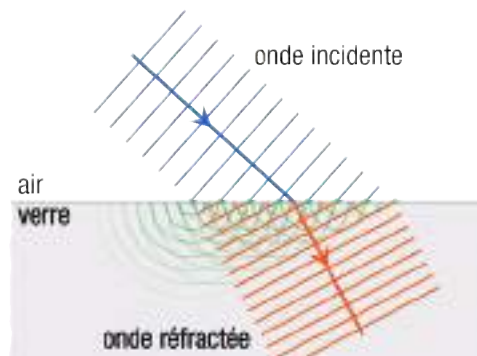
Euclide élabore les premiers principes de l'optique géométrique : les rayons visuels forment des droites qui partent de l'œil et se dirigent vers l'objet en se répartissant dans un cône dont le sommet est l'œil. Il énonce les lois de la réflexion sur des miroirs plans, concaves et convexes.

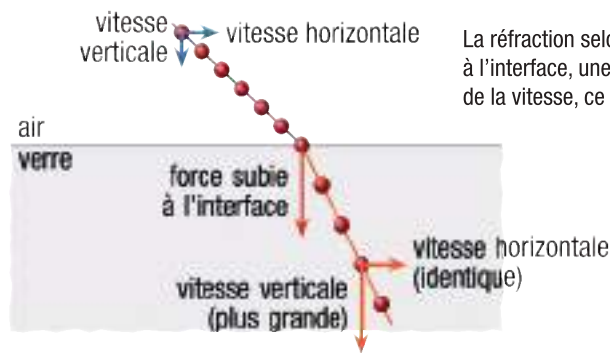
Aristote propose une théorie de la vision fondée sur l'excitation d'un « substrat intermédiaire » entre l'objet et l'œil. Pour lui, les milieux transparents possèdent une qualité commune : le **diaphane**. Le feu des objets met le diaphane en « acte » de proche en proche pour transmettre à l'œil l'impression de la vision. Là où le diaphane n'est qu'en « puissance » se trouve l'obscurité.

L'optique dans le monde arabe

Entre le VIII^e et le XII^e siècle, les savants du monde arabe enrichissent la connaissance acquise des Grecs sur la lumière et l'optique.

Ibn Sahl énonce la loi de la réfraction, sans utiliser de trigonométrie. **Ibn al-Haytham** (Alhazen) étudie systématiquement certains phénomènes liés à la lumière et tranche expérimentalement entre diverses hypothèses : il étudie la structure de l'œil ; il démontre que la lumière se déplace en ligne droite **de l'objet vers l'œil** ; il rejette la théorie du « rayon visuel » issu de l'œil ; il explique le pouvoir grossissant des lentilles.





La réfraction selon Newton : les particules de lumière qui entrent dans le verre subissent, à l'interface, une force dirigée vers le bas. Cette force augmente la composante verticale de la vitesse, ce qui induit la trajectoire déviée (orange) dans le verre.

Pour **Isaac Newton**, la lumière est constituée de **corpuscules massifs**. La réflexion et la réfraction s'interprètent en termes de forces attractives, semblables à la force de gravitation. La couleur est liée à la masse des corpuscules. Cette théorie s'est longtemps imposée grâce à la notoriété de Newton.

Mais cette théorie est imparfaite, au début du XIX^e siècle, la lumière s'impose expérimentalement comme une onde.

La lumière est une onde !

En 1801, Thomas Young réalise une expérience cruciale d'interférences de la lumière. Dans la décennie 1810, Augustin Fresnel élabore une théorie ondulatoire de la lumière sur de solides bases expérimentales et mathématiques :

Cette théorie explique tous les phénomènes lumineux connus.

la lumière est une vibration ondulatoire transversale d'un milieu nommé éther.



© G. Sitja

Simulation de la figure d'interférence d'un faisceau lumineux passant par deux fentes dans l'expérience de Young.



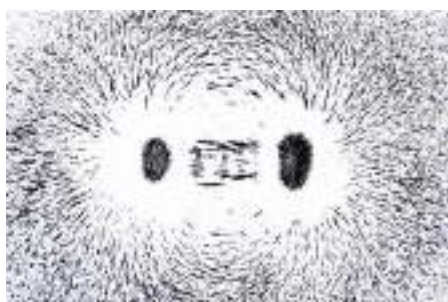
Figure de diffraction par une ouverture rectangulaire.



© Daderot / Creative Commons

Datant de 1831, le disque de Faraday utilise le principe de l'induction électromagnétique pour produire un courant électrique. C'est la première dynamo.

Les quatre équations de Maxwell écrites sous la forme proposée par Heaviside en 1884.



La théorie électromagnétique de Maxwell

Au début du XIX^e siècle, Hans Christian Oersted, André-Marie Ampère et Michael Faraday étudient des phénomènes reliant électricité et magnétisme.

En 1864, James Clerk Maxwell réalise une synthèse de toutes les lois des champs électrique et magnétique connues jusqu'alors, en proposant une **théorie de l'électromagnétisme**.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

Loi de Gauss

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

Loi de Gauss pour le magnétisme

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Loi de Faraday

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

Loi d'Ampère-Maxwell

$\vec{E}$ champ électrique, $\vec{B}$ champ magnétique

ρ densité de charges, $\vec{j}$ densité de courant de charges

$$\vec{\nabla} = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$$

Inspiré par la distribution de la limaille de fer autour d'un aimant, Faraday introduit la notion de lignes de champ magnétique, puis plus tard de champs électrique et magnétique.

La théorie de Maxwell prédit des ondes électromagnétiques transversales qui se déplacent à la vitesse de la lumière :

la lumière est identifiée à une onde électromagnétique dont l'extension spectrale ne couvre qu'une partie du spectre possible.

En 1886, Heinrich Hertz démontre expérimentalement l'existence d'ondes électromagnétiques dont la longueur d'onde est de quelques mètres (domaine radio).

En l'absence de particules chargées, les champs électrique et magnétique satisfont à une équation d'onde : ces ondes se propagent à la vitesse de la lumière, obtenue comme combinaison naturelle de deux paramètres des équations de Maxwell.

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \Delta \vec{E} = 0 \quad \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} - \Delta \vec{B} = 0$$

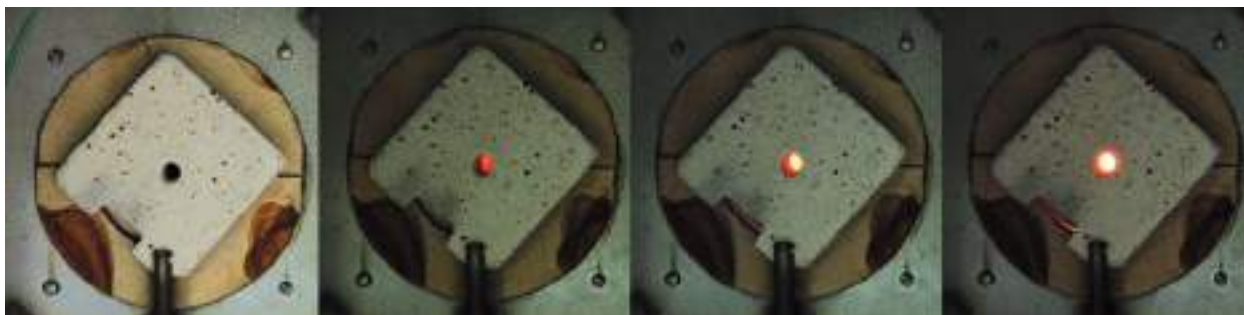
$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \text{ est la vitesse de la lumière}$$

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

Mais la théorie de Maxwell n'explique pas le rayonnement du corps noir.

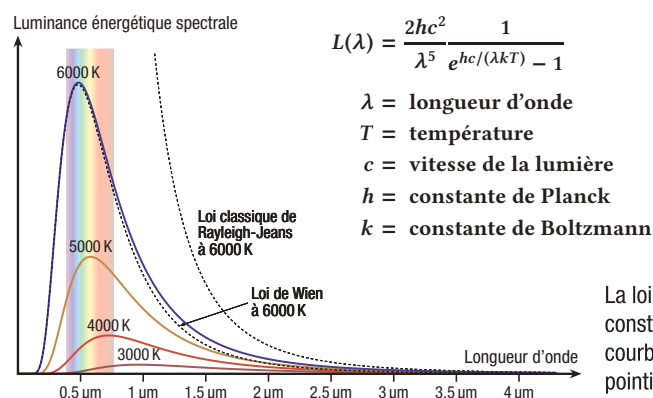
La révolution quantique

Un **corps noir** est un corps idéalisé dont l'interaction avec le rayonnement électromagnétique ne dépend que de sa température. Un tel corps change de couleur en fonction de sa température.



