The background features several glowing, ethereal light trails in shades of blue and white. These trails are composed of multiple overlapping lines that create a sense of motion and depth. Some lines are straight and diagonal, while others form loops and curves, resembling mathematical paths or light refraction. The overall effect is dynamic and futuristic.

Maths Lumière Express

Comité international des jeux mathématiques



Sommaire

<i>Introduction</i>	1
Petite histoire de la lumière, de l'Antiquité à Einstein	3
Lumière sur l'espace-temps	15
La lumière et sa vitesse, d'un débat abstrait à un outil métrologique	23
La lumière en ses états, ou la controverse Roemer–Cassini	31
Onde et/ou particule, quelle est la nature de la lumière ?	39
La lumière pour mieux observer et comprendre l'Univers	45
Lunettes et télescopes, des entonnoirs à lumières	51
Polarisation de la lumière et optique cristalline	59
L'opacité ne sera bientôt plus ce qu'elle était !	65
L'arc-en-ciel	71
La lumière laser	79
Petit éclairage, avec coloration mathématique, sur les horloges du vivant	85
Art et lumière. De l'observation optique à l'absorption sensorielle	93
Ombres, couleurs et lumières dans les arts graphiques	101
<i>Ours</i>	107



Introduction

Jean-Pierre Luminet
Astrophysicien

Dans le cadre de l'Année internationale de la lumière décidée par l'UNESCO, il paraissait naturel d'associer la seizième édition du Salon de la Culture et des Jeux Mathématiques au thème extrêmement riche de la lumière. Des lumières, dois-je plutôt écrire. En effet, les phénomènes liés à la lumière et les disciplines qui les décrivent – des mathématiques à la physique, de l'astronomie à la biologie, de la physiologie aux arts visuels, etc. – recouvrent pratiquement tous les domaines de l'activité humaine.

Après tout, nous sommes des êtres faits de lumière (celle des étoiles, transformée en matière) et nous nous nourrissons d'elle. C'est donc l'ambition de la brochure *Maths Lumière Express 2015* que de présenter, en une série de contributions rédigées par des chercheurs de différentes disciplines, un panorama général de *la lumière dans tous ses états*.


L'ouvrage est découpé en plusieurs sections, chacune consacrée à tel ou tel aspect de la lumière. Une présentation historique s'impose d'emblée, rappelant combien la nature de la lumière, et les mathématiques pour la décrire, ont fait l'objet de hautes spéculations depuis l'Antiquité. Il n'est pas surprenant d'y retrouver les contributions des plus grands noms de l'histoire des sciences, d'Euclide à Einstein en passant par Alhazen, Descartes, Kepler, Newton, Maxwell et bien d'autres. La physique et les mathématiques de la lumière constituent ensuite un chapitre essentiel. Les mesures de la vitesse de la lumière, dans le vide ou dans les matériaux, l'étude des phénomènes lumineux comme l'arc-en-ciel, la polarisation, la transparence, etc., sont autant de jalons essentiels dans l'histoire de la physique classique. Mais l'avène-

ment, au début du XX^e siècle, des théories de la relativité et de la mécanique quantique, a apporté des éclairages (le mot est approprié !) radicalement neufs sur les divers états de la lumière – onde, corpuscule, trame de l'espace – temps, etc.

Ils ont débouché sur d'innombrables innovations technologiques qui, comme le laser, constituent désormais notre quotidien. Or, notre quotidien, c'est aussi et surtout la lumière naturelle de notre étoile Soleil, et le petit *miracle* naturel qui réussit à convertir cette énergie lumineuse en matière vivante. Nous voici dans l'immense domaine de la biologie et des fascinants rapports que le vivant, sous toutes ses formes, entretient avec les phénomènes lumineux. La brochure serait incomplète si elle n'abordait pas aussi la question du rôle de la lumière dans les arts visuels : peinture, sculpture, photographie, cinéma. Car «*L'art est ce qui rend la vie plus intéressante que l'art.*» disait le poète Robert Filliou.

Devant un aussi riche contenu, les lecteurs, et les jeunes en particulier, devraient y trouver de quoi satisfaire leur curiosité, ainsi que quelques réponses aux innombrables questions qui ne manqueront pas de leur venir à l'esprit en fonction de leurs intérêts variés. Victor Hugo, cet immense poète curieux de toutes les disciplines de l'esprit, écrivait : «*Chaque homme dans sa nuit s'en va vers sa lumière.*» En ces temps agités de nos civilisations, assombris par tant d'obscurantismes de divers ordres, puissent ce salon Mathématiques et Lumière et cette modeste – mais ambitieuse – brochure, apporter à chacun ce petit surplus de lumière intérieure dont nous avons tous tant besoin.

Jean-Pierre Luminet
mars 2015



Petite histoire de la lumière, de l'Antiquité à Einstein

Jean-Pierre Luminet
Astrophysicien

*Quel être vivant, doué de sens, qui n'aime plus que tout
les merveilleux phénomènes de l'espace répandu autour de lui,
la lumière qui réjouit tout – avec ses couleurs, ses rayons et ses ondes.*

Novalis
(1772 – 1801)

Premiers essais de modélisation

Les premières théories sur la lumière ne concernaient pas directement la nature de la lumière elle-même, mais la vision. Selon Platon, une lumière jaillissait des yeux en un flux faisant pression sur ce qu'il heurtait, et formait avec la lumière du jour une substance unique qui transmettait les images jusqu'à l'âme, donnant à l'homme la sensation de voir. Cette théorie s'opposait à celle des atomistes, comme Épicure, pour lesquels de fines particules – appelées atomes – se détachaient des objets et se propageaient jusqu'à la pupille en conservant un «simulacre» de l'objet. L'hypothèse de Platon fut longtemps préférée.

Dans les *Éléments* d'Euclide, les «rayons visuels» se prêtent à un traitement géométrique sophistiqué. Les lignes droites issues de l'œil forment le cône visuel, lequel a son sommet dans l'œil et sa base sur le pourtour de l'objet regardé. Cette géométrie met en relief le rôle de l'angle visuel, et non la distance de l'objet vu, ce qui fait du traité d'Euclide un ouvrage de perspective naturelle.

Plus tard, à Alexandrie, Ptolémée étudie la réfraction, élabore expérimentalement les lois de la réflexion et introduit la notion d'«axe visuel». Au XI^e siècle, Ibn al-Haytham, savant arabe connu en Occident sous le nom d'Alhazen, prend le contre-pied de la tradition : puisqu'une source lumineuse intense fixée longtemps reste visible lorsqu'on ferme les yeux, c'est que quelque chose est entré dans l'œil, provoquant la sensation de la vue. Le rayon visuel est donc reçu, et non pas émis, par l'œil.

L'œuvre d'Alhazen ne se diffuse que lentement en Occident, mais elle inspire, au XIII^e siècle, celle du moine polonais Witelo, dit Vitellion. Parallèlement, en 1285, des recherches empiriques et artisanales en Italie conduisent à la première utilisation de verres correcteurs.

À la Renaissance, l'ouvrage de Giambattista Della Porta, *Magia naturalis* («La magie naturelle», 1558), eut une très grande influence. Décrivant une chambre noire possédant une lentille à l'ouverture et où il remarque que les images se forment comme sur un écran, renversées et inversées, le Napolitain compare ce dispositif à l'œil. Quelques années plus tôt, Léonard de Vinci avait bien noté le renversement de l'image, mais n'avait pas dévoilé sa découverte.

La lumière, un sujet d'étude

C'est en dehors du monde des savants que la révolution se prépare. Une lunette d'approche, construite par des opticiens italiens en 1590, puis en Hollande une dizaine d'années plus tard, est perfectionnée par Galilée à Venise en 1609. Avec cette lunette, Galilée découvre en janvier 1610, dans le ciel, des choses merveilleuses invisibles à l'œil nu. Ce milieu transparent à travers lequel il regarde montre-t-il la réalité ? Engendre-t-il des illusions d'optique ? Galilée était incapable de répondre à ses contradicteurs. Les difficultés de l'optique ne pouvaient être surmontées qu'au prix de changements conceptuels très importants. Kepler fut l'initiateur de ce mouvement. La nature de la lumière et l'origine des couleurs sont les deux problèmes fondamentaux abordés dans son ouvrage *Ad Vitellionem paralipomena* («Paralipomènes à Vitellion», 1604), présenté comme un commentaire et un complément aux idées de Vitellion (où Kepler rend également hommage à Della Porta et à Alhazen). Pour Kepler, l'œil devient définitivement un instrument d'optique, et la lumière est le véritable objet à étudier. Selon lui, la lumière s'écoule dans toutes les directions à partir de sa source, comme un flux, et jusqu'à l'infini, selon des lignes droites qu'il nomme *rayons*. Le rayon n'est pas la lumière, mais sa direction de

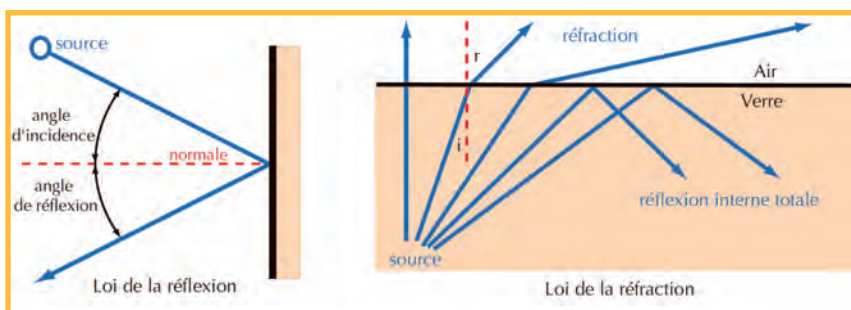
Portrait de Johannes Kepler
peint par Huggard et page de
titre de son ouvrage fondamental
sur l'optique,
Paralipomènes à Vitellion, 1604



propagation. Kepler peut ainsi confirmer géométriquement la formation des images que donnent les lunettes astronomiques et, par suite, dans sa *Dioptrique* de 1611, les observations de Galilée.

Se posant en disciple de Kepler, Descartes écrit, en 1637, que «la lumière est une tendance ou aptitude au mouvement, une pression qui s'exerce instantanément sur les particules ou globules du milieu subtil qui emplit les pores des corps». Cette action qu'est la lumière doit obéir aux lois mécaniques du mouvement. Le modèle mécanique proposé par Descartes lui permet d'expliquer la réflexion et de retrouver la loi de la réfraction découverte par son ami néerlandais Willebrord Snell : $(\sin i)/(\sin r) = \text{constante}$ (i étant l'angle d'incidence, r l'angle de réfraction).

La constante, nommée aujourd'hui *indice de réfraction*, est caractéristique des deux milieux en présence et ne peut être déterminée que par l'expérience.



Lois de la réflexion et de la réfraction de la lumière

- (a) Un rayon de lumière qui se réfléchit sur une surface polie ou un miroir obéit à la loi de la réflexion : l'angle entre le rayon incident et la perpendiculaire à la surface est égal à l'angle entre le rayon réfléchi et la perpendiculaire.
- (b) Un rayon de lumière qui traverse des matériaux différents change de direction en obéissant à la loi de réfraction : $n \sin i = n' \sin r$, où i est l'angle d'incidence, r l'angle de réfraction, n et n' les indices de réfraction des matériaux. Pour le cas typique air-verre, $n = 1$ pour l'air, $n' = 1,5$ pour le verre, de sorte qu'un rayon pénétrant dans le verre avec un angle d'incidence de 30° se propage dans le verre selon un angle de $10,5^\circ$. Comme l'indice de réfraction dépend aussi de la longueur d'onde, un rayon de couleur bleue est plus réfracté qu'un rayon de couleur rouge ; c'est ce qui explique l'arc-en-ciel et le fait qu'une lumière blanche voit ses couleurs étalées en un spectre à la sortie d'un prisme.

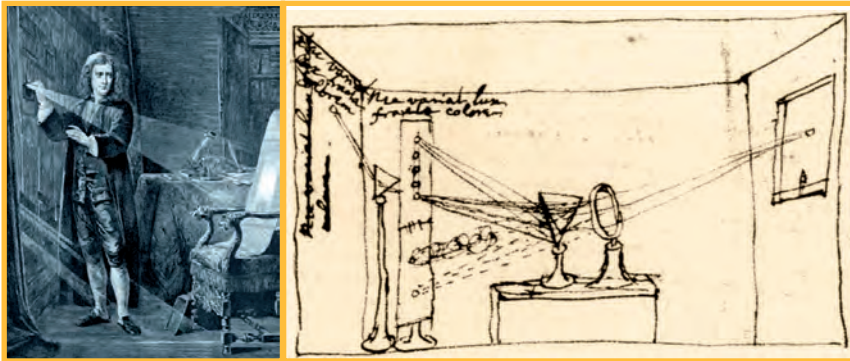
Habile géomètre, Pierre de Fermat discute les propositions de Descartes et pose le principe fondamental selon lequel la lumière doit parcourir le chemin le plus court en un minimum de temps.

En 1675, la découverte par Römer de la finitude de la vitesse de la lumière (voir encadré) conforte le savant néerlandais Christiaan Huygens dans l'idée que les corps lumineux produisent des vibrations indépendantes les unes des autres et successives, que l'éther transmet tout comme l'air transmet le son.

En utilisant le microscope, son contemporain le Britannique Robert Hooke est intrigué par les bandes colorées qui apparaissent dans le champ de vision lorsqu'il presse plus ou moins une lame mince. Il adopte également la théorie d'une onde de lumière, se propageant rapidement et présentant un front perpendiculaire à la direction de propagation.

La lumière et la couleur

C'est au cours de ses *deux années admirables* 1666 – 1667 que le jeune Isaac Newton établit les fondements d'une nouvelle théorie de la lumière. Cherchant de prime abord une solution au problème de l'irisation des images données par les objectifs astronomiques, il veut d'abord comprendre la nature des couleurs. Il réalise de nombreuses expériences, au terme desquelles il peut affirmer que les rayons *colorifiques* sont contenus dans la lumière blanche provenant du Soleil et des corps lumineux.



À gauche : le jeune Isaac Newton réalise son *experimentum crucis* concernant la nature de la lumière (peinture par Loudan).

À droite : Schéma de la main de Newton montrant son dispositif.



Il se sert de prismes qui jouent en quelque sorte le rôle de *sélecteurs de couleurs* : à la sortie d'un prisme, les rayons colorés sont réfractés de façon différente, mais toujours dans le même ordre, et à chaque couleur correspond un indice de réfraction spécifique. Chaque couleur simple, ou plutôt chaque lumière monochromatique, peut ensuite être réfractée par un second prisme sans subir d'altération. Pour vérifier cette interprétation d'une lumière blanche composée de couleurs, Newton reconstitue celle-ci à partir du spectre d'un premier prisme : une lentille convergente permet de reproduire la lumière initiale !