© G. Sittja

Un four est une bonne approximation d'un corps noir : la couleur à l'intérieur change en fonction de la température, du rouge (vers 900°C) au blanc (vers 1100°C).



Dans la théorie de Maxwell, un corps noir devrait émettre une quantité infinie d'énergie : la théorie est donc incompatible avec l'expérience. En 1900, Max Planck résout le problème en supposant que l'interaction de la lumière avec la matière se fait par « paquets d'énergie » $E=h\nu$, les **quanta**.

La loi du corps noir de Planck, où apparaît pour la première fois la constante h sur laquelle repose la mécanique quantique. Quelques courbes décrites par cette loi à différentes températures : les courbes en pointillés sont issues de théories classiques.

En **1905**, Albert Einstein montre que **la lumière est constituée de quanta**, qui seront baptisés photons en 1923 : la lumière est donc à la fois une onde et un corpuscule.

En **1924**, Louis de Broglie émet l'hypothèse que toute forme de matière a des caractéristiques ondulatoires.

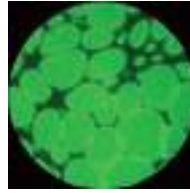
En **1925**, Erwin Schrödinger propose une équation pour l'onde de matière : c'est **la naissance de la mécanique quantique** dans sa forme actuelle.

La dualité onde-corpuscule, découverte à l'origine pour la lumière, est donc universelle.

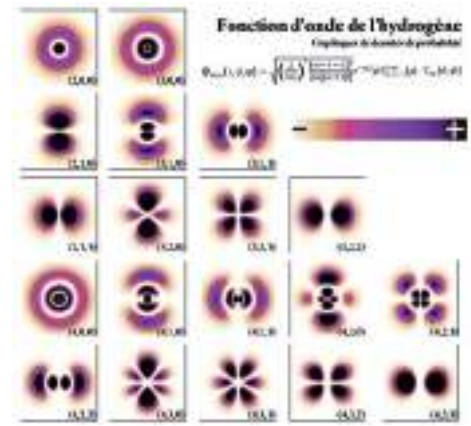
Il est possible d'effectuer des expériences d'interférence de type « fentes d'Young » avec des électrons, des neutrons, des atomes et des molécules (contenant jusqu'à 400 atomes) !

L'équation de Schrödinger décrit le comportement ondulatoire de la matière. Ces images représentent la probabilité de présence dans l'espace de l'unique électron de l'atome d'hydrogène pour différents états qu'il peut occuper : l'électron n'est plus un point matériel localisé.

Ombre d'une membrane carbonée, dont les filaments font environ 100 nm, réalisée avec un faisceau d'électrons : les effets ondulatoires sont clairement visibles.



© E. Salançon



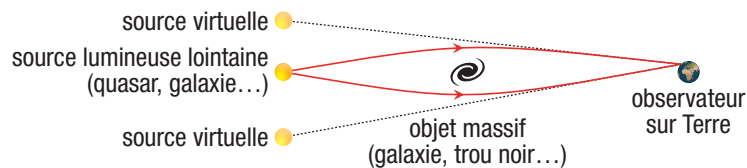
La révolution de la relativité

En **1887**, Albert Michelson et Edward Morley montrent expérimentalement que la Terre n'est pas en mouvement par rapport à l'éther, ce qui contredit le cadre formel de la théorie de Maxwell.

En **1905**, postulant que la vitesse de la lumière est la même pour tous les observateurs, en mouvement ou non, Einstein élabore une nouvelle théorie qui remplace la mécanique de Newton : c'est la **Théorie de la relativité restreinte**, dans laquelle l'hypothèse de l'éther est superflue.

En **1915**, Einstein propose la **Théorie de la relativité générale**, dans laquelle la gravitation dévie la trajectoire de la lumière et en modifie la fréquence.

En **1919**, Arthur Eddington profite d'une éclipse totale de Soleil pour mesurer la déviation de rayons lumineux par la masse du soleil : cette mesure historique est la première validation de la théorie d'Einstein.



© NASA/ESA Hubble Space Telescope

Cinq images virtuelles d'un quasar lointain sont visibles sur ce **mirage gravitationnel**.

Dans la théorie d'Einstein de la gravitation, les corps massifs infléchissent les rayons lumineux, donnant lieu à des **lentilles gravitationnelles**.

Dans la théorie d'Einstein, les **trous noirs** sont des corps tellement denses et massifs que la force de gravitation est assez forte pour retenir la lumière, qui ne peut donc pas s'en échapper.

La lumière aujourd'hui

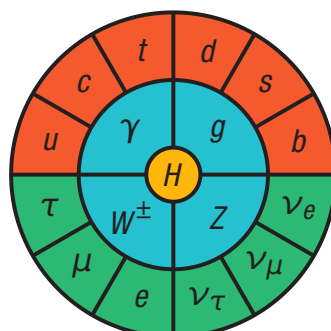
Depuis les années 1940, la lumière est décrite dans le cadre de la **théorie quantique des champs**, qui unifie mécanique quantique et relativité restreinte.

La version quantique de l'électromagnétisme de Maxwell, appelée Électrodynamique Quantique (QED en anglais), a été élaborée dans les années 1930–1950.

Dans les années 1960, la QED a elle-même été incorporée dans une théorie l'unifiant à d'autres phénomènes : l'**interaction faible**, responsable de réactions nucléaires, et l'**interaction forte**, responsable de la cohésion des noyaux nucléaires.

Cette théorie est le **modèle standard des particules élémentaires**. Son dernier succès expérimental est la découverte du boson de Higgs en 2012 au CERN à Genève.

Le photon, responsable de l'interaction électromagnétique, est l'une des 17 particules élémentaires de notre conception la plus ultime de la matière et des quatre interactions électromagnétique, faible, forte et gravitationnelle.



- particules de matière : quarks
- particules de matière : leptons
- bosons des interactions fondamentales
- boson de Higgs (découvert en 2012)

γ = photon

Une version simplifiée du « lagrangien » du modèle standard des particules élémentaires, qui décrit toutes les interactions fondamentales connues à l'exception de la gravitation :

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + i\bar{\psi}\not{D}\psi + \text{c.c.} + \psi_i y_{ij} \psi_j \phi + \text{c.c.} + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$



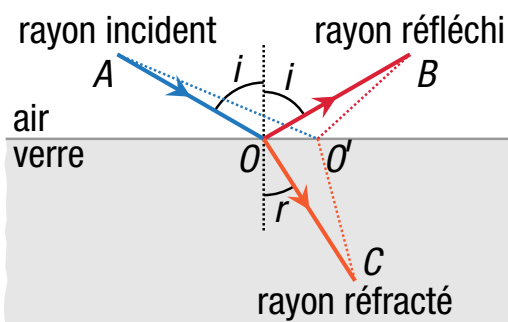
© ATLAS-CERN / CPPM.

Événement de production du boson de Higgs avec sa désintégration en deux photons détecté par l'expérience ATLAS au Large Hadron Collider à Genève.

Du temps à l'action

Les lois de Snell-Descartes sont « expliquées » par Pierre de Fermat en 1655 sous forme du principe de moindre temps :

“La lumière se propage d'un point à un autre sur des trajectoires telles que la durée du parcours soit (localement) minimale.”



Principe de Fermat : pour n'importe quel point O' différent de O, la lumière met moins de temps à parcourir la trajectoire A-O-B que A-O'-B. De même, compte-tenu de la différence de vitesse de la lumière dans l'air et dans le verre, elle met moins de temps à parcourir A-O-C que A-O'-C.

Pierre Louis Moreau de Maupertuis généralise ce principe en 1744 à la mécanique : il associe à toute trajectoire une quantité nommée action, qui remplace le temps utilisé par Fermat, et il énonce **le principe de moindre action** :

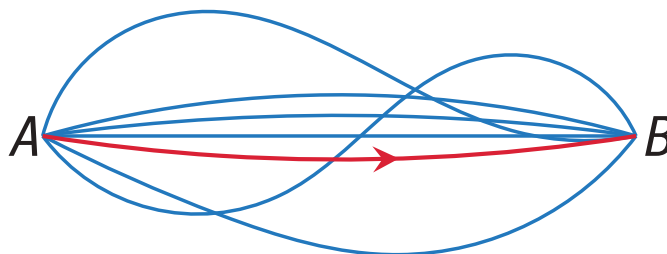
“Lorsqu'il arrive quelque changement dans la Nature, la quantité d'Action employée pour ce changement est toujours la plus petite qu'il soit possible.”

Ce principe contient presque toutes les lois de l'optique géométrique et de la mécanique de Newton. Dans une version plus élaborée, il sert aussi de fondement à la théorie d'Einstein de la gravitation.

La notion d'action est aujourd'hui au cœur de la physique moderne, par exemple à travers le lagrangien du modèle standard des particules élémentaires.

Feynman montre qu'en mécanique quantique, la probabilité qu'un corpuscule (électron, photon...) aille du point A au point B se calcule en considérant **tous les chemins possibles reliant A à B** (quelques exemples en bleu) : le poids assigné à chaque chemin dépend de **l'action calculée le long de ce chemin**. Le chemin qui contribue le plus à la probabilité totale est celui qui minimise l'action (en rouge) : c'est le **chemin classique** suivi par le corpuscule.

Parfois plusieurs chemins différents minimisent l'action, comme par exemple dans l'expérience des trous d'Young...



Vers 1750, Leonhard Euler et Joseph-Louis Lagrange développent une mathématique générale pour rechercher les extrema d'une quantité donnée (temps, action...) : c'est le **calcul des variations**. Les **équations d'Euler-Lagrange** sont au cœur de la mécanique analytique de Lagrange, de la théorie des champs (comme les équations de Maxwell) ou de la recherche de surfaces minimales (bulles de savon).



Manipulations

Antares



© Éclats de lumière

La Terre constitue un blindage naturel contre toutes les particules sauf les neutrinos. Lorsque ceux-ci passent dans l'eau, ils transfèrent leur énergie à des muons qui se déplacent alors plus rapidement que la lumière dans l'eau. Cela engendre la production de lumière dite Tchérénkov - c'est notamment cet effet qui provoque la luminosité bleue de l'eau entourant le cœur d'un réacteur nucléaire.

Un détecteur Tchérénkov, tel qu'Antares positionné au large de Toulon, est constitué d'un grand réservoir d'eau entouré de 1000 modules optiques. Chacun d'eux est constitué d'un photomultiplicateur, de différents appareillages sensibles et de l'électronique associée, installés dans des sphères de verre résistant à la pression (250 bars). Cette détection permet de remonter à la trajectoire initiale des neutrinos.

Roue historique

La roue historique de la lumière retrace l'histoire de la théorie de la lumière de l'Antiquité jusqu'à nos jours.

Voir annexe 7 page 95.



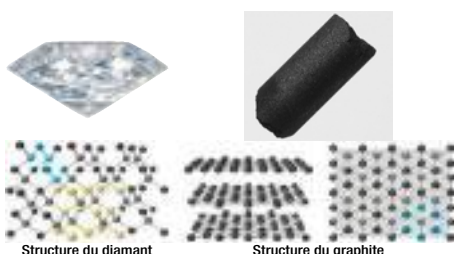
Des rayons X pour comprendre

Les rayons X permettent d'explorer la structure de la matière, d'étudier les molécules de la vie et d'interroger la nature de la lumière.

Les cristaux

Un **cristal** est un matériau organisé en une répétition périodique d'une structure élémentaire constituée de quelques atomes. À la fin du XIX^e siècle, on savait expliquer la forme de tous les cristaux connus par les empilements possibles d'« unités élémentaires ». Les rayons X ont permis de caractériser l'agencement atomique de ces unités élémentaires, et donc d'un cristal dans son entier.

La longueur d'onde des rayons X est de l'ordre de grandeur des distances séparant les atomes dans les cristaux, autour de $10^{-10} \text{ m} = 1 \text{ \AA}$. Utilisant cette propriété, Max von Laue réalise en 1912 la première image de **diffraction de rayons X par un cristal**. Cette expérience prouve aussi la nature ondulatoire des rayons X.

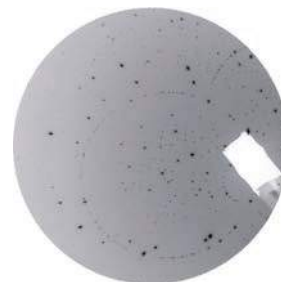


© chemwiki.ucdavis.edu / pngimg.com / images-of-elements.com

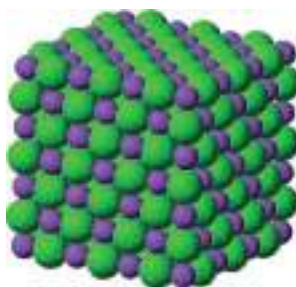
Image de diffraction de rayons X par un cristal de sel de cuisine et sa structure cristalline atomique : en vert les ions Sodium Na^+ et en mauve les ions Chlore Cl^- .

En 1915, William Henry Bragg comprend que l'image de diffraction permet de retrouver l'arrangement dans l'espace des atomes du cristal, grâce à un outil mathématique appelé **transformée de Fourier**. Rapidement, la structure atomique d'une cinquantaine de cristaux est déterminée. Depuis, la technique a considérablement progressé, en particulier grâce à l'informatique.

Image de la diffraction de rayons X par un cristal. Les points noirs ont une disposition particulière liée à la structure atomique du cristal.



Selon leur disposition, les atomes de carbone peuvent donner lieu à plusieurs types d'arrangements périodiques, par exemple dans le diamant et le graphite.



© Benjah-bmm27



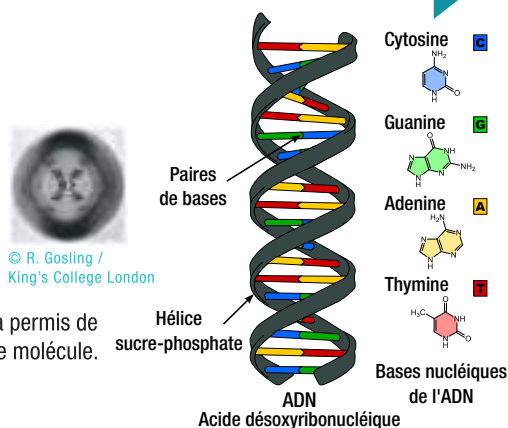
© Benjah-bmm27

Les molécules organiques

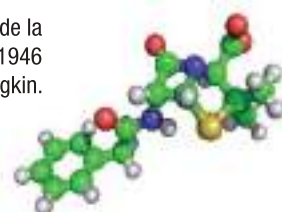
La diffraction des rayons X permet de déterminer la **structure de molécules organiques**. Comme ces molécules ne sont pas ordonnées naturellement à grande échelle, plusieurs techniques ont été mises au point pour obtenir des images exploitables.

En plaçant les molécules à étudier dans une **phase cristalline**, Dorothy Hodgkin parvient à déterminer la structure atomique du cholestérol en 1937, de la pénicilline en 1946 et de la vitamine B12 en 1956. Cette technique ne fonctionne pas pour toutes les molécules.

Image de diffraction de fibre sur la molécule d'ADN réalisée en 1952 et qui a permis de déterminer la structure en double hélice de cette molécule.

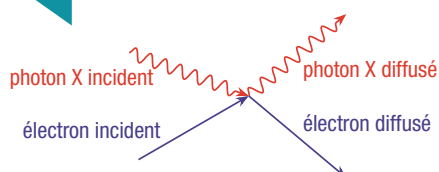


Structure atomique de la pénicilline, obtenue en 1946 par Dorothy Hodgkin.



La diffraction de rayons X est aujourd'hui une technique aboutie et courante en **biologie structurale** pour déterminer l'organisation atomique des molécules de la vie, en particulier les protéines.