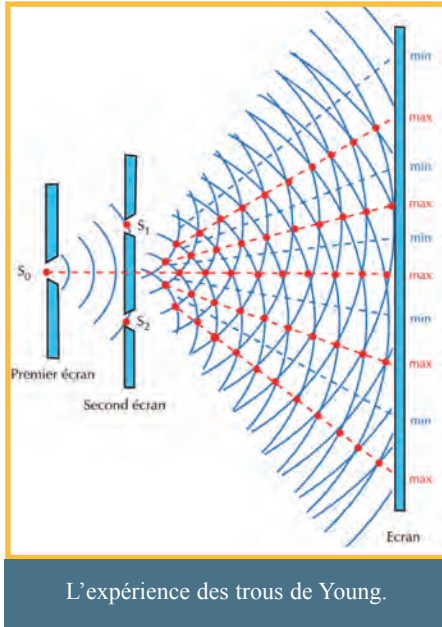
Dès 1669, les idées de Newton, bien que non publiées officiellement, se diffusent à Cambridge puis dans toute la communauté scientifique. Les résultats expérimentaux forcent l'admiration, mais leur interprétation rencontre de vives oppositions, dont celles de Hooke et de Huygens. Newton, qui, on l'a vu, ne supporte pas la contradiction, attend 1704 et la mort de ses adversaires pour publier enfin son *Traité d'optique*. Il y développe son modèle d'une lumière blanche hétérogène et granulaire. Selon lui, les corps lumineux émettent des *particules* de lumière se succédant le long des rayons, à très grande vitesse et dans toutes les directions de l'espace. Dans la lumière blanche, les particules de lumière colorifique sont toutes présentes, d'où l'impression de blanc qui s'en dégage. Le prisme permet de séparer ces particules.

La lumière en débat

La théorie de Newton n'est remise en cause qu'au milieu du XVIII^e siècle par Leonhard Euler. Le savant bâlois critique fermement la structure granulaire de la lumière. D'une part, il lui semble impossible que le Soleil ne s'épuise pas à perdre ainsi autant de particules. D'autre part, l'espace devait être rempli de particules de lumière ; les chocs de ces particules entre elles, quand leurs directions se coupaient, devaient présenter quelques phénomènes notables, or rien de tel n'était observé. Enfin, pour la propagation rectiligne des corpuscules lumineux, il fallait supposer aux milieux solides transparents un alignement des pores qui ne pouvait que les fragiliser. Tout cela concourt, dit Euler, à ne pas accrédi-ter l'hypothèse d'une lumière corpusculaire : elle doit donc être la propagation vibratoire périodique d'une perturbation de l'éther qui emplit l'espace. Comme les différentes notes de musique, les couleurs doivent être caractérisées par des fréquences propres. Le mélange de plusieurs couleurs simples donne une couleur composée de fréquences intermédiaires. Euler parle ainsi d'une *musique des couleurs*. Notons que l'analogie est tentante mais fautive, puisque les sons ne se mélangent pas vraiment comme les couleurs-pigments sur la palette d'un peintre ou les couleurs-

lumière de faisceaux lumineux colorés ; l'accord *do-mi-sol* ne donne pas une note nouvelle sur une fréquence donnée...

L'optique se trouvait dans une impasse théorique au début du XIX^e siècle lorsque, en Angleterre, Thomas Young, esprit brillant et curieux, étudie les couleurs des bulles de savon, puis élabore la célèbre expérience des fentes. Issus d'une même source, deux minces faisceaux lumineux diffractent à la sortie des deux fentes étroites, proches et parallèles. Sur l'écran, Young observe des franges d'interférence de même largeur, parallèles aux fentes, alternativement brillantes et sombres, dans la zone de superposition des deux faisceaux diffractés.



L'expérience des trous de Young.

Il en mesure l'interfrange et relie le résultat à la différence des trajets parcourus par les rayons lumineux ; il en déduit les longueurs d'onde des lumières colorées, obtenant entre $0,4 \mu\text{m}$ (pour le bleu) et $0,7 \mu\text{m}$ (pour le rouge).

Le travail de Young pose ainsi les fondements d'une théorie ondulatoire de la lumière. En France, le jeune Augustin Fresnel redécouvre et justifie mathématiquement les résultats de Young.

En 1814, pendant les loisirs que lui laisse son travail d'ingénieur des Ponts et Chaussées, Fresnel étudie l'optique. Avec des moyens de fortune mais un soin méticuleux, il observe l'ombre d'un cheveu placé dans un très mince pinceau de lumière. Il étudie les franges à la loupe et construit point par point l'ensemble du champ de diffraction. Il envoie à l'Académie des sciences son premier mémoire, qui impressionne fortement François Arago ; ce dernier conseille au jeune homme de lire les auteurs réputés, mais Fresnel, ne connaissant ni l'anglais ni le latin, ne compte que sur lui-même. Dans un deuxième mémoire, il explique que les franges de diffraction proviennent des interférences des ondes secondaires nées au bord de l'écran. Lorsque ces ondes secondaires arrivent en phase, c'est-à-dire dans le même état de vibration en un point de l'écran, elles donnent une frange brillante en additionnant leurs effets. À l'inverse, lorsqu'elles sont dans des états opposés, elles soustraient leurs effets,

s'annulent et donnent sur l'écran une frange obscure. Il peut alors soumettre aux commissaires de l'Académie des sciences un mémoire détaillé comportant une démonstration mathématique élégante, simple et très féconde du phénomène de diffraction, pour lequel il obtient le prix de l'Académie des sciences. En 1821, Fresnel propose que l'onde lumineuse ne vibre que dans un plan perpendiculaire à sa propre direction, comme une corde animée d'une oscillation périodique. Cette vibration transversale peut être modélisée par un vecteur. Reste à expliquer l'intensité lumineuse. Fresnel pose qu'elle est proportionnelle au carré de l'amplitude de l'onde reçue.

En 1850, les expériences de Foucault marquent le triomphe apparemment définitif de la théorie ondulatoire.

Les nouvelles lumières selon Maxwell

Le couple Faraday–Maxwell a, à de multiples égards, une forte ressemblance avec le couple Galilée–Newton, le premier de chaque couple saisissant intuitivement les relations et l'autre les formulant avec rigueur et les appliquant qualitativement.

Albert Einstein
1879–1955

À la fin du XIX^e siècle, on classait les forces capables de s'exercer sur la matière en trois types : les forces de gravitation, les forces électriques et les forces magnétiques.

L'électricité est caractérisée par l'existence de deux sortes de charges électriques, l'une positive, l'autre négative. Les charges de même signe se repoussent, celles de signes contraires s'attirent, avec une intensité qui varie avec la distance de la même façon que l'interaction gravitationnelle. Le magnétisme désigne l'ensemble des phénomènes relatifs aux aimants, qui attirent le fer et s'orientent à la surface de la Terre en direction des pôles. L'aimant a lui-même deux pôles, le «nord» et le «sud», les semblables se repoussant et les contraires s'attirant.

Attraction, répulsion... Marqués du même sceau, électricité et magnétisme semblent cousins. Les Grecs l'avaient déjà pressenti. Ils avaient remarqué que de l'ambre (en grec : *elektron*) frotté avec un chiffon de laine était capable d'attirer des brins de paille, et qu'une certaine résine fossile appelée *magnès* attirait des particules de fer. Au VI^e siècle av. J.-C., Thalès de Milet, le plus moderne des géomètres grecs, soupçonna qu'électricité et magnétisme n'étaient que deux manifestations d'un même phénomène, et suggéra que ces substances bizarres avaient une *âme* aspirant les objets voisins.

Vingt-quatre siècles plus tard, en 1819, le physicien danois Christian Ørsted donne un cours pratique sur l'électricité. Par hasard, une aiguille aimantée se trouve à proximité de l'appareillage. Ørsted s'aperçoit que, chaque fois qu'il lance du courant dans le circuit, l'aiguille aimantée dévie. Forts de cette découverte heureuse, André Ampère et François Arago ébauchent en quelques mois une théorie dans laquelle les courants électriques variables induisent des forces magnétiques, et *vice versa*. À leur suite, une moisson abondante de résultats expérimentaux confirme la correspondance étroite entre phénomènes électriques et phénomènes magnétiques.

La théorie de l'électricité ne sera pourtant réellement justifiée qu'avec la découverte expérimentale de l'*électron* en 1898. Cette particule élémentaire, constituant en partie les atomes, véhicule une charge électrique indivisible, sorte de grain élémentaire de l'électricité. Un atome normal est électriquement neutre, car les charges négatives accumulées dans ses électrons sont exactement compensées par les charges positives portées par son noyau auquel les électrons sont liés. Les charges électriques peuvent être statiques ou en mouvement. Par exemple, dans un métal conducteur, il existe des électrons libres qui se déplacent lentement (un dixième de millimètre par seconde) ; c'est ce mouvement des charges qui engendre le courant électrique, lequel se propage à la vitesse du *champ* associé, c'est-à-dire celle de la lumière (300 000 km/s).

De même, le magnétisme d'un aimant naturel se révèle être induit par des micro-courants circulant au niveau moléculaire, et, à plus grande échelle, le champ magnétique terrestre serait engendré par de vastes mouvements de matière conductrice de l'électricité dans le *nifé* (noyau terrestre constitué de nickel et de fer) en rotation.



James Clerk Maxwell,
1831–1879.

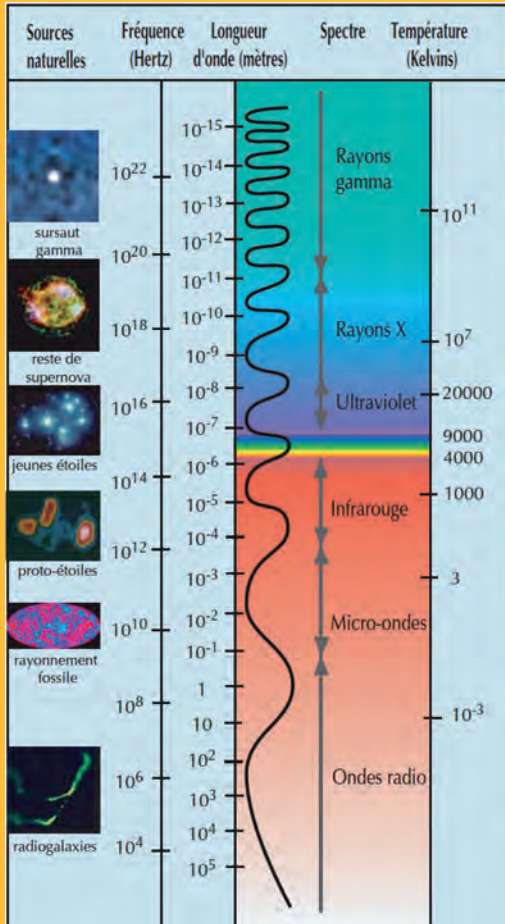
La véritable unification des champs électrique et magnétique date de 1873, lorsque le physicien écossais James Clerk Maxwell fonde la *théorie du champ électromagnétique*. L'ensemble des phénomènes électriques et magnétiques est réduit à quatre équations mathématiques – aujourd'hui célèbres – qui résument leurs propriétés et leurs relations mutuelles. Pour Maxwell, les effets électromagnétiques se manifestent par des mouvements dans la matière et non par des actions à distance. Cette matière peut être la matière ordinaire ou un milieu, l'éther, qui lui est associé et qui assure la transmission des mouvements, de nature non mécanique.

Au repos, une charge électrique a un champ radial fixe et constant dans le temps. Dès que la charge se déplace, le champ environnant doit s'ajuster à la nouvelle localisation de la charge, et la perturbation dans le champ se propage à une vitesse finie, qui est celle de la lumière. Une agitation de la charge produit une perturbation dans le champ ; en particulier, si le mouvement de la charge est périodique, les perturbations prennent la forme d'une onde, de la même façon que l'agitation continue d'un bâton dans l'eau produit des ondes circulaires. Maxwell prédit par conséquent que les mouvements de charges produisent des *ondes électromagnétiques*, se propageant dans le vide à la vitesse de la lumière.

Dans une onde composée d'une alternance régulière de crêtes et de fosses, la distance entre deux crêtes consécutives est la *longueur d'onde*, tandis que le nombre de crêtes par seconde est la *fréquence*. La lumière visible ne constitue qu'une faible partie du rayonnement électromagnétique, correspondant à une étroite bande de fréquences. Il va de soi que plus la longueur d'onde est élevée, plus la fréquence est faible : ces deux grandeurs sont en fait inversement proportionnelles.

L'astronomie théorique et observationnelle repose sur les propriétés du rayonnement électromagnétique. Les ondes électromagnétiques transportant de l'énergie (d'autant plus que la fréquence est élevée) et de l'impulsion, elles exercent une force sur la matière qu'elles rencontrent. La lumière qui éclaire cette page la chauffe et la pousse. Le Soleil exhale un souffle électromagnétique capable de décoiffer les comètes ; la pression de radiation jaillie du cœur des étoiles peut résister à l'effondrement gravitationnel.

Les répercussions de la théorie électromagnétique furent aussi grandes que celles de la loi d'attraction universelle, et ses conséquences théoriques et pratiques capitales pour l'évolution de notre civilisation – mais, contrairement à celles de Newton, les conclusions de Maxwell ne furent pas admises de son vivant. Il était mort depuis huit ans lorsque Heinrich Hertz – qui ne connaissait pas la théorie de Maxwell ! – réussit, en 1887, à produire des ondes électromagnétiques en laboratoire, à l'aide d'un circuit électrique oscillant ; leur longueur d'onde, de l'ordre du mètre, confirmait la théorie de Maxwell. Au tournant du siècle, Guglielmo Marconi établit la première transmission radio transatlantique. L'ère des télécommunications était née.



Le spectre électromagnétique

L'ensemble de toutes les radiations électromagnétiques s'étend des rayons gamma pour les plus courtes longueurs d'onde au rayonnement radio pour les plus grandes. La lumière visible, qui se décompose en «couleurs», ne représente qu'une minuscule portion du spectre complet.

La fréquence mesure le nombre de vibrations d'une onde par seconde ; elle mesure aussi l'énergie transportée par l'onde, qui est d'autant plus élevée que la longueur d'onde est plus courte. N'importe quel corps dont la température est supérieure au zéro absolu rayonne des ondes électromagnétiques dont l'énergie est d'autant plus élevée que la température est plus grande. L'Univers, dont la température moyenne est de 3 K, rayonne des ondes millimétriques ; le corps humain émet du rayonnement infrarouge (que les militaires s'emploient à détecter) ; la surface de la plupart des étoiles, à quelques milliers de degrés, émet de la lumière visible et les corps à plusieurs millions de degrés émettent des rayons X très énergétiques, donc très pénétrants.