La preuve du photon



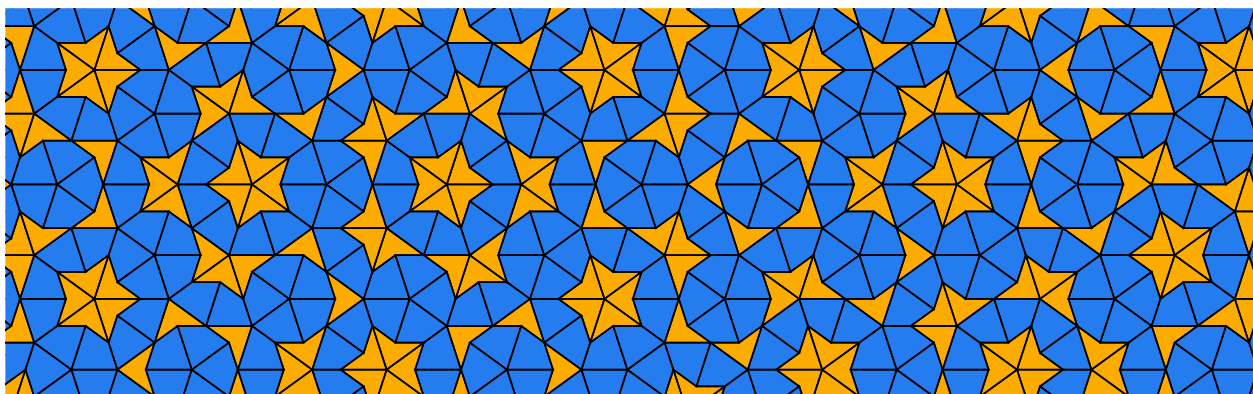
L'effet Compton s'explique comme la collision d'un photon, possédant une quantité de mouvement $p=h/\lambda$ et une énergie $E=hc/\lambda$, avec un électron.

En 1923, Arthur Compton prouve que les rayons X sont constitués de quanta de lumière qui ont un comportement corpusculaire.

Dans l'**effet Compton**, des rayons X interagissent avec des électrons : les rayons X sont diffusés en perdant de l'énergie. En utilisant les lois de conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie dans le cadre de la relativité restreinte, ce résultat s'interprète comme une **collision entre un électron et une particule de lumière**, le photon, conformément à la prédiction d'Einstein de 1905.

Les expériences de diffraction de von Laue et de diffusion de Compton prouvent expérimentalement la dualité onde-corpuscule de la lumière dans le cas des rayons X.

Les quasi-cristaux, découverts en 1984 par Shechtman, sont formés de motifs répétés qui remplissent l'espace mais qui ne sont pas périodiques, à l'image du pavage de Penrose ci-dessous. Leurs figures de diffraction présentent des symétries de rotation jusqu'alors « interdites » de 1/10 de tour.

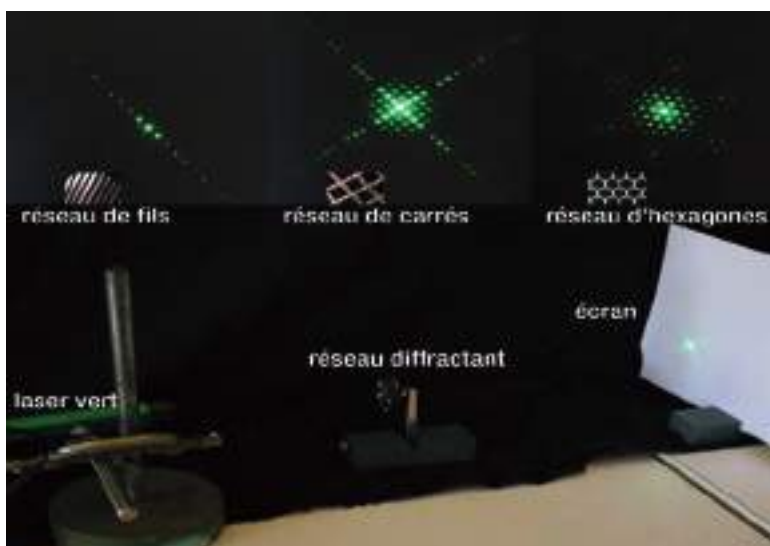


© S. Hovmöller, L. Hovmöller Zou, X. Zou, B. Grushko



Manipulations

Diffraction d'un faisceau lumineux par divers réseaux réguliers



© E. Salançon

Voir [manipulation page 41](#).

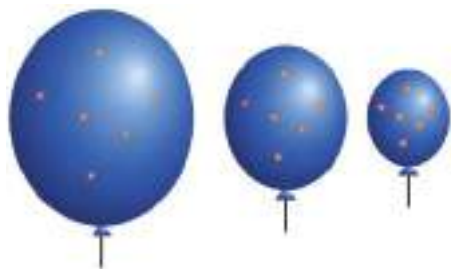
La disposition des points lumineux permet de retrouver l'agencement du réseau par une opération mathématique, appelée transformée de Fourier, et leur taille est d'autant plus petite que l'onde incidente est monochromatique. Appliquée à l'analyse des roches, des molécules, protéines..., la diffraction des rayons X permet de connaître l'intimité de la matière.

Lumière sur l'Univers

Notre connaissance de l'Univers repose, pour l'essentiel, sur l'analyse de la lumière des objets qu'il contient.

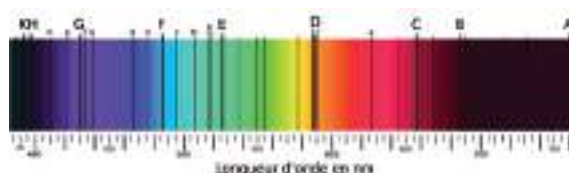
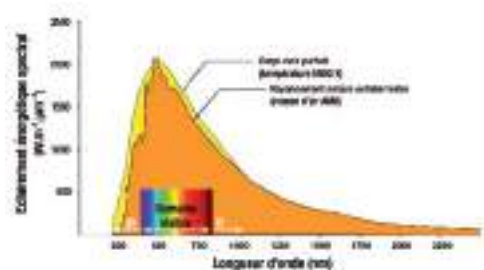
La lumière des étoiles

En supposant qu'une étoile est presque un corps noir, sa couleur permet d'estimer sa température de surface.



L'éclairement énergétique spectral du Soleil peut être comparé au spectre d'un corps noir parfait de 5900 K de température. La différence de luminosité dans l'ultraviolet et dans le bleu est souvent suffisante pour établir la température de surface.

L'expansion de l'Univers est comparable à un ballon que l'on gonfle : les petites étoiles collées sur le ballon ne bougent pas et pourtant les distances qui les séparent augmentent.



Raies d'absorption (traits sombres) dans le spectre du Soleil, découvertes en 1814 par Joseph von Fraunhofer.

Lorsque la lumière traverse un gaz, les atomes du gaz absorbent sélectivement une partie du spectre de cette lumière. Les **raies d'absorption** sont une signature de la composition chimique du gaz.

Beaucoup d'étoiles ont une composition semblable à celle du Soleil : **98 % d'hydrogène et d'hélium** et le reste principalement composé de carbone, d'oxygène, d'azote et de fer.

La lumière de l'étoile la plus proche du Soleil, *Proxima Centauri*, met 4,2 années à nous parvenir : on dit qu'elle se trouve à 4,2 **années-lumière** de nous. La distance des étoiles proches du Soleil peut être évaluée par des méthodes géométriques, en mesurant leur parallaxe induite par le mouvement de la Terre autour du Soleil.

Les **céphéides** permettent de mesurer des distances plus grandes : ces étoiles ont une luminosité variable dont la période est liée à leur magnitude absolue (quantité de lumière émise par l'étoile). En comparant la magnitude apparente (quantité de lumière reçue sur Terre) à la luminosité absolue, on peut évaluer leur distance. Ainsi, la galaxie d'Andromède, la plus proche de la nôtre, est à 2 538 000 années-lumière.

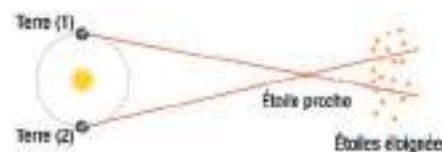
Le diagramme de Hertzsprung-Russell, établi en 1910, permet de classer les étoiles en différentes catégories à partir d'informations sur la lumière qu'elles émettent : leur luminosité absolue et leur couleur, nous renseignent sur leur température de surface. Les raies spectrales décelées dans l'atmosphère des étoiles permettent aussi de définir un **type spectral** qui dépend de la température.

L'expansion de l'Univers

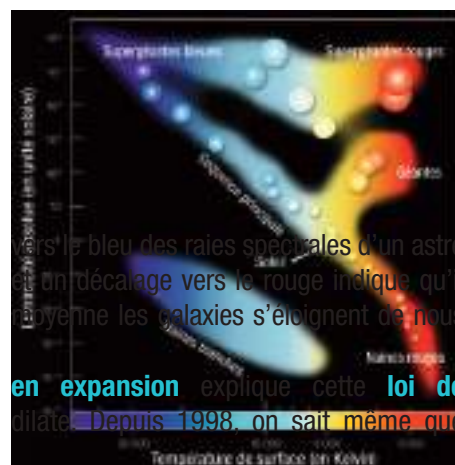
En astronomie, le décalage indique qu'il se rapproche s'éloigne : c'est l'**effet Doppler**. En 1929, Edwin Hubble établit qu'en d'autant plus vite qu'elles sont loin.

Dans le cadre de la relativité générale d'Einstein, un modèle d'**Univers Hubble** : les galaxies ne se déplacent pas et c'est l'espace qui se l'expansion de l'Univers est en accélération...

Distances astronomiques



La parallaxe d'une étoile proche : vue de la Terre à six mois d'intervalle, Terre (1) et Terre (2), la position d'une étoile proche sur un fond d'étoiles éloignées change. Un peu de géométrie permet de calculer la distance de cette étoile proche.



La lumière des astres

Des rayons X jusqu'aux ondes radio, tout le spectre électromagnétique reçu des objets célestes est analysé pour comprendre l'Univers.

Les « couleurs » des galaxies

Les astronomes disposent aujourd'hui d'instruments d'observation dans tous les domaines du spectre électromagnétique, sur Terre et dans l'espace.

L'étude des galaxies dans différentes régions du spectre électromagnétique permet d'accéder à de nombreuses informations sur ces structures et d'en comprendre l'évolution. Par exemple : [Voir Annexe page 95.](#)

- le domaine ultraviolet, dominé par les étoiles jeunes, permet d'étudier le rythme auquel une galaxie forme des étoiles ;
- le domaine visible permet d'évaluer la quantité d'étoiles plus anciennes formées au cours de l'histoire de la galaxie ;
- le domaine infrarouge lointain permet de quantifier la poussière interstellaire ;
- le domaine des rayons X permet de détecter des phénomènes énergétiques, comme des trous noirs nichés au cœur des galaxies et des duos d'étoiles contenant un astre compact...



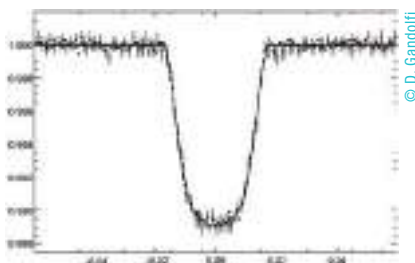
© CNES/D. Ducros

En 6 ans d'exploitation, le télescope spatial CoRoT a détecté 32 exoplanètes par la méthode des micro éclipses : la luminosité apparente d'une étoile baisse lorsqu'une planète passe devant son étoile.

Les exoplanètes

La première planète située hors du système solaire a été découverte en 1995. Deux méthodes principales permettent de détecter ces objets furtifs :

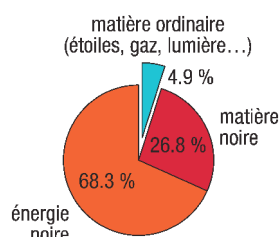
1. le mouvement orbital de la planète induit un mouvement d'oscillation de son étoile autour d'une valeur moyenne : la **vitesse radiale** de ces oscillations est mesurable par effet Doppler.
2. la planète, lorsqu'elle passe devant son étoile, induit une micro éclipse – une baisse de luminosité très faible – que des détecteurs très sensibles peuvent **détecter** : ce sont les **transits planétaires**.



© D. Gandolfi

Matière noire et énergie noire

La matière qui nous compose et qui nous entoure ne représente que 5 % de l'Univers connu : le reste est composé de **matière noire**, détectée seulement par ses effets gravitationnels, et d'**énergie noire**, dont l'existence est conjecturée pour expliquer l'accélération de l'expansion de l'Univers.



© NASA / ESA / The Hubble Key Project Team / The High-Z Supernova Search Team

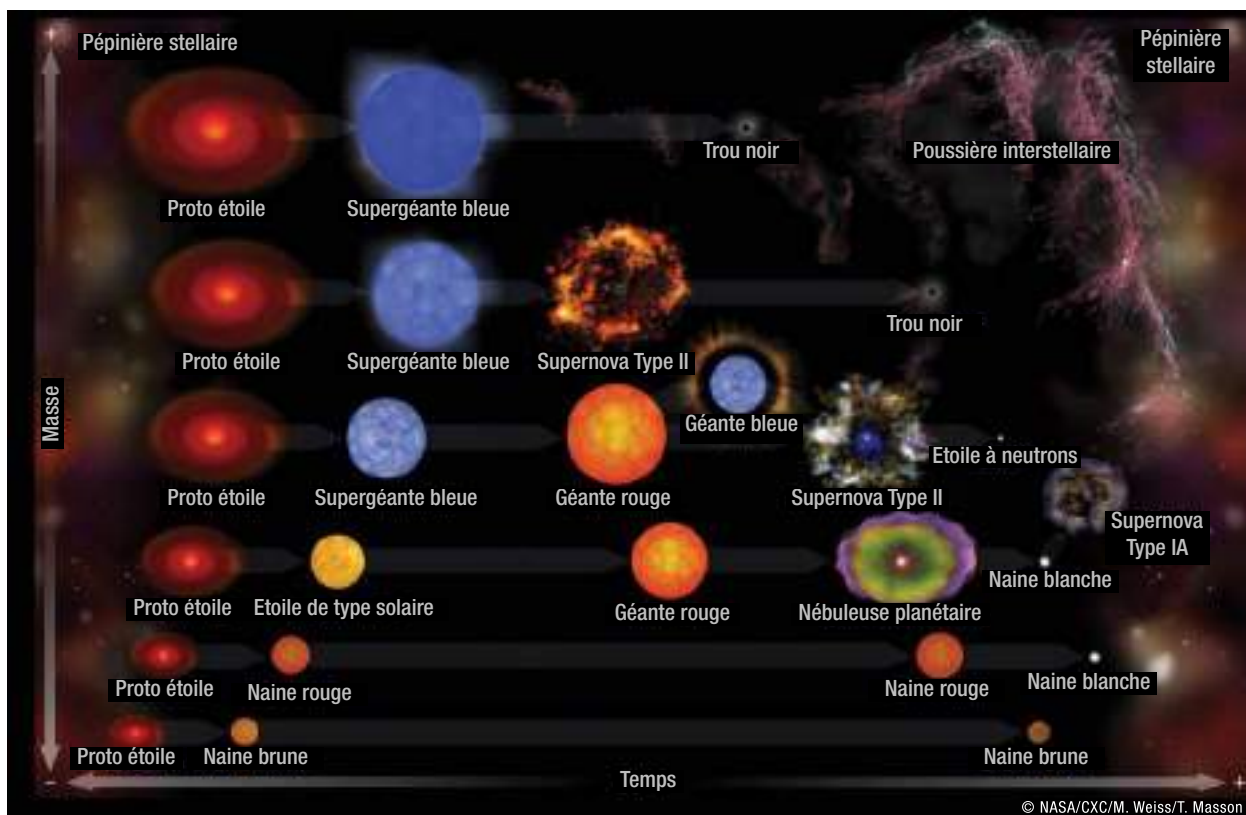
Supernova 1994D dans la galaxie lointaine NGC4526.

La matière noire peut être « pesée » à l'aide de lentilles gravitationnelles : cette matière représente l'essentiel de la masse des galaxies et des amas de galaxies.

Pour comprendre la nature de l'énergie noire, il faut déterminer avec précision l'accélération de l'expansion de l'Univers et donc évaluer les distances de galaxies très lointaines.