Du brouillage sur les ondes

*Il découvrit
Niché dans la lumière
Un petit compagnon
On le nomma Photon*

André Verdet
1913–2004

La théorie de Maxwell, en unifiant l'électricité et le magnétisme, simplifie apparemment la physique du XIX^e siècle. Elle la rend en fait incohérente, car elle porte insidieusement la pomme de discorde dans le discours galiléo-newtonien sur l'Univers. L'étude détaillée – à la fois théorique et expérimentale – des propriétés du champ électromagnétique soulève aussitôt deux questions simples, qui alimenteront les deux révolutions scientifiques du XX^e siècle : mécanique quantique et relativité.

Première question : quelle est la nature réelle du rayonnement ? Si la théorie de Maxwell confère un aspect purement ondulatoire au rayonnement électromagnétique, le fait que ce dernier transporte de l'énergie et de l'impulsion rappelle irrésistiblement l'idée de projectiles : à la fin du XIX^e siècle, quantité d'expériences de laboratoire mettent ainsi en évidence les propriétés *discontinues* du rayonnement.

Au tournant du siècle, Max Planck émet l'hypothèse que les ondes électromagnétiques (et la lumière en particulier) ne peuvent être rayonnées ou absorbées que sous forme de grains d'énergie, les *quanta*. Mais c'est Albert Einstein, en 1905, qui ose le premier attribuer une existence réelle aux quanta de lumière, définitivement baptisés *photons* en 1926 par Gilbert Lewis. Pour expliquer le fait que, lorsqu'une plaque de métal est irradiée par une lumière de fréquence suffisamment élevée, des électrons lui sont arrachés (effet photo-électrique), Einstein fait l'hypothèse que le rayonnement est constitué de véritables corpuscules, portant une énergie proportionnelle à la fréquence et capables d'extraire les électrons du métal en y déposant entièrement leur énergie. Einstein ressuscite donc la théorie corpusculaire de la lumière prônée par Newton, et utilisée par Laplace dans ses spéculations sur la lumière emprisonnée par de grands astres obscurs.

L'irréductibilité apparente entre mécanique et électromagnétisme ne disparaîtra réellement qu'avec Niels Bohr et la nouvelle mécanique quantique qui, en 1927, prendra pleinement en compte la dualité onde/corpuscule du rayonnement (et de toute matière en général, comme l'a montré Louis de Broglie). La lumière n'est ni onde ni corpuscule,

mais les deux à la fois ; ce sont là deux aspects complémentaires du même phénomène, l'un dominant l'autre et se révélant au savant selon les moyens qu'il utilise pour l'étudier.

Deuxième question : quel est le support de l'onde électromagnétique ? Cette fois, c'est la structure même de l'espace et du temps qui va être remise en cause, à travers l'avènement de la théorie einsteinienne de la relativité. La suite de l'histoire vous est racontée par Jean-Philippe Uzan.

J.-P. L.

Bien avant que la Terre fût même une nébuleuse, des astres brillaient depuis une sorte d'éternité, mais, hélas! si éloignés, si éloignés d'elle, que leur radieuse lueur, en parcourant près de cent mille lieues par seconde, n'est arrivée que récemment à la place occupée par la Terre dans le Ciel. Et il se trouve que plusieurs de ces astres se sont éteints depuis longtemps, avant qu'il ait été possible à leurs mortels de distinguer cette Terre. Cependant le rayon sorti de ces astres refroidis devait leur survivre. Il continua sa marche irrévocable dans l'étendue. C'est ainsi qu'aujourd'hui le rayon de quelques-uns de ces foyers en cendres est parvenu jusqu'à nous. De sorte que l'homme qui contemple le Ciel y admire souvent des soleils qui n'existent plus et qu'il y aperçoit quand même, grâce à ce rayon fantôme, dans l'Illusion de l'univers.

Extrait de Villiers de l'Isle Adam : L'Ève future (1886)

Pour en savoir plus :

Richard FEYNMAN, *Lumière et matière – Une étrange histoire*, Paris : Seuil/Points Sciences (1999)

Jean-Pierre CHANGEUX (dir.), *La Lumière au siècle des Lumières et aujourd'hui*, Paris : Odile Jacob (2005)

Michel HOCHMANN et Danièle JACQUART, *Lumière et vision dans les sciences et dans les arts : de l'Antiquité au XVII^e siècle*, Paris : Librairie Droz (2010)

Jean-Pierre LUMINET, *Illuminations*, Paris : Odile Jacob (2011)

Alexandre MOATTI (dir.), *Regards sur les textes fondateurs de la science - Tome 2 : physique de la lumière – radioactivité*, Paris : Cassini (2012)

Bernard MAITTE, *Une histoire de la lumière. De Platon au photon*, Paris : Seuil (2015)



Lumière sur l'espace-temps

Jean-Philippe Uzan

CNRS/Institut d'Astrophysique de Paris
et Institut Henri Poincaré

La compréhension de la nature physique de la lumière est intimement liée au progrès de nos représentations de l'espace et du temps. L'étude de vitesse de la lumière a ouvert le chemin de la relativité restreinte et sa propagation révèle la géométrie de l'espace-temps, propriété centrale de la relativité générale dont nous célébrerons le centenaire en novembre 2015.

La vitesse de la lumière : la relativité de M. Jourdain

On enseigne que dans le vide la lumière se propage à une vitesse c de 299 792 458 m/s, considérée comme une constante fondamentale. Une telle affirmation devrait pourtant vous surprendre.

En effet, la physique classique, celle qui est enseignée au lycée, repose sur le principe de relativité galiléenne, c'est-à-dire sur le fait que pour deux observateurs mûs d'une vitesse relative rectiligne et uniforme, les lois de la mécanique prennent la même forme. Ainsi, le passage du référentiel absolu de l'espace de Newton à un référentiel en mouvement rectiligne uniforme, aussi appelé *référentiel inertiel* ou *galiléen*, laisse les lois de la nature invariantes. En réalisant que «*le mouvement est comme rien*», Galilée affirme que l'on ne peut pas mettre en évidence notre mouvement par rapport à l'espace absolu.

Assigner une valeur à la vitesse de la lumière semble alors en contradiction avec cette cinématique galiléenne, car pour un observateur en mouvement avec une vitesse V , la lumière devrait se propager à la vitesse $c+V$!

Attribuer une valeur numérique à la vitesse de la lumière et affirmer que c'est une constante de la nature, c'est donc déjà faire de la relativité restreinte. Pour le comprendre, revenons brièvement sur l'histoire de la vitesse de la lumière.

Petite histoire de la vitesse de la lumière

On a longtemps admis que la lumière se propageait instantanément et Galilée fut le premier à douter de cette croyance. Ses expériences restaient cependant compatibles avec une propagation instantanée.

Ce n'est qu'en 1676 qu'Olaus Rømer prouva que ce n'était pas le cas. Il remarqua que les éclipses du satellite de Jupiter Io survenaient avec un décalage par rapport aux éphémérides de Jean-Dominique Cassini : elles étaient en retard quand la distance Terre-Jupiter augmentait, et en avance quand elle diminuait. Il réalisa que ces décalages s'expliquaient si l'on admettait que la lumière mettait un certain temps pour nous parvenir (voir figure 1). On pouvait enfin parler de la vitesse de la lumière ! En 1728, James Bradley, en interprétant l'aberration stellaire de l'étoile γ du Dragon, estima sa valeur à environ dix mille fois la vitesse orbitale de la Terre, encore très mal connue.

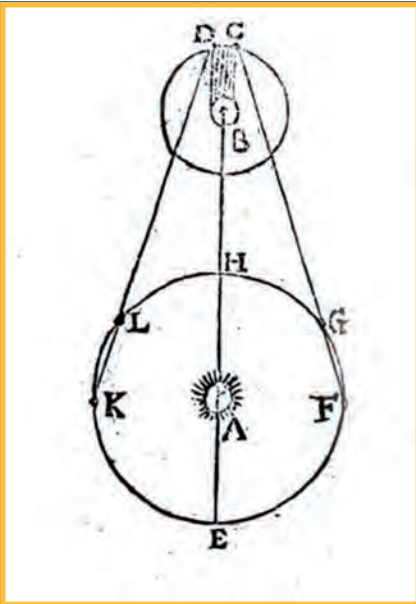


Figure 1: Le Soleil est en A, Jupiter en B, et Io en C ou D suivant qu'il entre ou sort de l'ombre de Jupiter. E, F, G, H, K représentent différentes positions de la Terre.

Supposons que l'on observe Io en D alors que la Terre se trouve en L. Pendant que Io effectue une révolution complète autour de Jupiter pour revenir en D, la Terre se déplace de L en K. La lumière provenant de Io et de Jupiter doit ainsi parcourir une distance supplémentaire. Si la lumière se déplace à une vitesse finie, elle prend donc plus de temps pour parvenir à la Terre. On observe donc Io sortir de l'ombre de Jupiter avec un retard correspondant au temps que la lumière met pour parcourir la distance entre L et K.

La durée séparant deux émergences de Io est d'environ 42,5 heures. La vitesse de la

lumière étant très grande, il était impossible de détecter cet effet d'une émergence à la suivante. Mais l'effet se cumule sur toute la période pendant laquelle la Terre se rapproche (ou s'éloigne) de Jupiter. Sur une période de deux mois, le retard doit atteindre dix minutes, ce qui fut confirmé le 9 novembre 1676 par Jean Picard. Ainsi, on pouvait estimer à vingt-deux minutes le temps pour que la lumière traverse l'orbite terrestre.

Rømer, Journal des Sçavans, tome XX, pp. 133-134, 1676.

Mesurer la vitesse de la lumière, c'était donc mesurer la vitesse orbitale de la Terre et ainsi déterminer la taille du système solaire avec précision. Les travaux d'Hippolyte Fizeau en 1849 puis de Léon Foucault en 1862 montrèrent que cette vitesse c vaut environ 300 000 km/s. Mais pouvait-on parler de c comme d'une constante alors que d'après la théorie optique de Newton elle devait se comporter comme la vitesse balistique de tout autre corps, et en particulier dépendre des vitesses de la source et du récepteur ?

Au début du XIX^e siècle, les études de la lumière sont intenses. Sur le plan théorique James Clerk Maxwell, fort de sa théorie de l'électromagnétisme publiée en 1873, démontre l'existence d'ondes d'une nature nouvelle. Ces ondes électromagnétiques représentent la propagation d'une perturbation des champs électrique et magnétique, dont la vitesse peut être calculée en fonction de deux constantes fondamentales, la permittivité et la perméabilité du vide. Gustav Kirchhoff note alors la coïncidence entre cette vitesse et la vitesse de la lumière. Maxwell franchit le pas pour affirmer que la lumière est une onde électromagnétique. Le statut de la vitesse de la lumière change radicalement : elle est la vitesse de propagation de toute onde électromagnétique dans le vide.

Mais, comme nous l'avons souligné, l'invariance galiléenne nécessitait de singulariser un référentiel privilégié et matérialisé, pensait-on, par un éther afin de pouvoir parler d'une vitesse de la lumière. Cependant, on démontra expérimentalement, en particulier grâce aux travaux d'Albert Michelson, que la vitesse de la lumière est la même dans tous les référentiels galiléens. Comment réconcilier lumière et cinématique ?

La vitesse de la lumière au cœur de la relativité restreinte

Cette contradiction sera levée en 1905 par Albert Einstein dans sa théorie de la relativité restreinte. Einstein y réaffirme le principe de relativité et postule la constance de la vitesse de la lumière dans tout référentiel galiléen.

Ce second postulat semble incompatible avec la loi de composition classique des vitesses. La loi de composition, notons-la \oplus , ne peut donc plus être donnée par une simple addition vectorielle comme en physique galiléenne car elle doit avoir un *élément absorbant*, c'est-à-dire tel que $v \oplus c = c$ pour toute vitesse v .

On peut montrer que la loi $u \oplus v = \frac{u+v}{1 + \frac{uv}{c^2}}$ satisfait à ce critère.

Elle possède un élément neutre, $v \oplus 0 = v$, un élément absorbant c , est associative $(u \oplus (v \oplus w)) = (u \oplus v) \oplus w$, et se réduit à la loi galiléenne à petites vitesses, $u \oplus v \simeq u + v$ si $uv \ll c^2$.

L'invariance de la vitesse de la lumière impose donc une nouvelle cinématique et l'utilisation de nouvelles transformations de coordonnées, dites de *Lorentz*, pour passer d'un référentiel inertiel à un autre. Einstein comprend que ces lois de transformation impliquent un abandon des notions newtoniennes d'espace et de temps absolus. Les lois de l'électromagnétisme de Maxwell sont invariantes sous ces transformations de Lorentz. Elles portaient ainsi en germe la relativité restreinte. C'est la contradiction théorique interne entre cette invariance et celle des lois newtoniennes extrapolées pour les grandes vitesses qui a révélé la nécessité de la cinématique relativiste. Et c'est en sacrifiant les transformations de Galilée qu'Einstein a pu étendre le principe de relativité de Galilée.

Le fait que la lumière ait la même vitesse dans tout référentiel inertiel implique que deux événements qui paraissent simultanés à un observateur sont différés dans le temps pour un autre observateur. La simultanéité est à Einstein ce que l'immobilité était à Galilée : relative à l'observateur. Dans cette vision, distances et durées ne sont plus identiques pour tous les observateurs et il faut revoir la formalisation de l'espace et du temps. Hermann Minkowski proposa en 1908 de les fusionner en une nouvelle entité physique, l'espace-temps à quatre dimensions, ensemble de tous les événements. Dans cette description, deux observateurs inertiels ont un espace et un temps différents mais partagent le même espace-temps. *L'espace-temps de Minkowski* devient le cadre absolu dans lequel se déroulent les événements physiques. La vitesse de la lumière acquiert alors une place essentielle en physique puisque c'est la seule dont la valeur est identique dans tous les référentiels inertiels. Elle joue ainsi le rôle d'une vitesse limite qui fonde la notion de causalité, justifiant son rôle de constante fondamentale.

Ceci explique en partie que le Bureau international des poids et mesures (BIPM) décide en 1983 de fixer par décret la valeur de c et de déduire la définition du mètre de celle de la seconde.

Lumière et géométrie

La théorie de l'électromagnétisme de Maxwell implique que la lumière se propage en ligne droite dans le vide.

Cette propriété, utilisée en optique depuis l'antiquité, reste vraie en relativité restreinte. Elle a d'ailleurs fortement influencé la définition de la notion mathématique de ligne droite. Dans *La Science et l'Hypothèse* (1902) Henri Poincaré affirme que «*ce que l'on appelle ligne droite en astronomie, c'est simplement la trajectoire de la lumière*», rappelant le lien millénaire entre lumière et géométrie. La géométrie euclidienne, celle que nous apprenons à l'école, est liée à notre perception et à la structure de notre regard. Elle s'est développée à partir de pratiques *vulgaires*, en particulier dans l'Égypte antique. Dans ses *Éléments*, Euclide définit la ligne droite comme «*celle qui est placée de manière égale par rapport aux points qui sont sur elle*», définition dans laquelle toute référence à l'optique a volontairement été éliminée, mais qui doit être comparée à celle de Platon, «*est droit, ce dont le centre fait écran aux deux extrémités*», qui renvoie explicitement à l'optique.