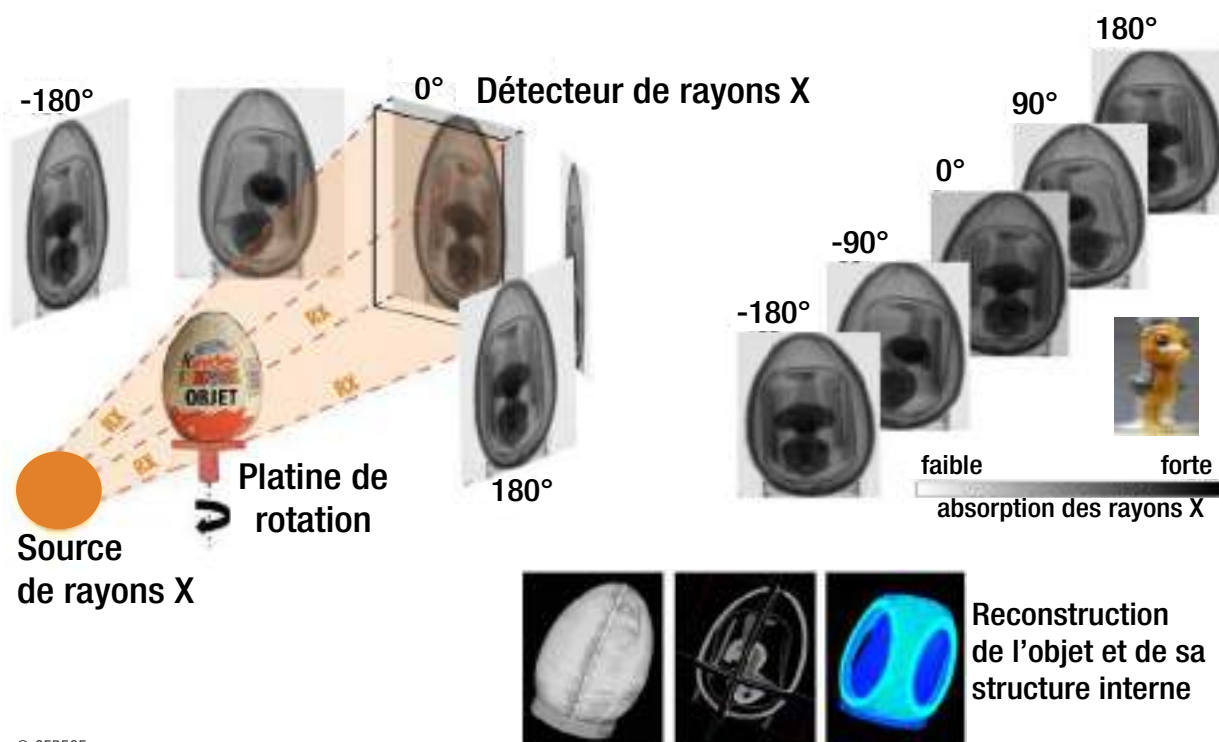
Une des méthodes consiste à utiliser la luminosité apparente des **supernovae** : ce sont des étoiles qui explosent et deviennent, pendant quelques jours, aussi brillantes que leur galaxie hôte. On connaît la luminosité absolue de tels événements : les supernovae jouent donc le même rôle que les céphéides, mais pour des distances « cosmologiques ».

Annexes

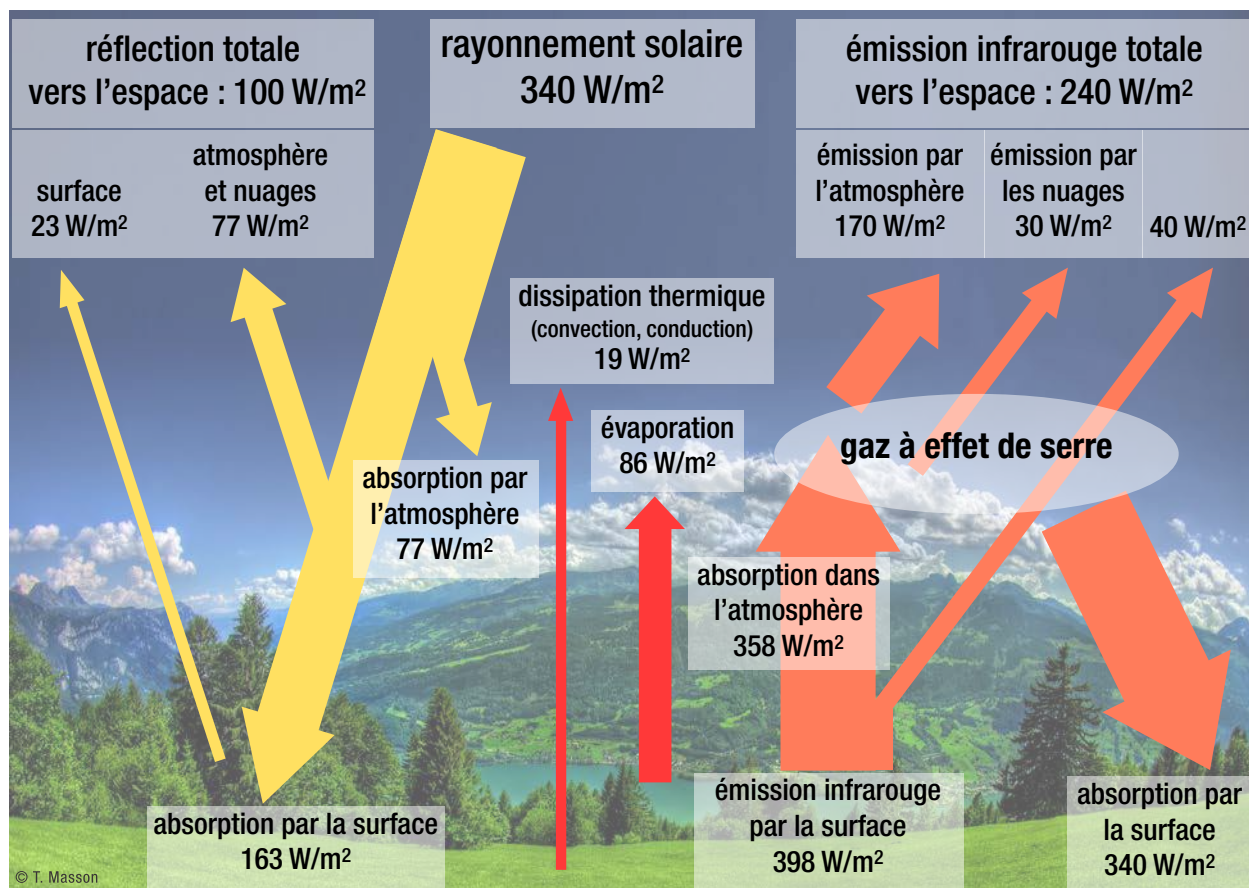


92

Annexe 1 : Les étoiles naissent et meurent. Elles passent la majeure partie de leur vie dans l'état d'équilibre en consommant l'hydrogène et l'hélium. En fin de vie, l'équilibre est rompu et différents scénarios sont possibles.

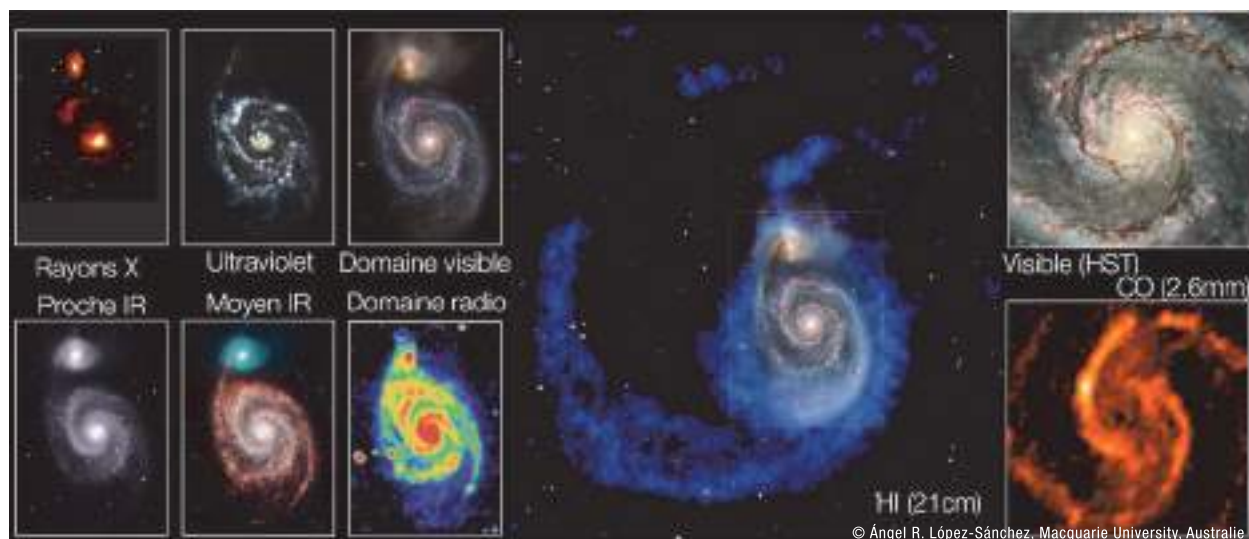


Annexe 2 : Principe de la microtomographie à rayons X : l'objet est radiographié selon différents angles et la structure interne de l'objet peut être modélisée en 3D.



Annexe 3 : **Bilan énergétique de la Terre** : la Terre (surface + atmosphère) est en équilibre vis-à-vis du rayonnement reçu par le Soleil et renvoyé vers l'espace (réflexion + émission infrarouge). Les gaz à effet de serre piègent le rayonnement infrarouge dans l'atmosphère. L'énergie produite au cœur de la Terre ne représente, lorsqu'elle arrive en surface, que 0,01% de l'énergie reçue du Soleil (source : NASA Earth's Energy Budget).

93

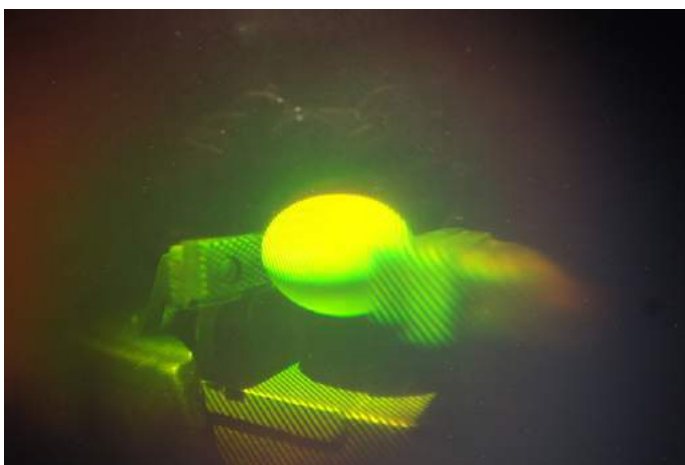


Annexe 4 : La galaxie M51 vue dans différentes parties du spectre électromagnétique. Chaque domaine spectral apporte une information sur des composants différents de la galaxie.

Annexe 5 : Collection d'hologrammes



© Collection d'hologramme de la cellule scientifique de l'AMU.



Œuf dans l'étau.

© Collection d'hologramme de la cellule scientifique de l'AMU.

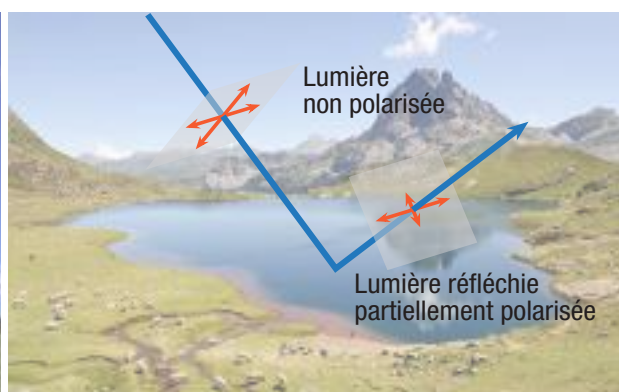
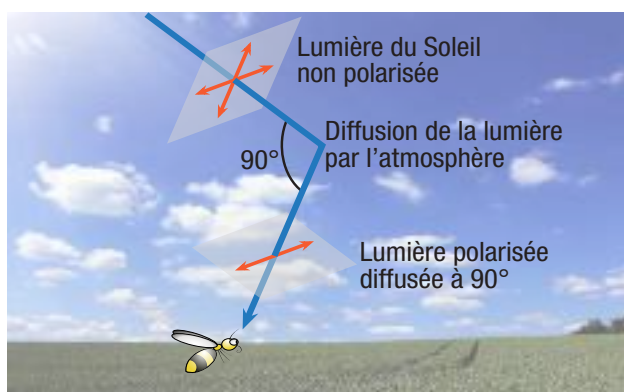


© Collection d'hologramme de la cellule scientifique de l'AMU.



2CV dans ses états.

© Collection d'hologramme de la cellule scientifique de l'AMU.



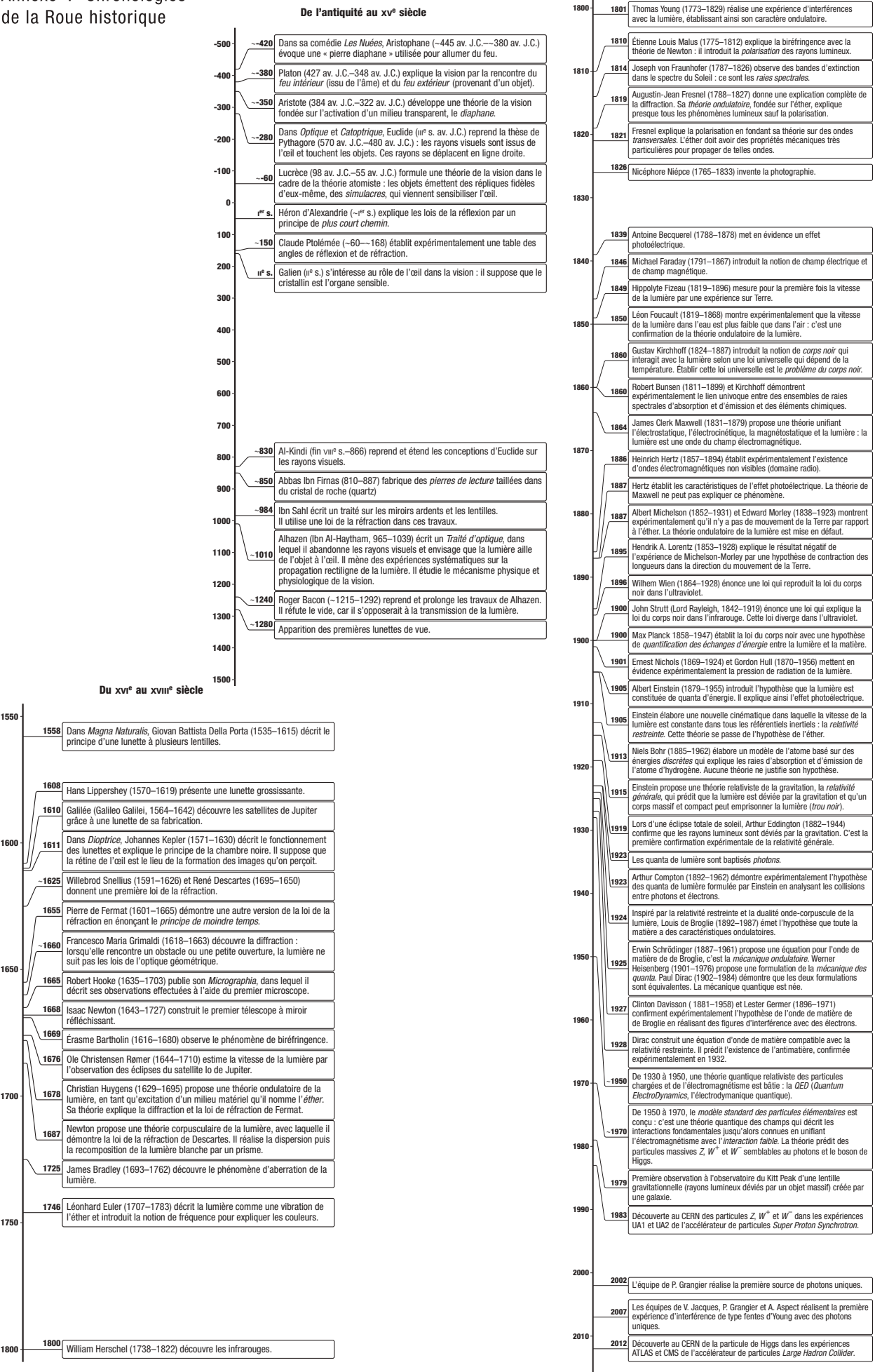
Annexe 6 : Polarisation de la lumière

À droite : La lumière réfléchie par une surface non métallique, comme l'eau ou le verre, est partiellement polarisée parallèlement à la surface réfléchissante.

À gauche : La lumière du Soleil diffusée à 90° par l'atmosphère est polarisée : les abeilles, sensibles à la direction de polarisation de la lumière, peuvent utiliser cette information pour se guider dans leur vol.