Pendant des siècles, la géométrie euclidienne était la seule géométrie connue et on considérait à juste titre qu'elle était LA géométrie de l'Univers. La physique se construisit entièrement sur cette hypothèse. On était convaincu que la géométrie euclidienne était l'idéalisation correcte des propriétés de notre espace. En novembre 1915, Einstein publie sa théorie de la relativité générale dans laquelle il propose que la gravitation *est* la manifestation de la géométrie de l'espace-temps. Cette géométrie est à déterminer expérimentalement !

Mais quelle est alors la trajectoire d'un rayon lumineux ? La théorie de l'électromagnétisme de Maxwell implique que la lumière emprunte le chemin le plus court entre deux événements. Le principe de Fermat énoncé au XVII^e siècle se généralisait. Dans une géométrie non-euclidienne, ce chemin ne correspond plus à une ligne droite mais à une courbe appelée *géodésique* qui dépend de la géométrie de l'espace-temps.

C'est une des prédictions et un des grands succès de la relativité générale. La matière courbe l'espace-temps et la propagation de la lumière permet d'en révéler la géométrie. Cela sera vérifié expérimentalement le 29 mai 1919 par les observations d'Arthur Eddington depuis l'île portugaise de Principe, au large des côtes d'Afrique occidentale (figure 2).

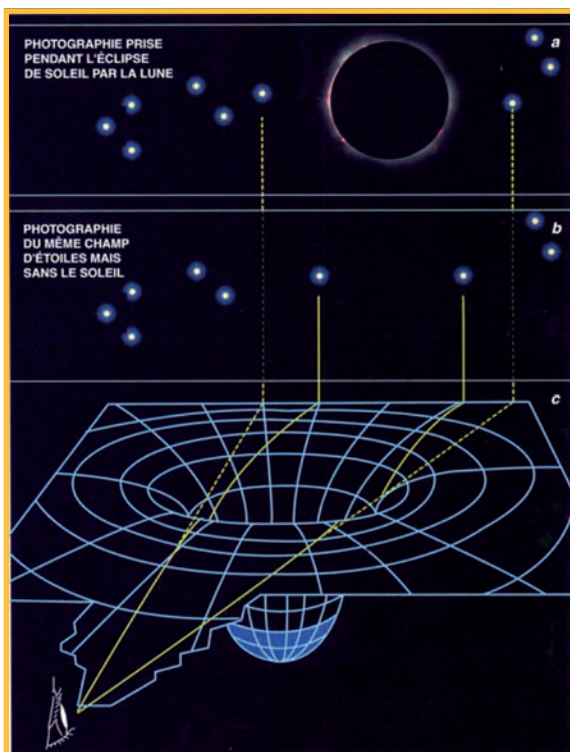


Figure 2 : Les rayons de lumière d'étoiles frôlant le Soleil sont observables au cours d'une éclipse.

La ligne en trait plein représente la trajectoire de la lumière, et la ligne en pointillée donne la position de l'image apparente. La séparation angulaire entre les deux étoiles est plus grande au cours de l'éclipse car la lumière est déviée de 1,7 seconde d'arc du seul fait de la courbure de l'espace-temps engendrée par la masse du Soleil. C'est ce qu'Eddington réussit à mesurer en 1919.

Illustration J. Eisenstaedt, D'Einstein aux trous noirs, le renouveau relativiste. Pour la Science Dossier hors-série (janvier–avril 2003), n°24.

La déflexion de la lumière est devenue l'un des outils les plus précis pour cartographier la géométrie de l'espace-temps et en déduire la distribution de la matière de l'univers, en particulier de celle que nous ne pouvons pas détecter par sa propre lumière : la matière noire, mais aussi pour tester la relativité générale aux échelles cosmologiques.

La distribution de matière dans l'univers donne lieu à de nombreux effets (figure 3) comme les arcs gravitationnels dont le premier fut détecté par Bernard Fort, Yannick Mellier et Geneviève Soucaïl, chercheurs au laboratoire d'astrophysique de Toulouse, en 1987. Les grandes structures de l'univers n'induisent que des distorsions faibles de la forme des galaxies d'arrière-plan. Détectées pour la première fois en 2000 par Yannick Mellier et son équipe, ces distorsions sont aujourd'hui une méthode observationnelle prometteuse, qui sera utilisée par le satellite de l'ESA (Agence Spatiale Européenne) Euclid, dont le lancement est prévu en 2020.

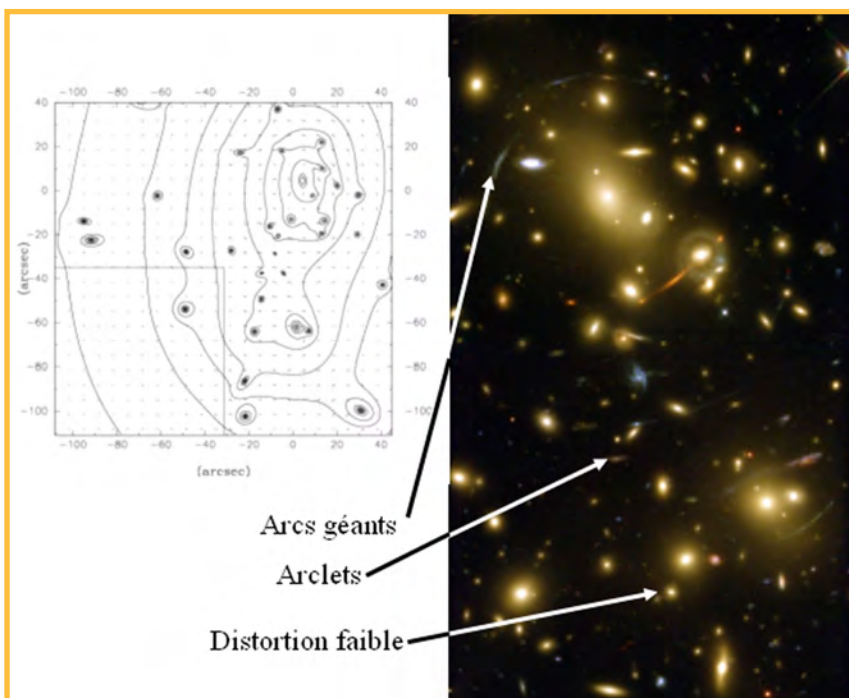


Figure 3

Effets de lentille gravitationnelle induits par un amas de galaxies. Suivant l'intensité du champ gravitationnel, la forme des galaxies d'arrière-plan peut être plus ou moins affectée, donnant ainsi naissance à des arcs géants ou à des distorsions faibles. Ces effets permettent de reconstruire la distribution de masse de l'amas de galaxies (carte de gauche).

Montage à partir de la photo d'Abell 2218 (NASA) de la reconstruction du potentiel gravitationnel par J.-P. Kneib et al., *Astrophys. J.* 471 (1996), 643.

J.-P. U.

Pour aller plus loin :

N. DERUELLE et J.-P. UZAN, *Théories de la relativité*, Belin (2014).

J. EISENSTAEDT, *La petite histoire de la ligne droite qui se mord la queue*, *Quadrature* 91 (2014).

B. LECLERCQ et J.-P. UZAN, *L'importance d'être une constante*, Dunod (2005).

J.-P. UZAN et R. LEHOUCQ, *Les constantes fondamentales*, Belin (2005).

Mission EUCLID : <http://sci.esa.int/euclid/>

**UNE BANQUE
CRÉE PAR
DES COLLÈGES,
ÇA CHANGE TOUT.**



MA BANQUE EST DIFFÉRENTE, CEUX QUI LA GÈRENT SONT COMME MOI.

Le Crédit Mutuel Enseignant est une banque authentiquement coopérative dédiée au monde de l'éducation, de la recherche et de la culture. Il développe un service de bancassurance sur mesure et place depuis toujours la qualité de son offre et la relation client au cœur de ses préoccupations.

Crédit  Mutuel
Enseignant



La lumière et sa vitesse, d'un débat abstrait à un outil métrologique

Pierre Lauginie

Maître de Conférences honoraire
Groupe d'Histoire et de Diffusion des Sciences d'Orsay, Université Paris-Sud

Un débat bi-millénaire

La lumière a-t-elle une vitesse ? La réponse à cette question – qui peut nous paraître évidente – pendant fort longtemps n'est pas allée de soi.

Le débat naît dès les tout débuts de la science grecque, bien avant notre ère. La question est alors : la lumière d'un astre prend-elle du temps pour venir jusqu'à nous, ou, au contraire, sa propagation se fait-elle *dans l'instant* ?

Les plus grands noms participent au débat : Empédocle d'Agrigente, Platon, Aristote, Euclide, Lucrèce. À l'exception d'Empédocle, le paradigme dominant sera l'instantanéité du phénomène lumineux.

Le débat reprendra à l'âge d'or des sciences arabes, X^e–XI^e siècles. Ibn Sinha, dit Avicenne, et Ibn al-Haytham, dit al-Hazen, soutiennent la matérialité et la temporalité du phénomène lumineux : «*Ce qui va de l'ouverture (la source) au corps qui lui fait face n'existe que dans un temps, même si cela est dissimulé aux sens*». (Ibn al-Haytham).

Le débat est relancé dans la première moitié du XVII^e siècle avec Descartes : propagation *successive dans l'espace* d'une tendance au mouvement – sorte de potentialité – et cependant *sans délai* croit-il, *hors du temps*. Pas question, dans ces conditions, de parler de vitesse.

Quasi simultanément, Galilée, en bon ingénieur, renverse les termes du débat : «*La lumière met-elle un temps pour venir à nous ? Mesurons donc ce temps, et nous verrons bien*». Son expérience des deux lanternes ne sera pas concluante, mais peu importe : la question est posée sur des bases nouvelles. Une révolution.

Où la lumière acquiert une vitesse

La solution – comme souvent en sciences – viendra d'un horizon complètement inattendu. Galilée – encore lui – découvrant en 1610 les quatre lunes orbitant autour de Jupiter, croit voir en elles la solution d'un problème majeur : se repérer sur terre et surtout en mer. En effet, voilà une horloge en plein ciel ! Bien qu'impraticable en mer, sa méthode sera utilisée pendant près de deux siècles pour la cartographie terrestre.

C'est l'origine de nombreux travaux sur les satellites de Jupiter afin d'en obtenir des éphémérides précises. Ceux-ci mettent bientôt en évidence certaines irrégularités de période du premier satellite, ultérieurement dit **Io**, qui semblent corrélées au mouvement orbital de la Terre. À l'Observatoire de Paris, Roemer comprend que ces irrégularités, seulement apparentes, sont liées au temps que met la lumière pour nous parvenir depuis Jupiter. Dans un article célèbre, publié en 1676, il établit que la lumière met vingt deux-minutes pour traverser l'orbite de la Terre, soit deux fois la distance Terre-Soleil (valeur moderne : 16 min 38 s, voir l'article de Suzanne Débarbat dans cette brochure).

Un peu plus tard, en 1690, le Néerlandais Huygens exprimera ce résultat sous forme d'une vitesse *« plus de six cent mille fois plus grande que la vitesse du son. Ce qui toutefois est tout autre chose que d'être momentanée, puisqu'il y a la même différence que d'une chose finie à une infinie »*.

Le monde scientifique ne sera définitivement convaincu qu'en 1728. Le Britannique Bradley découvre alors l'aberration stellaire : une petite modification de la position apparente des étoiles liée à la vitesse de la lumière. C'est l'analogue, pour la lumière tombant d'une étoile, de la déviation par rapport à la verticale des gouttes de pluie vues depuis un véhicule en déplacement. Le véhicule est la Terre, et l'aberration s'explique parfaitement sous l'hypothèse d'une vitesse finie de la lumière.

Comme Roemer, Bradley ne donne pas de valeur numérique pour cette vitesse. Cependant, la valeur que l'on peut déduire de ses données est déjà très voisine de 300 000 km/s. Ainsi, au milieu du XVIII^e siècle, la finitude de la vitesse de la lumière est enfin définitivement acquise et sa valeur, *uniquement déduite d'observations astronomiques*, est déjà centrée sur la valeur moderne. Mais cette valeur n'entre, par elle-même, dans aucune problématique et n'a évidemment aucune application. Sur ce sujet, il ne se passera rien de fondamentalement nouveau avant un siècle. Au milieu du XIX^e siècle, la possibilité nouvelle de mesurer la vitesse de la lumière sur Terre suscite une motivation nouvelle dans deux directions. Sous l'impulsion d'Arago, deux types d'expériences vont se

développer avec des finalités très différentes : théorique ou épistémologique d'une part, métrologique d'autre part.

La nature de la lumière : une expérience *cruciale* ?

Le débat sur la *nature de la lumière*, relancé au début du XVII^e siècle par Descartes, se cristallise avec Newton et Huygens : ou bien une *émission de corpuscules*, ou bien une *onde* dans un *éther* sur le modèle de l'onde sonore, que propose Huygens ; ou bien un *corps*, ou bien une *ondulation*.

Après la prééminence du modèle corpusculaire au XVIII^e siècle, la première moitié du XIX^e est dominée par l'irrésistible montée en puissance du modèle ondulatoire avec Young, Fresnel et Arago notamment. En 1840 le sort du modèle corpusculaire est virtuellement réglé. Néanmoins, Arago croit pouvoir proposer une expérience *cruciale* pour départager les deux modèles :

- le modèle corpusculaire, *tel que conçu* à l'époque, prévoit que la vitesse de la lumière doit être plus grande dans l'eau que dans l'air ;
- le modèle ondulatoire prévoit l'inverse.

Faisons donc l'expérience et – croit-on – la question sera réglée !

Foucault et Fizeau en 1850, d'abord ensemble, puis séparément, utilisant un dispositif à miroir tournant, se lancent dans une comparaison *qualitative* des vitesses dans l'air et dans l'eau. Foucault arrive le premier : la lumière *ralentit* en entrant dans l'eau.

Le modèle corpusculaire est rejeté. Alors, expérience *cruciale* ? Non. Mais ce n'est généralement pas souligné à l'époque. De fait, l'expérience de Foucault rejette non pas *tout modèle corpusculaire*, mais seulement une *hypothèse très particulière* remontant à Descartes dont était affecté le modèle de l'époque : la conservation de la composante de vitesse parallèle au plan de séparation. Et, un demi-siècle plus tard, le photon, cet étrange enfant de Planck et Einstein, se conformera sagement au résultat de Foucault !