Annexe 7 Chronologies
de la Roue historique

HISTOIRE DE LA THÉORIE DE LA LUMIÈRE



Avec la participation de



Laboratoire Architecture et Fonction des Macromolécules Biologiques

Bruno Coutard, Ingénieur de recherche, CNRS



Centre Interdisciplinaire de Nanoscience de Marseille

Vasile Heresanu, Ingénieur de recherche, CNRS / Évelyne Salançon, Maître de conférences, AMU / Georges Sitja, Chargé de recherche, CNRS / Lionel Santinacci, chargé de recherche, CNRS



Centre de Physique des Particules de Marseille

William Gillard, Maître de conférences, AMU / Loriane Portal, Doctorante, AMU



Centre de Physique Théorique

Véronique Esposito, Service communication, CNRS / Thierry Masson, Chargé de recherche, CNRS



AAU - UMR CNRS 1563
Architectures Architectures Urbaines



Centre de REcherche Nantais Architectures Urbanités

Céline Drozd, Maître assistante, ENSA, Nantes / Ignacio Requena-Ruiz, Maître assistant, ENSA, Nantes



Institut Fresnel

Ronald Aznavourian, Chercheur CDD, CNRS / Guillaume Baffou, Chargé de recherche, CNRS / Nicolas Bonod, Chargé de recherche, CNRS / Alexis Devilez, ATER, AMU / Thomas Durt, Professeur des universités, Ecole Centrale de Marseille / Stefan Enoch, Chargé de recherche, CNRS / Sébastien Guenneau, Directeur de recherche, CNRS / Serge Monneret, Chargé de recherche, CNRS



Institut des Sciences du Mouvement

Jocelyn Monnoyer, salarié PSA



Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement

Daniel Borschneck, Ingénieur de recherche, CNRS / Perrine Chaurand, Ingénieure, AMU / Clément Levard, Chargé de recherche, CNRS / Jérôme Rose, Chargé de recherche, CNRS / Vladimir Vidal, Ingénieur de recherche, CNRS



Institut Pythéas
Observatoire des Sciences de l'Univers
du littoral littoral



Laboratoire d'Astrophysique de Marseille

Samuel Boissier, Chargé de recherche, CNRS / Sébastien Vives, Ingénieur de recherche, CNRS



Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Macromoléculaires

James Sturgis, Professeur des universités, AMU



Lasers, Plasmas et Procédés Photoniques

Thierry Sarnet, Chargé de recherche, CNRS



Physique des Interactions Ioniques et Moléculaires

Caroline Champenois, Chargée de recherche, CNRS / Alexandre Escarguel, Maître de conférences, AMU / Sandrine Ferri, Maître de conférences, AMU / Marie Houssin, Professeure des universités, AMU



Temps, Espaces, Langages, Europe Méridionale - Méditerranée

Eric Carroll, Ingénieur de recherche CNRS / Bernard Cousin, Professeur émérite, AMU / Pierre Pinchon, Maître de conférence, AMU



Département de Physique AMU

Christian Curtil, Ingénieur d'étude, AMU / Sylvain Moha, Ingénieur d'étude, AMU



Cellule de culture scientifique et technique

Matthieu Parent, **Ambrotypiste et Photographe**, site Internet : matthieuparent.net



Science en Comtat, Fernande Vedel, Professeure émérite, AMU / Michel Vedel, bénévole

Remerciements

La production de l'exposition « Lumière en balade » et la réalisation de ce catalogue ont pu être réalisées grâce aux soutiens financiers des partenaires du collectif « Eclats de lumière » et en particulier celui de la région Provence Alpes Côte d'Azur (PACA). Le collectif « Eclats de lumière » leur en est particulièrement reconnaissant.

La réalisation du catalogue a été initiée suite à une collaboration entre « Eclats de lumière » et la fondation Vasarely. Merci à elle d'accueillir et de faire vivre l'exposition à travers des rencontres de lycéens.

Le collectif « Eclats de lumière » a réalisé l'intégralité de l'exposition et du présent catalogue. Ce collectif est constitué d'une vingtaine de laboratoires de la région PACA. Les articles présentés ont tous été rédigés par des chercheurs, enseignant-chercheurs ou ingénieurs issus de ces laboratoires. Un grand merci à tous ces rédacteurs. L'exposition ne serait rien sans eux.

Les expériences art-sciences ont été réalisées par Fernande et Michel Vedel. La lumière au carré reste le point culminant de notre visite... Merci !

Les hologrammes et bien d'autres expériences sont issus de la cellule de culture scientifique d'Aix-Marseille Université. Elles ont été mises au point par Alexandre Escarguel et Sandrine Ferri. Merci de nous avoir inspirés et suivis !

Les expériences « Palais de la découverte » ont été réalisées par Christian Curtil et moi-même. Le département de Physique d'Aix-Marseille Université dispose du meilleur ingénieur de Physique expérimentale qui soit ! Preuve en sont ces magnifiques réalisations ! Merci Christian.

Les ambrotypes ont été réalisés par Matthieu Parent et les photogrammes par Jocelyn Monnoyer. La rencontre de l'art et de la science est source d'inspiration, c'est toujours un plaisir de travailler avec vous !

L'OSU Institut Pythéas et son équipe de communication, dirigée par Thierry Botti, a mené la gestion financière et la campagne de communication du projet dans son ensemble. Un grand merci à eux. Les scientifiques ont besoin de vous, vous possédez des armes dont nous ignorons tout, continuez ! Patrick Figon, en particulier, a entièrement suivi la gestion du catalogue, Sylviane Guyot, Marie-Thérèse Sérézat, Françoise Amat et Mélody Didier ont assuré les relectures et la logistique pour l'itinérance des expositions. Merci.

Laure Lopez a réalisé l'ensemble de la conception graphique de l'exposition et du catalogue. L'harmonie des couleurs rendent ce catalogue beau et agréable à lire malgré une quantité d'informations importante. Belle prouesse et merci pour ce travail !

Nous avons récolté, complété et harmonisé l'ensemble des contributions avec Thierry Masson, du Centre de Physique Théorique (CPT). La conception du catalogue a été entièrement basée sur ce travail. Nos échanges ont souvent été très enrichissants et variés : de l'expansion de l'Univers à la technique employée par Van Gogh dans le tableau « Terrasse du café le soir, 1888 », en passant, bien évidemment, par la dualité onde-corpuscule de la lumière ! Merci, Thierry, pour cette balade dont nous assurons, aujourd'hui, le commissariat.

L'ensemble des illustrations choisies pour ce catalogue proviennent soit des auteurs eux-mêmes, soit d'images libres de droit, ou en « wikimedia commons », utilisables à des fins pédagogiques et non lucratives, ce qui est la vocation du présent document. Nous avons prêté attention à reporter les crédits et remercions tous les auteurs de ces illustrations.

Merci à vous tous, lecteurs, après avoir découvert notre exposition de prendre le temps de poursuivre la visite au grès de ces pages.

Février 2017

Evelyne Salançon, Centre Interdisciplinaire de Nanoscience de Marseille, pour le collectif « Eclats de lumière ».

Eclats de lumière
<http://www.eclatsdelumiere.fr/>

Ouvrage collectif
Directeurs de la rédaction : Thierry Masson & Évelyne Salançon

□

Montage et conception graphique : Laure Lopez - Couleur Com
Créations et dessins des schémas : Thierry Masson
Relectures et corrections des textes : Patrick Figon, Sylviane Guyot et Mélody Didier

□

Publié avec le soutien de la Fondation Vasarely

En mars 2017

□

« L'ensemble des illustrations choisies pour ce catalogue proviennent soit des auteurs eux-mêmes, soit d'images libres de droit, ou en wikimedia commons, utilisables à des fins pédagogiques et non lucratives (ce qui est le cas ici).
Nous avons prêté attention à reporter les crédits et remerciements tous les auteurs de ces illustrations. »



L'ONU et l'UNESCO ont proclamé 2015

« Année internationale de la lumière et des techniques utilisant la lumière ».

L'année 2015 commémore de nombreux événements dans l'histoire de la science de la lumière.

Par exemple, la théorie ondulatoire de la lumière de Fresnel en 1815 et la relativité générale d'Einstein en 1915 et son lien entre la gravitation et la lumière.

Au-delà de l'aspect scientifique, cette initiative internationale vise à sensibiliser tous les citoyens sur l'impact de la lumière dans toutes les dimensions de la vie : technologies, éducation, santé, énergie et développement durable.

Ce catalogue retrace les grandes lignes de l'exposition «Lumière en balade» qui a été réalisée dans le cadre d'un projet collaboratif et pluridisciplinaire, «Éclats de lumière», qui rassemble des laboratoires de recherche de la région PACA. Cette balade emmène le lecteur dans des mondes variés, pour donner différents regards sur la lumière sous le prisme de l'art, la science, l'architecture, la philosophie... À travers des expériences interactives mises à votre disposition, vous pourrez directement percevoir certains mystères de la lumière.

Comité d'organisation

Thierry Botti



Thierry Masson



Magali Damoiseaux



Margueritte Ghiotto



Evelyne Salançon



Sylvie Laurens



Avec le soutien



« La Giotat-Lumières »

Ouvrage à vocation pédagogique, interdit à la vente.