Un outil pour la mesure des distances

D'autre part, vont apparaître les premières tentatives de mesure absolue sur Terre de la vitesse de la lumière dans l'air. Pourquoi un tel intérêt tout à coup ? Est-ce important ?

La non-observation des parallaxes stellaires¹ a longtemps été un argument contre le mouvement orbital de la Terre. La première d'entre elles n'est mesurée par Bessel qu'en 1838, et sa valeur n'est que 0,31". La base utilisée est un diamètre de l'orbite terrestre, soit environ 300 millions de km, ou deux fois la distance Terre-Soleil (dite *unité astronomique*, u.a.). D'où l'importance d'une détermination précise de cette distance.

Or, la connaissance indépendante de la vitesse de la lumière par une mesure terrestre va permettre d'inverser les raisonnements des astronomes. Par exemple, le temps mis par la lumière pour traverser l'orbite de la Terre est connu à partir de l'observation des satellites de Jupiter ; en le combinant avec la vitesse de la lumière, on obtient le diamètre de cette orbite. De même, une mesure d'aberration *dans le ciel*, combinée à la vitesse de la lumière, conduit aussi à la distance Terre-Soleil. Ce que comprend Arago. La vitesse de la lumière va entrer dans le domaine de la métrologie.

La première détermination terrestre est effectuée en 1849 par Fizeau grâce à un dispositif à roue dentée qui *hache* un faisceau lumineux envoyé en aller-retour de Suresnes à Montmartre (figure 1). Fizeau publie 315 000 km/s, valeur sensiblement supérieure à celle des astronomes. Mais il ne s'agit pas encore d'une détermination définitive. Citons Arago :

«*En répétant ces observations avec des appareils mécaniquement plus parfaits, on pourra un jour, sans sortir de Paris et de sa banlieue, trouver cette parallaxe du Soleil² qui, vers le milieu du siècle dernier, donna lieu à des voyages si longs, si lointains, si pénibles, et à tant de dépenses*».

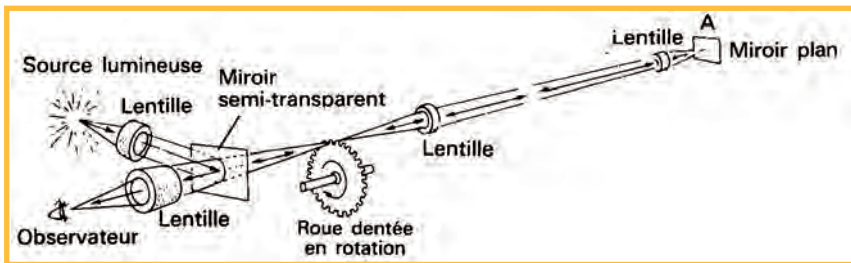


Figure 1

Schéma de l'expérience de Fizeau. La vitesse de la roue dentée est ajustée de manière que le faisceau, qui est passé *dans un creux* à l'aller, tombe sur une dent au retour. D'où le temps d'aller-retour.

¹ Parallaxe : généralement, différence entre les angles de visée d'un point donné (planète, étoile), depuis deux points d'observation éloignés dont la distance est connue et constitue la *base*. Parallaxe stellaire : angle sous lequel le demi-grand axe de l'orbite de la Terre est vu depuis une étoile.

² Parallaxe du Soleil : angle sous lequel le rayon de la Terre est vu depuis le centre du Soleil. Cela équivaut à connaître sa distance.

Une douzaine d'années plus tard, Le Verrier, directeur de l'Observatoire, demande à Foucault d'adapter son expérience qualitative de 1850 à une mesure quantitative précise. En effet, ses calculs d'interactions mutuelles des planètes lui font penser que les valeurs de la distance Terre-Soleil données par les astronomes, comme celle déduite de la mesure de Fizeau, sont surestimées de quelques pourcents. Foucault mène l'expérience à bien en 1862 (figure 2) et publie 298 000 km/s. Le Verrier est satisfait. De ce jour, la vitesse de la lumière, devient, en puissance, l'outil idéal pour la mesure des distances. Cerise sur le gâteau : contrairement aux parallaxes planétaires, cette nouvelle méthode est indépendante de la *figure* et des dimensions de la Terre : un gigantesque saut virtuel dans l'espace

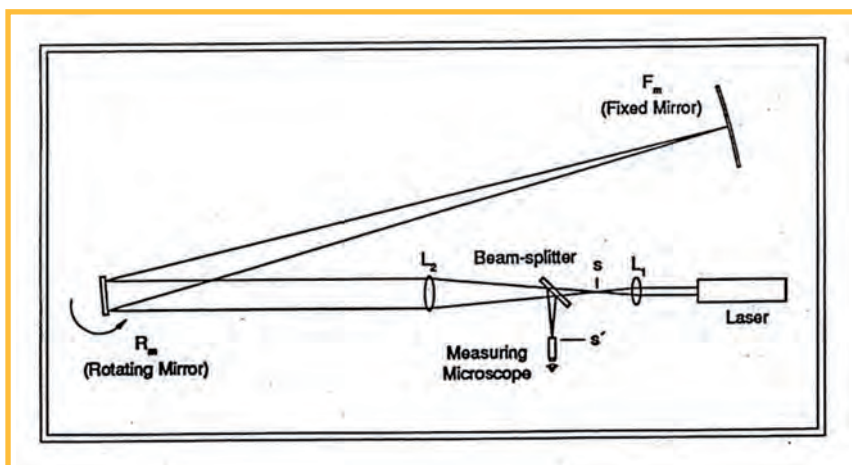


Figure 2

Principe de l'expérience du miroir tournant de Foucault

Schéma du montage pédagogique utilisé aujourd'hui en enseignement (modèle PASCO). Pendant l'aller-retour de la lumière entre les deux miroirs, le miroir tournant a pivoté légèrement, de sorte que le faisceau de retour est renvoyé dans une direction légèrement différente de l'incidente. D'où l'on déduit le temps d'aller-retour de la lumière.

Cette adaptation d'une expérience initiale qualitative à une expérience précise de métrologie, constitue une riche illustration des technologies de l'époque et de leur évolution : prise en compte d'avancées mathématiques pour le dessin de la turbine entraînant le miroir (figure 3), raffinement des détails mécaniques, appel au célèbre facteur d'orgue de l'époque – Cavallé-Coll – pour la réalisation de la soufflerie entraînant la turbine (figure 4), construction d'une horloge stroboscopique de haute précision (figure 5).

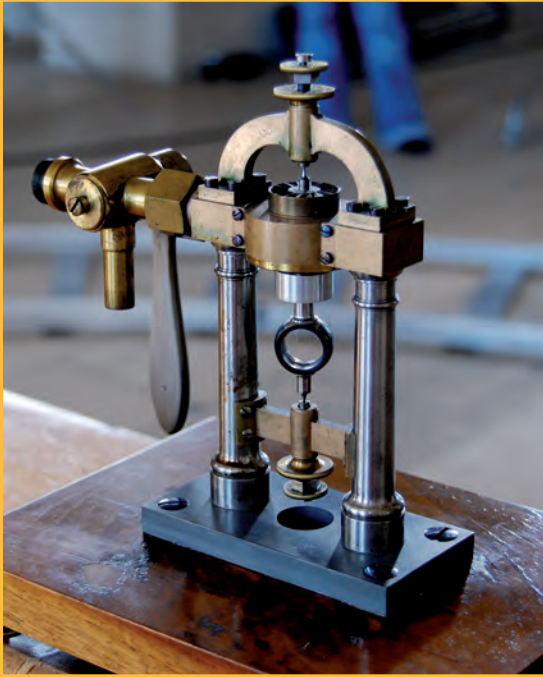


Figure 3

Le miroir tournant de Foucault et sa turbine

Noter qu'il a perdu son argenture.

(Observatoire de Paris)



Figure 4

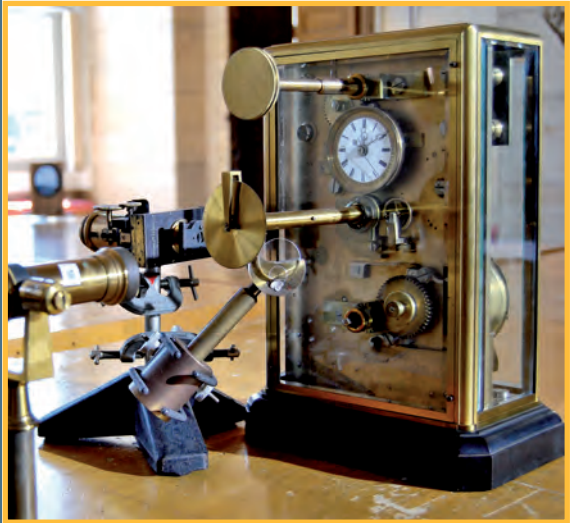
La soufflerie de Cavallé-Coll qui alimente la turbine du miroir tournant.

(Musée des arts et métiers, Paris)

Figure 5
L'horloge stroboscopique

L'horloge entraîne un disque denté (en avant) qui permet la mesure de la vitesse de rotation du miroir par effet stroboscopique.

(Observatoire de Paris)



Après Foucault, la vitesse de la lumière n'est pas encore la constante fondamentale que nous connaissons, *indépendante de tout*, du mouvement de la source comme de celui de l'observateur. Cependant les premiers indices troublants de cette indépendance remontent au XVIII^e siècle avec l'observation des premières étoiles doubles. Et aux expériences d'Arago et Fresnel au début du XIX^e. Le siècle vivra avec ce problème latent. On connaît la suite : cette indépendance, replacée dans le cadre d'une théorie générale – la relativité d'Einstein – rend aujourd'hui cet outil d'autant plus précieux pour la mesure des distances.

Les deux expériences de Foucault, 1850 et 1862, avec le même principe de base, en partie le même matériel et donc le même expérimentateur, sont emblématiques des deux grandes catégories d'expériences scientifiques. D'une part, des expériences à finalité épistémologique : établir, illustrer une loi ou un modèle, réfuter ou valider des théories. D'autre part, des expériences précises de métrologie : dans ce dernier cas, personne ne connaît à l'avance le *vrai* résultat. Et c'est très différent.

Léon Foucault, lui, s'est illustré dans les deux domaines.

P. L.

Pour en savoir plus :

William Tobin, *Léon Foucault*, Les Ulis, EDP-Sciences (2002)

Les magiciens de la lumière, un film du SCAVO, Université Paris-Sud, Faculté d'Orsay. Contact : Christine Azémar, co-réalisatrice, christine.azemar@u-psud.fr

La médiation scientifique en Sciences du numérique avec Inria

Des films



Des revues, pour les curieux de science

Des jeux, BDs,...



Des grains d'activité culturelle



Des ouvrages en lien avec
l'enseignement de l'informatique au lycée



Pour faire découvrir notre métier



Une revue en ligne et des plateformes,
pour mettre la science informatique
à portée de clic



Notre ambition

Partager une culture scientifique en sciences du numérique.
Permettre à chacune et chacun de comprendre et de s'exprimer sur la direction que prend
la recherche en informatique et sciences du numérique et quelles questions d'ordre
économique, sociétal et éthique ces évolutions soulèvent.

Priorité de nos actions

- Promouvoir l'enseignement de l'informatique et des sciences du numérique
- Développer l'égalité des chances, devant le numérique en permettant de le comprendre.

Un bureau d'accueil...

...pour poser toutes vos questions
<http://www.inria.fr/mecsci?l=accueil>

La lumière en ses états, ou la controverse Roemer–Cassini

Suzanne Débarbat

Astronome titulaire honoraire de l'Observatoire de Paris

Le travail d'historien scientifique s'apparente à une véritable enquête policière. Chaque indice doit être examiné, chaque calcul doit être refait, chaque ombre posée par le temps, éclairée. Entre deux savants aux tempéraments différents, l'un plus intuitif, l'autre d'une méticulosité extrême, la naissance d'une grande découverte ouvre le débat.



Olaus Roemer
1644–1710

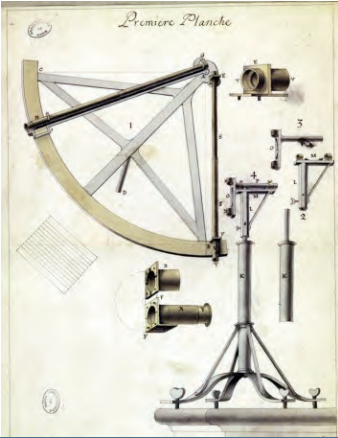
© Observatoire de Paris



Jean-Dominique Cassini
dit Cassini 1^{er} 1625–1712

© Observatoire de Paris - J-M Kollar

Jean Picard (1620–1682), membre de l'Académie royale des sciences nouvellement créée (1666), part pour le Danemark en juillet 1671, c'est «...pour pouvoir comparer les expériences faites ici avec celles de Tycho Brahé et pour substituer le méridien de Paris au lieu et place de celui d'Uranibour...». Il s'agit de déterminer, par observation des éclipses des satellites de Jupiter, la différence de longitude entre le méridien de l'Observatoire de Tycho Brahé et celui de l'Observatoire royal de Louis XIV, créé en 1667 et rapidement mis en construction.



Quaet de cercle de
Jean Picard 1620-1682
© Observatoire de Paris

Picard vient de publier son ouvrage *Mesure de la Terre* dans lequel il décrit les instruments qui lui ont donné la longueur d'un degré de méridien terrestre, à la latitude de Paris, donc les dimensions de la Terre considérée comme sphérique. Sur place, Picard sera aidé par Olaus Roemer (1644–1710), jeune astronome de 28 ans.

La prédiction des instants des éclipses du premier satellite de Jupiter (nommé Io plus tard) se fonde – après la découverte (1609/1610) par Galilée (1564–1642) de quatre petits astres accompagnant la planète – sur les travaux d'un professeur de Bologne, Giovanni Domenico Cassini (Jean Dominique Cassini). Ce dernier,

invité par Louis XIV et Colbert pour quatre ans, s'installe à l'Observatoire Royal en septembre 1671, dès la construction de son premier étage achevée.

À la fin du printemps 1672, Picard revient à Paris accompagné de Roemer ; il obtient pour lui la charge de professeur d'astronomie du Dauphin. Simultanément, il le fait nommer académicien astronome. Roemer côtoie deux autres étrangers, Cassini, nommé dès son arrivée à Paris en mars 1669, et Christiaan Huygens nommé en 1666 dès la création de l'Académie.



Christiaan Huygens, 1629–1695.
© Observatoire de Paris
D. Monseigny

À l'Observatoire royal, l'observation des éclipses de Io se poursuit en vue de la détermination des longitudes des différents lieux de la Terre où s'effectuent des expéditions lointaines ou proches. Roemer y participe aux côtés de Cassini et de Picard, lorsque ce dernier n'est pas en voyage, étant tous logés dans un des appartements qui y existent, après l'achèvement de la construction en 1672.

Bientôt il apparaît que les observations, comparées avec les prédictions de Cassini, présentent une avance ou un retard selon qu'il s'agit d'une immersion

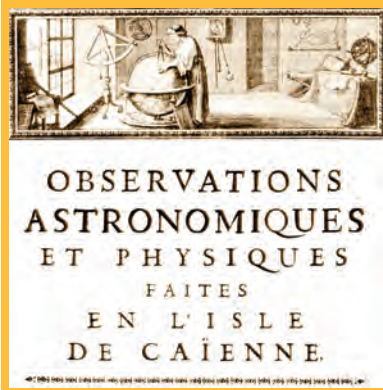
ou d'une émergence. Cet écart atteint une dizaine de minutes d'heure. La précision des régulateurs, dont disposent les astronomes, permet de le constater. En effet, grâce à Huygens, ses horloges à pendule du milieu des années 1650, contrôlées par l'observation du Soleil à son passage au méridien du lieu, sont parvenues à tenir la seconde sur un mois.

Par ailleurs, Jean Richer (1630–1696), élève astronome, est envoyé à Cayenne par l'Académie en 1672 ; il y fait de nombreuses observations, dont certaines à implications théoriques importantes. Lui aussi a soin de déterminer les coordonnées de son lieu d'observation, latitude et longitude. Les données qu'il a recueillies sont analysées, à son retour, et font l'objet de plusieurs études et publications.

En 1673, après les quatre années écoulées, Cassini décide de demeurer en France et il reçoit ses lettres de naturalité.

La controverse Cassini–Roemer se développe dès l'annonce de Roemer, si l'on en croit les contemporains. Cassini, remarquable observateur qui a déjà découvert (1671 et 1672) deux autres satellites de Saturne venant s'ajouter à celui vu par Huygens, se fonde sur les observations disponibles à l'époque. Aucune ne montre des écarts analogues pour les trois autres satellites galiléens et, dans ses publications suivantes, il introduira un terme correctif au mouvement de Io.

Roemer, de son côté, est épaulé par Huygens, le premier à donner une valeur numérique à la vitesse de propagation de la lumière. Retourné au Danemark, à la demande du roi de ce pays pour y travailler à des problèmes d'adduction d'eau comme il l'a fait avec Picard pour Versailles, Roemer ne semble pas avoir poursuivi la discussion sur ce sujet. Ni lui, ni Cassini ne connaîtront la confirmation apportée par Bradley (1693–1762) lors de sa découverte de l'aberration en 1728, Roemer est mort en 1710 et Cassini en 1712. L'ensemble des observations, portant sur les différences de longitude et les écarts constatés sur les éclipses de Io, impose de chercher une explication sur l'origine des avances ou des retards à nouveau constatés. Selon Bernard Le Bovier de Fontenelle (1657–1757), nommé en 1697 secrétaire perpétuel de l'Académie, dans un écrit de 1707, c'est au mois d'août 1674 que Cassini a fait connaître que le retard/avance,



Jean Richer dans ses travaux astronomiques à Cayenne. Gravure de Sébastien Leclerc, 1590–1695. © Observatoire de Paris

noté par les astronomes, peut être expliqué par le fait que la lumière ne se propage pas instantanément. Différents arguments militent en faveur de cette année 1674 (Actes, Table Ronde du CNRS *Roemer et la vitesse de la lumière* de 1976, publiés en 1978 chez Vrin).

D'un autre côté, Laurence Bobis et James Lequeux, dans un article paru en 2008 dans le *Journal of Astronomical History and Heritage* (vol. 11, p.97-105), s'appuient sur un manuscrit, probablement de la main de Joseph-Nicolas Delisle (1688–1768), transcrivant le texte de Cassini, daté du 22 août 1676 et provenant des procès verbaux de Académie. Les originaux de ces documents n'existent plus à l'Académie des sciences mais, au temps de Delisle, ils ont été établis en ordre chronologique, ce qui fixe l'année à 1676.

Faut-il croire la date de Fontenelle (*août 1674*) ou faut-il retenir plutôt la date de la copie de Delisle (*août 1676*) ? Des documents originaux se découvriront peut-être un jour permettant de répondre avec plus de certitude à ces questions. Ce qui est à noter, et qui n'a jamais été discuté à l'époque, est que l'on ne connaît pas actuellement de document de la main de Cassini I^{er} dans lequel, après la publication de Roemer dans le *Journal des Sçavans* du 7 décembre 1676, il revendique – à quelque date que ce soit – la découverte du fait que la lumière se propage à vitesse finie.

Ce sur quoi Cassini fonde son opinion est le fait qu'il ne constate pas les mêmes écarts sur les autres satellites alors connus qui auront pour noms Europe, Ganymède et Callisto, mais pour lui sont II, III, IV. Les travaux ultérieurs des spécialistes de la mécanique céleste montreront qu'ils sont, pour eux, masqués par des effets gravitationnels. Pour ce qui est de cette vitesse, il convient de lire ou relire l'article du *Journal des Sçavans*, dans lequel il est écrit : «...pour une distance d'environ 3000 lieues, telle qu'est à peu près la grandeur du diamètre de la terre, la lumière n'a pas besoin d'une seconde de temps [...] . [...] ce à raison de 22 [minutes] pour tout l'intervalle [...] qui est le double de celui qu'il y a d'icy au Soleil».

Il convient d'ajouter aussi que, dans une étude publiée en 1985 dans l'*American Journal of Physics*, (Vol. 53, p 620 à 630), Andrzej Wroblewski, a relevé près d'une cinquantaine de données numériques de la vitesse de la lumière attribuées à Roemer, dont, vraisemblablement, aucun des auteurs n'avait lu le texte du 7 décembre 1676 pourtant reproduit dans plusieurs publications de la seconde moitié du XX^e siècle, comme ci-après...

S. D.

ouvrage qu'il prepare sur toutes les statues anti-ques que l'on voit à Rome, qu'il a déjà fait graver, & dont il a fait l'anatomie qui est une chose fort singuliere. Ce second volume joint à l'histoire particuliere des Peintres de l'Escole de Bologne que M. le Comte de Malvagia, Chanoine de la Cathedrale de cette Ville doit nous donner dans peu de temps fait esperer beaucoup de belles choses à ceux qui aiment l'art de la Peinture, qui a toujours esté les delices des esprits bienfaits.

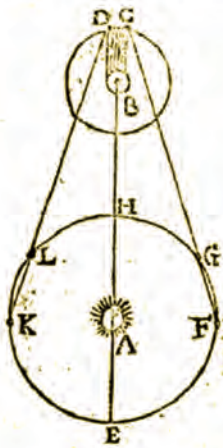
*CATALOGVS IMPRESSORVM LIBRORVM
Bibliothecæ Bodleianæ in Academia Oxoniensi, Oxon-
niæ à Theatro Sheldoniano. In fol.*

LE Présent que le fameux Bodley fit de ses Livres à l'Université d'Oxford a esté augmenté de ceux qu'on trouve dans ce gros volume depuis l'an 1605. que parut le premier catalogue qu'on en donna au public.

**DÉMONSTRATION TOUCHANT LE
mouvement de la lumière trouvé par M. Römer de
l'Academie Royale des Sciences.**

L y a long-temps que les Philosophes sont en peine de decider par quelque experience, si l'action de la lumière se porte dans un instant à quelque distance que ce soit, ou si elle demande du temps. Mr Römer de l'Academie Royale des Sciences s'est avisé d'un moyen tiré des observations du premier satelite de Jupiter, par lequel il démontre que pour une distance d'environ 3000 lieues, telle qu'est à peu près la grandeur du diametre de la terre, la lumière n'a pas besoin d'a-

ne seconde de temps.



Soit A le Soleil, B Jupiter, C le premier Satellite qui entre dans l'ombre de Jupiter pour en sortir en D, & soit E F G H K L la Terre placée à diverses distances de Jupiter.

Or supposé que la terre estant en L vers la seconde Quadrature de Jupiter, ait veu le premier Satellite, lors de son émergence ou sortie de l'ombre en D; & qu'en suite environ 42. heures & demie après, sçavoir après une revolution de ce Satellite, la terre se trouvant en K, le voye de retour en D: Il est manifeste que si la lumiere demande du temps pour traverser l'intervalle L K, le Satellite sera veu plus tard de retour en D, qu'il n'auroit esté si la terre estoit demeurée en K, de sorte que la revolution de ce Satellite, ainsi observée par les Emersions, sera retardée d'autant de temps que la lumiere en aura employé à passer de L en K, & qu'au contraire dans l'autre Quadrature FG, où la terre en s'approchant, va au devant de la lumiere, les revolutions des Immerisions paroistront autant accourcies, que celles des Emersions avoient paru alongées. Et parce qu'en 42 heures & demy, que le Satellite employe à peu près à faire chaque revolution, la distance entre la Terre & Jupiter dans l'un & l'autre Quadrature varie tout au moins de 210. diametres de la

Terre, il s'ensuit que si pour la valeur de chaque diamètre de la Terre, il falloit une seconde de temps, la lumière employeroit $3\frac{1}{2}$ min. pour chacun des intervalles GF, KL, ce qui causeroit une différence de près d'un demy quart d'heure entre deux revolutions du premier Satellite, dont l'une auroit esté observée en FG, & l'autre en KL, au lieu qu'on n'y remarque aucune différence sensible.

Il ne s'ensuit pas pourtant que la lumière ne demande aucun temps : car apres avoir examiné la chose de plus près, il a trouvé que ce qui n'étoit pas sensible en deux revolutions, devenoit tres-considerable à l'égard de plusieurs prises ensemble, & que par exemple 40 revolutions observées du costé F, estoient sensiblement plus courtes, que 40. autres observées de l'autre côté en quelque endroit du Zodiaque que Jupiter se soit rencontré; & ce à raison de 22. pour tout l'intervalle H E, qui est le double de celuy qu'il y a d'icy au soleil.

La necessité de cette nouvelle Equation du retardement de la lumière, est établie par toutes les observations qui ont esté faites à l'Academie Royale, & à l'Observatoire depuis 8. ans, & nouvellement elle a esté confirmée par l'Emersion du premier Satellite observée à Paris le 9. Novembre dernier à 5 h. 35. 45." du soir, 10. minutes plus tard qu'on ne l'eût deü attendre, en la déduisant de celles qui avoient esté observées au mois d'Aoust, lors que la terre estoit beaucoup plus proche de Jupiter; ce que Mr Römer avoit predict à l'Acade-

mie dès le commencement de Septembre.

Mais pour oster tout lieu de douter que cette inégalité soit causée par le retardement de la lumière, il demontre qu'elle ne peut venir d'aucune excentricité, ou autre cause de celles qu'on apporte ordinairement, pour expliquer les irregularitez de la Lune & des autres Planetes : bien que néanmoins il se soit aperçu que le premier Satellite de Jupiter estoit excentrique, & que dailleurs ses revolutions estoient avancées ou retardées à mesure que Jupiter s'approchoit ou s'éloignoit du soleil, & même que les revolutions du premier Mobile estoient inégales; sans toutesfois que ces trois dernieres causes d'inégalité empêchent que la premiere ne soit manifeste.

PHARMACOPŒE ROYALE

Galenique & chymique, par Moysè Charas Apoteker & Astronome du Roy en son Jardin Royal des Planets, 1644.

A Paris chez l'Auteur, rue des Boucheries,

Entre-bourg S. Germain, aux Vipères d'or.

L'Abondance & la bonté des remèdes dont on se sert à remplir son hyre peut rendre aux étrangers avec usure ce que nous avons emprunté de leurs mariages, si en ayant point eu jusqu'à présent en France sur cette matière d'une aussi grande étendue que celle cy. On comprend l'uno & l'autre Pharmacie dont l'union est si nécessaire pour le choix, la préparation d'usage & la mixture des médicaments, sans suivre le traitement des anciens, &

Extraits du *Journal des Sçavans*.

Source : gallica.bnf.fr - Bibliothèque nationale de France

Onde et/ou particule, quelle est la nature de la lumière ?

Claude Fabre

Professeur
Université Pierre et Marie Curie - Laboratoire Kastler Brossel

La lumière se manifeste dans une grande quantité de phénomènes que l'homme a cherché depuis toujours à comprendre, c'est-à-dire à insérer dans un cadre rationnel et unifié. Ceux-ci sont multiformes et souvent complexes, et en déduire des informations sur la nature exacte de la lumière n'est pas une tâche aisée. Dans ce bref exposé, nous illustrerons notre propos à l'aide de deux phénomènes simples et familiers :

– lorsqu'on envoie un faisceau lumineux sur une surface de verre (figure 1), on observe qu'il se divise en un faisceau réfléchi **R** et un faisceau transmis **T**;

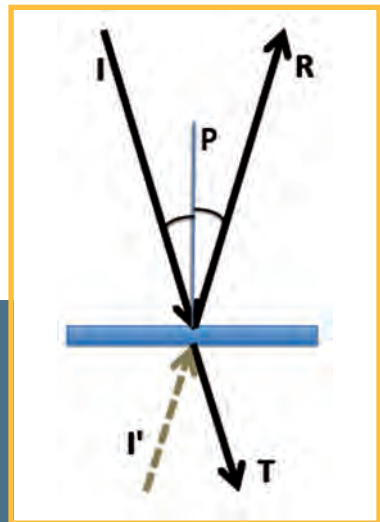
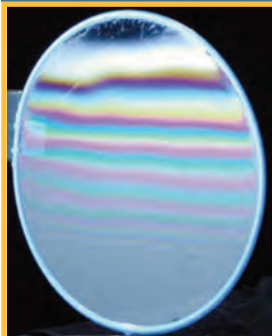


Figure 1

Faisceaux incident **I**, réfléchi **R** et transmis **T** par une surface de verre (on remarque que le faisceau incident selon **I'** aboutit aussi par réflexion au même faisceau **T** et par transmission au même faisceau **R**).



– lorsqu'on observe un film d'eau savonneuse éclairé en lumière blanche (figure 2), on voit sur la lumière réfléchie des bandes multicolores, appelées *irisations*.

Figure 2

Irisations apparaissant dans la lumière réfléchie par un film d'eau savonneuse (l'épaisseur du film est plus faible en haut de l'image).

Pour mieux caractériser ces phénomènes, il faut faire des mesures précises et dans des conditions bien contrôlées :

– dans le premier cas, on constate que le faisceau **I**, perpendiculaire **P** à la surface, et le faisceau réfléchi **R** sont dans un même plan et que **P** est la bissectrice de l'angle entre les faisceaux **I** et **R**. Cette loi mathématique de la réflexion est connue depuis l'Antiquité.

– dans le second cas, on remplace d'abord la surface de verre avec ses deux parois qui réfléchissent la lumière, peu contrôlable, par le film d'eau savonneuse (figure 3a). On observe des anneaux irisés, dont on peut mesurer les diamètres. C'est ce qu'a fait Newton au XVII^e siècle. Il en a déduit que quelque chose variait de manière périodique dans la propagation de la lumière, avec une période de 0,28 micromètre pour la lumière jaune.

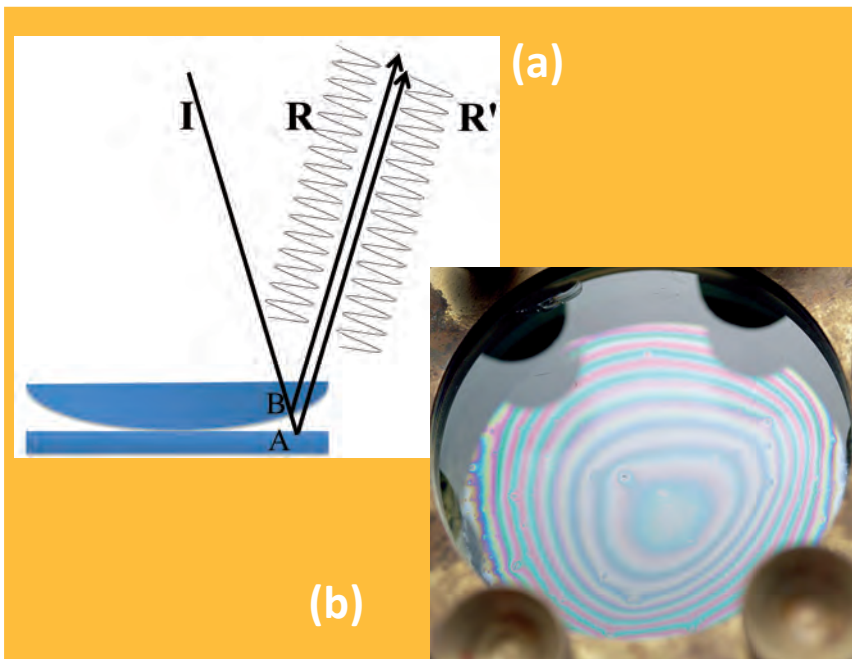


Figure 3

- (a) Un rayon lumineux incident **I** sur l'assemblage d'une lame de verre et d'une lentille convexe, en se réfléchissant en **A** et **B**, produit deux faisceaux **R** et **R'** dont les ondes interfèrent constructivement ou destructivement selon la position relative des sommets et des creux des deux ondes ;
- (b) lorsque la lumière incidente est blanche, on observe des anneaux irisés centrés sur le point de contact entre la lentille et la lame.

Cette phase de *mathématisation* des observations est essentielle pour le physicien : elle lui permet d'obtenir des lois physiques sous une forme mathématique à partir de laquelle il fera des prédictions et imaginera des applications. Mais bien souvent il cherche à aller au-delà des équations, et à imaginer des *images physiques* simples de ce qui se passe, basées sur des analogies avec d'autres phénomènes physiques :

– Ainsi, la réflexion d'une balle qui rebondit sur une surface dure, ou bien celle des vagues de la mer qui arrivent obliquement sur une jetée, obéissent à la même loi que la lumière. C'est ce qui a amené les physiciens au XVIII^e siècle à considérer la lumière soit comme un flux de petites particules se propageant dans le vide, soit comme une onde d'un milieu occupant tout l'espace. Newton conjecturait par exemple que la lumière était formée de petites particules qui excitent des ondes dans la matière, un peu à la manière d'un caillou lancé dans une mare.

– Les irisations observées sur la figure 3a peuvent s'expliquer par une image ondulatoire de la lumière : l'onde lumineuse incidente, en se réfléchissant en A et B sur les deux surfaces de verre, donne naissance à deux ondes réfléchies dont les ondulations sont décalées l'une par rapport à l'autre. Ces ondes se renforcent quand les sommets de leurs ondulations coïncident, et s'annulent quand le sommet de l'une tombe dans le creux de l'autre. Le caractère constructif ou destructif de ce phénomène d'interférence dépend de la longueur d'onde de l'ondulation, c'est-à-dire de la couleur de la lumière, d'où les irisations. Par contre, il n'y a pas d'explication *corpusculaire* de ce phénomène d'interférence. C'est une des raisons pour lesquelles la conception ondulatoire de la lumière a fini par s'imposer.

Au XIX^e siècle, la lumière apparaît incontestablement comme une onde, mais une onde de quoi ? La réponse à cette question est venue d'un tout autre domaine de la physique, celui des phénomènes électriques et magnétiques, où s'accumulaient observations expérimentales et lois physiques mathématiques empiriques. Peu à peu émerge un concept révolutionnaire permettant de se faire des images simples et claires de ces phénomènes : celui de champ, grandeur physique qui existe en tout point de l'espace en dehors de tout support matériel et qui caractérise en ce point l'effet électrique ou magnétique. James Clerk Maxwell parvient à déterminer les équations à laquelle obéissent ces champs. Il trouve comme solution à ses équations des ondes de champ électrique et magnétique, dont la vitesse de propagation s'avère très proche de celle de la lumière, ce qui le conduit à affirmer, avec une modestie très anglo-saxonne : « *Nous pouvons difficilement éviter l'inférence que la lumière consiste en des ondulations transverses du même milieu qui est la cause des phénomènes électriques et magnétiques.* »

À la fin du XIX^e siècle, l'hypothèse que la lumière est une onde électromagnétique est solidement étayée, car elle permet d'expliquer un nombre extrêmement grand de phénomènes lumineux. Quelques phénomènes peinent cependant à rentrer dans ce cadre : c'est le cas en particulier de la détermination de la couleur de la lumière émise par les corps chauffés. Pour rendre compte de la loi empirique donnant cette couleur, Max Planck est amené à supposer que les échanges d'énergie entre le corps chauffé et la lumière se font par paquets élémentaires, qu'il appelle *quanta*. Einstein va plus loin et montre que la lumière émise par le corps chauffé se comporte comme un ensemble de particules ponctuelles, appelées plus tard *photons*. Il émet l'hypothèse que « l'énergie de la lumière émise par une source ponctuelle n'est pas continûment distribuée dans l'espace, mais consiste en un nombre fini de quanta d'énergie qui sont localisés en des points de l'espace, qui se déplacent sans se diviser, et qui ne peuvent être produits et absorbés qu'en unités complètes ».

Comment rendre cette nouvelle conception corpusculaire de la lumière compatible avec les phénomènes d'interférences lumineuses, qui sont en revanche parfaitement explicables en termes d'ondes électromagnétiques ? Il faut pour cela faire coexister images corpusculaire et ondulatoire : on montre que le lien qui existe entre le photon et l'onde électromagnétique est en fait un lien probabiliste :

– Revenons à l'expérience simple de la figure 1 où le faisceau incident se divise en un faisceau réfléchi et un faisceau transmis et baissions fortement l'intensité incidente, à un point tel que les photons arrivent dans le faisceau **I** un par un sur la surface : le photon, qui ne peut pas se diviser, ne peut à la fois être partiellement réfléchi et partiellement transmis. Il *choisit* aléatoirement entre ces deux possibilités exclusives, et la physique est impuissante à prédire pour un photon donné s'il va être transmis ou réfléchi. Par contre les physiciens peuvent déterminer la probabilité de transmission ou de réflexion pour le photon : elle coïncide avec les coefficients de réflexion et de transmission calculés grâce aux équations de Maxwell pour une onde électromagnétique incidente. En outre, les directions de réflexion et de transmission du photon sont celles des ondes réfléchie (**faisceau R**) et transmise (**faisceau T**): l'onde *guide* en quelque sorte le photon.

– Considérons à nouveau les expériences d'interférence de la figure 3, et envoyons un photon incident unique sur les deux surfaces de verre : on constate que lorsque le photon arrive à certain endroits du dispositif (là où se produit une interférence destructive entre les deux ondes réfléchies), il a une probabilité pratiquement nulle d'être réfléchi, alors qu'on sait qu'il a une forte probabilité d'être réfléchi par une seule des surfaces :

on est amené à penser que, si le photon unique est sensible au phénomène d'interférence, c'est parce qu'il est réfléchi à la fois par les deux surfaces, et que les probabilités d'être réfléchi par chacune d'elles interfèrent destructivement. Si on répète une expérience d'interférence avec un photon unique un grand nombre de fois, on verra les photons réfléchis s'accumuler dans les parties brillantes des franges d'interférence, alors qu'ils seront rares dans les parties sombres (figure 4).

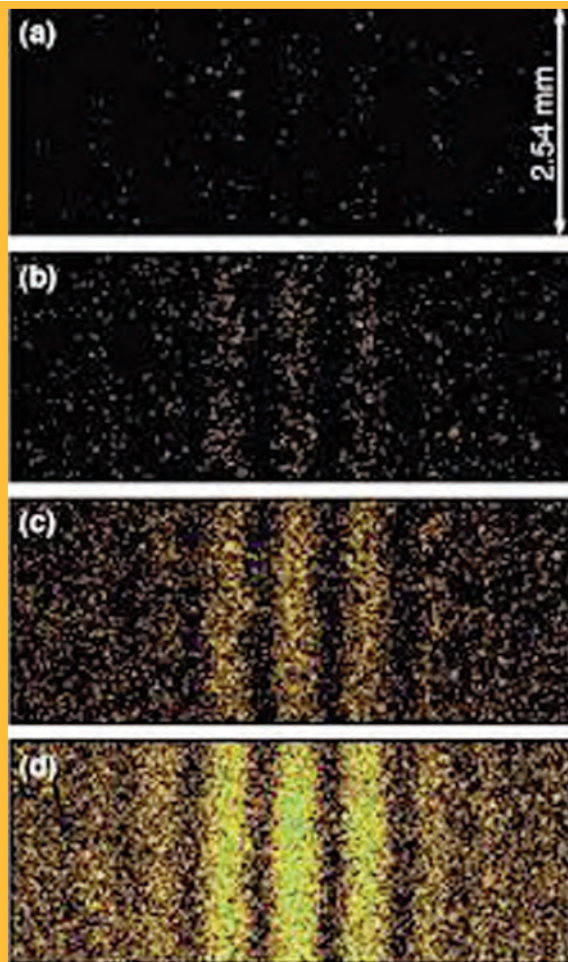


Figure 4

Si on utilise des photons arrivant un par un dans un dispositif interférentiel, on retrouve les franges d'interférence par accumulation progressive des photons – temps de pose de (a) à (d): 10 s, 100 s, 500 s et 2000 s.

© LPQM ENS Cachan

Revenons maintenant à la figure 1. Il existe en fait une autre direction **I'** pour la lumière incidente qui aboutit par réflexion et transmission aux mêmes faisceaux **T** et **R** que ceux que nous avons déjà considérés. Envoyons simultanément un photon isolé dans la direction **I** et un photon isolé dans la direction **I'** : si les photons se comportent comme des particules classiques ils ont une probabilité non nulle d'être tous deux transmis ou bien tous deux réfléchis par la surface et donc de sortir l'un sur **R** et l'autre sur **T**. Or l'expérience réalisée en 1985 par Hong, Ou et Mandel montre que les deux photons se regroupent et se retrouvent tous les deux soit sur **R** soit sur **T**. Il faut donc admettre que la lumière ne se comporte pas dans ce dispositif comme une assemblée de particules classiques guidées par l'onde électromagnétique et qu'elle n'est ni onde classique, ni particule classique, mais un objet quantique à part entière, sans équivalent dans la physique classique.

Les physiciens du XXI^e siècle étudient des phénomènes lumineux de plus en plus *non classiques*, que les équations mathématiques de la théorie quantique de la lumière permettent de prédire avec une grande précision. À la question *Quelle est la nature de la lumière ?* on peut donc faire la réponse *mathématique* suivante : *c'est un objet physique qui obéit aux équations de la théorie quantique des champs*. Mais, nous l'avons vu, au delà des équations, il y a les représentations physiques que les physiciens élaborent sur la nature de la lumière. Elles sont souvent simplificatrices, mais elles leur servent d'aide intuitive pour imaginer des phénomènes lumineux quantiques toujours plus étranges.

C. F.

Pour en savoir plus :

Sous la direction de Gilbert PIETRYK, *Panorama de la physique*, Belin (2007)

Claude FABRE, Charles ANTOINE, Nicolas TREPS, *Introduction à la physique moderne : relativité et physique quantique*, Dunod (2015)

La lumière dans tous ses états, Dossier Pour La Science (octobre/décembre 2006)

La lumière pour mieux observer et comprendre l'Univers

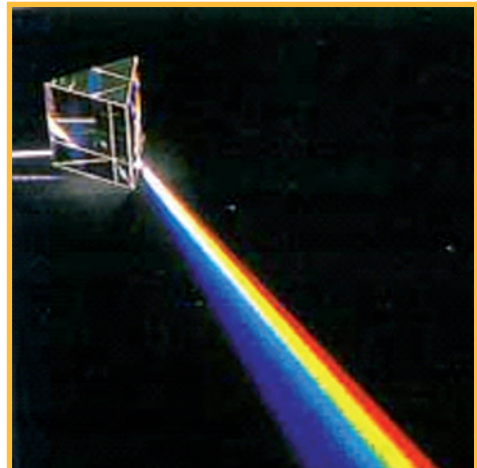
Roger Ferlet

Directeur de recherche émérite au CNRS
Institut d'Astrophysique de Paris

*J'ai réfracté le rayon coloré avec des prismes et reflété avec des corps qui, à la lumière, étaient de nuances différentes... Et pourtant, je n'ai jamais pu en obtenir de nouvelles couleurs... Cette découverte est à mon jugement la plus étrange sinon la plus importante révélation faite à ce jour des opérations de la Nature.
Isaac Newton (1666).*

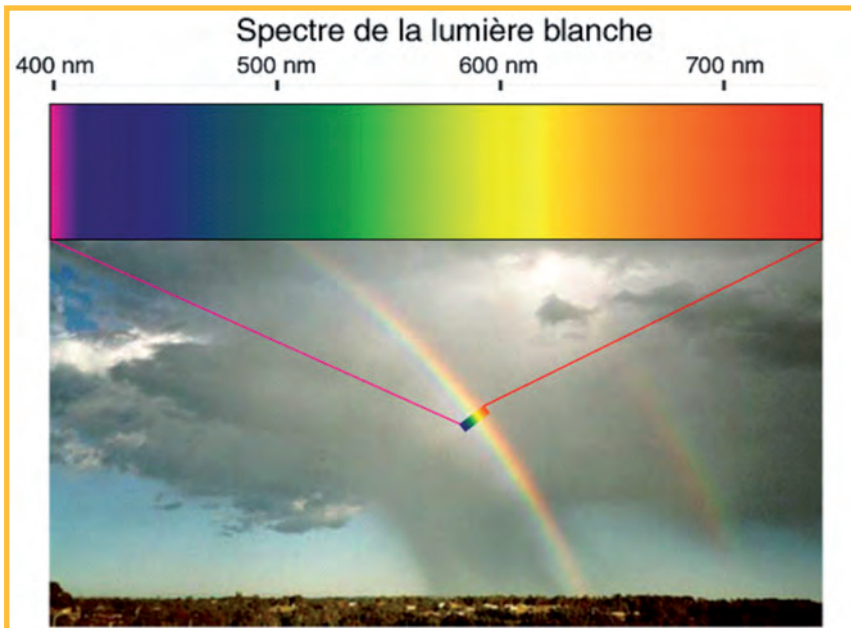
Newton interpréta ce phénomène et conclut que la lumière blanche est composée de plusieurs couleurs que notre œil ne sépare pas. L'arc-en-ciel en est un exemple : les gouttes de pluie agissent comme autant de prismes et décomposent la lumière blanche du Soleil dans ses différentes couleurs – violet, indigo, bleu, vert, jaune, orange, rouge – toujours dans cet ordre. C'est ce qu'on appelle le *spectre visible* du Soleil, résultant du phénomène de dispersion (décomposition) de la lumière blanche. Polychromatique, la lumière blanche du Soleil est en réalité la superposition de très nombreuses lumières monochromatiques.

Du simple prisme utilisé par Newton à l'instrument sophistiqué de la fin du XIX^e siècle connu sous le nom de *spectroscope*, plusieurs savants ont contribué peu à peu à un dispositif qui a révolutionné l'approche de la matière. On peut citer le chimiste britannique William Wollaston qui nota en 1802 que le spectre visible du Soleil était sillonné par sept raies sombres, puis l'opticien bavarois Joseph



von Fraunhofer qui améliora considérablement le montage et en 1814 répertoria quatre cent soixante-seize raies, ou encore le physicien français Antoine Masson qui au tout début des années 1850 en fera un instrument compact. Aujourd'hui, on recense quelques dizaines de milliers de raies : *le spectre de Fraunhofer*.

Newton considérait la lumière comme un flot de petites particules, et au prix de complications considérables, il arrivait à rendre compte du phénomène de dispersion de la lumière blanche au travers d'un prisme. Il avait discuté deux lois possibles : l'une, quadratique, élaborée dans le cadre de la théorie de la gravitation, l'autre, linéaire, formulée en élaborant une échelle quantitative des couleurs. Quantitativement, ces deux lois différaient suffisamment peu pour que leurs différences soient détectables avec les méthodes de mesure que Newton avaient à sa disposition. Bien plus tard, Newton s'appuya sur l'analogie avec l'harmonie musicale et adopta finalement la loi linéaire de dispersion. Il conclut que tout système à réfraction ou lunette astronomique présente une dispersion de la lumière, ou aberration chromatique, qu'il pensait impossible de corriger.

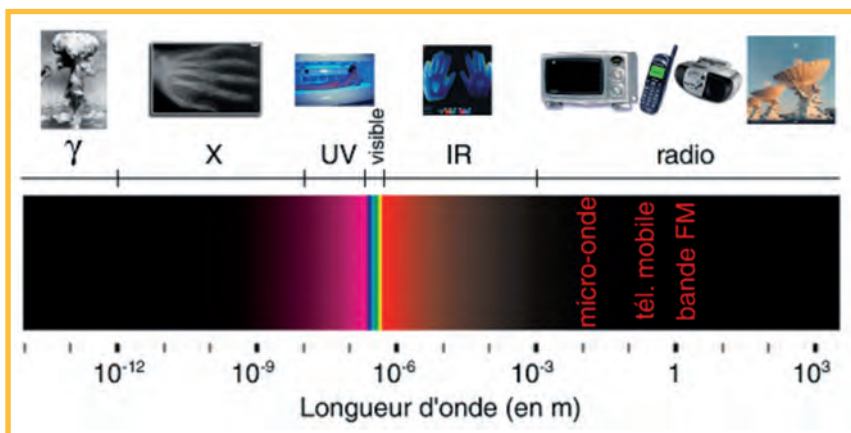


Il contourna le problème en proposant un télescope à réflexion par miroir concave (naturellement dépourvu d'aberration chromatique), connu sous le nom de *télescope de Newton*. En 1747, Euler critiqua ces vues de Newton et proposa une loi de type logarithmique pour rendre compte du phénomène de dispersion. S'appuyant sur ces idées, le

Britannique John Dollond réussit à construire des systèmes achromatiques et publia sa découverte en 1758. Dans son travail consacré aux lunettes achromatiques, d'Alembert exprima des doutes quant aux thèses de Newton et Euler, soulevant ainsi des questions épistémologiques liées aux divers choix possibles d'une loi et de son caractère nécessaire ou contingent.

En 1800, l'astronome germano-britannique William Herschel découvrit une nouvelle *couleur* située hors du spectre visible, au-delà du rouge. Il voulait mesurer la quantité de chaleur produite par chaque couleur du spectre visible. Il promena un thermomètre le long d'un spectre produit par un prisme et nota que la température augmentait en allant du bleu vers le rouge. En plaçant le thermomètre après le rouge (là où l'œil ne voyait plus rien), la température augmentait encore ! Herschel interpréta ce phénomène et conclut qu'il devait exister un autre type de lumière invisible à l'œil au-delà du rouge. C'est l'infrarouge.

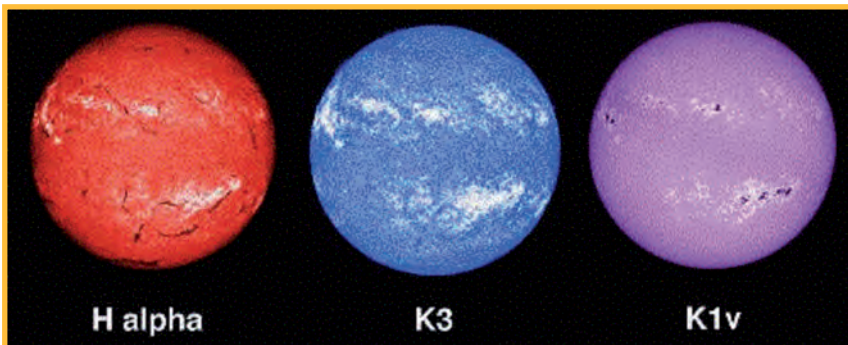
On sait maintenant que le spectre s'étend très loin de chaque côté du spectre visible. C'est ce qu'on appelle le *spectre électromagnétique*.



Dans le cadre de l'interprétation ondulatoire de la lumière (voir article de Claude Fabre dans ce même opuscul), chaque couleur est caractérisée par sa longueur d'onde. L'œil humain n'est capable de percevoir que les radiations lumineuses dont la longueur d'onde est comprise dans la bande spectrale entre 400 nm (violet) et 800 nm (rouge). Les autres types d'ondes électromagnétiques ont une longueur d'onde inférieure à 400 nm – on trouve successivement l'ultraviolet (UV), les rayons X et les rayons gamma –, ou supérieure à 800 nm – l'infrarouge (IR), le millimétrique puis les ondes radio. L'observation de ces domaines spectraux requiert des dispositifs de détection radicalement différents.

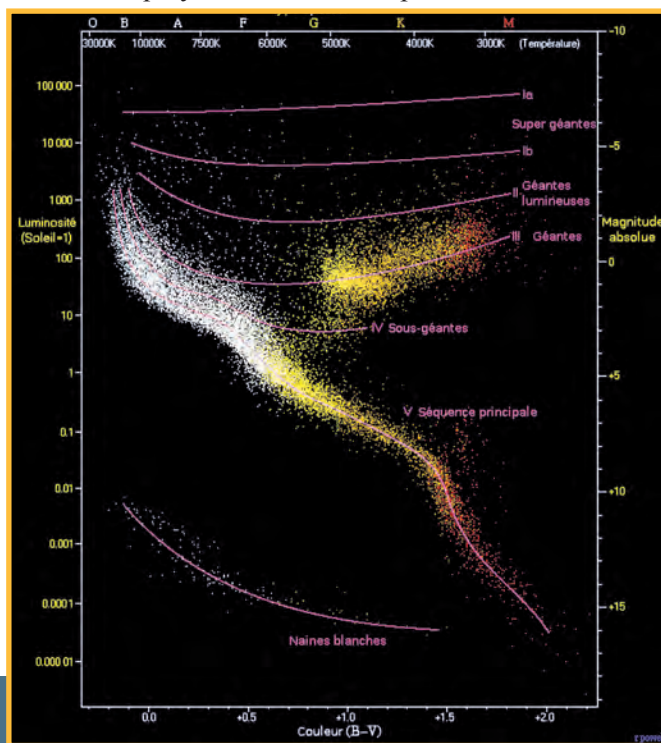
À chaque fois que les progrès techniques permettent l'ouverture d'une nouvelle fenêtre spectrale, on découvre de nouvelles facettes de notre Univers, des phénomènes surprenants, souvent complètement inattendus, provoquant parfois une révolution de la science physique. Par ailleurs, si les domaines visible et radio peuvent être observés depuis le sol, il a fallu attendre l'avènement des techniques spatiales pour observer tous les autres rayonnements qui ne traversent pas l'atmosphère de la Terre.

Ce n'est pas avant 1859 que le physicien allemand Gustav Kirchhoff donne la clé de l'énigme des raies sombres dans le spectre solaire. Il fut aidé en cela par le brûleur de son compatriote Robert Bunsen, qui donnait une flamme presque transparente permettant de mieux observer le spectre des substances étudiées. Chaque raie est due à la présence d'un élément chimique donné. Quand un gaz est interposé entre la source et le spectroscopie, les raies apparaissent sombres – en absorption – ou brillantes – en émission – selon que la température du gaz est plus basse ou plus élevée que celle de la source. L'ajout au spectroscopie d'une échelle micrométrique et d'un spectre de référence va alors permettre la détermination directe de la longueur d'onde. Ainsi, le spectroscopie donne le moyen de déterminer de façon aisée non seulement la composition des substances chimiques, mais aussi celle du Soleil, contrairement à ce que disait Auguste Comte en 1835 dans son *Cours de philosophie positive* : « la composition chimique du Soleil restera à jamais hors de portée de la connaissance humaine ! » La spectroscopie allait révolutionner l'analyse chimique avec la découverte d'éléments nouveaux, ainsi que l'astronomie avec la naissance de l'astrophysique.



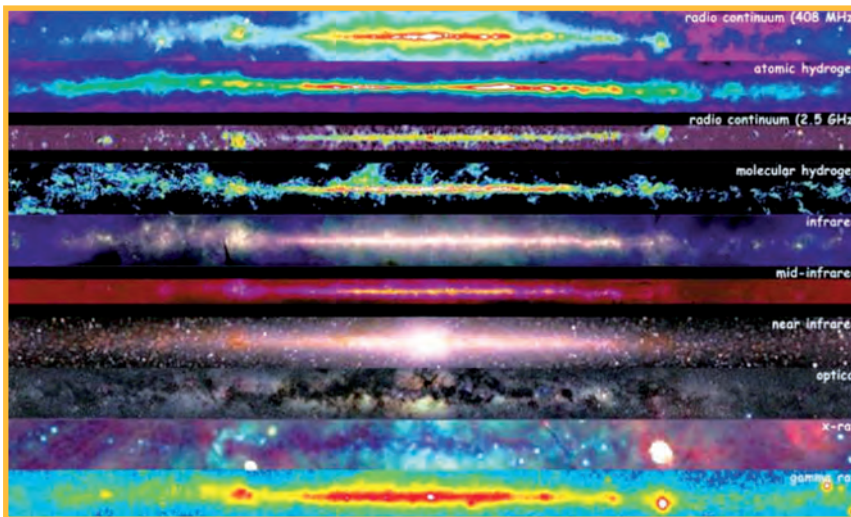
Images du Soleil à différentes longueurs d'onde :
raie H alpha à 656,30 nm et raie K du calcium à 393,35 nm
(K3 dans le minimum de la raie ; K1v dans l'aile de la raie à 393,10 nm).
La morphologie des structures dépend intimement
de la longueur d'onde d'observation.

La science astronomique permet à l'Homme de se situer dans l'Univers ; elle tente aussi de construire l'histoire de nos origines et de notre futur ; et tout cela principalement à travers l'étude de la lumière qui nous vient du ciel. Lien presque unique entre notre planète et le reste de l'Univers, la lumière porte en elle la marque distinctive de la composition chimique du corps qui l'émet. Dès la fin du XIX^e siècle, la spectroscopie stellaire a révélé que la constitution des étoiles devait être analogue à celle du Soleil, et a permis de relier la présence de telle ou telle raie de tel ou tel élément chimique aux conditions physiques (température, pression) à l'intérieur de l'étoile étudiée, pour aboutir vers 1910 à une classification des étoiles dans un diagramme *type spectral–luminosité* qui s'appellera diagramme de *Hertzsprung–Russell* (ci-dessous), du nom des deux astronomes danois et américain qui y ont travaillé indépendamment.



Ce diagramme de *Hertzsprung–Russell* représente soit la luminosité en fonction de la température (ou type spectral), soit la magnitude absolue en fonction de l'indice de couleur (ce qui découle immédiatement d'observations photométriques), les étoiles ne se situent pas n'importe où, mais très majoritairement le long d'une diagonale appelée séquence principale. Elles y passent en effet environ 90 % de leur vie en évoluant très peu, brûlant l'hydrogène en leur cœur. Le Soleil (il est à la moitié de sa vie) se trouve à la luminosité 1 et à la température de surface 5780°K (5507°C).

Dans les années 1920 se posait également la question de la nature et de la distance des nébuleuses observées dans le ciel. C'est l'astronome américain Edwin Hubble qui clôtura ce débat en 1926, en démontrant qu'il s'agissait en réalité d'univers-îles, de galaxies extérieures à la nôtre. Observant en outre que leurs spectres (raies de l'hydrogène ou d'autres éléments chimiques) présentaient un décalage systématique vers le rouge, et que ce décalage était d'autant plus grand que l'objet visé était plus loin, Hubble interpréta cela avec l'effet Doppler-Fizeau et publia en 1929 ce qui deviendra la *loi de Hubble*. C'était la première preuve de l'expansion de l'Univers, un phénomène générique prédit par la relativité générale, et du Big Bang, le modèle cosmologique qui en résulte le plus naturellement.



Images reconstruites de notre galaxie, la Voie lactée, en différentes bandes spectrales. Chaque longueur d'onde apporte des informations complémentaires sur sa structure ; chaque domaine spectral est la signature de conditions ou processus physiques bien identifiés (par exemple, très schématiquement, IR et radio sondent l'univers froid ; UV, X, gamma révèlent l'univers chaud et violent). Il est nécessaire d'observer les objets du ciel à toutes les longueurs d'onde si l'on veut les comprendre.

*S'il a fallu se spécialiser pour apprendre,
il faut savoir s'ouvrir pour comprendre.
(F. Kourilsky)*

R. F.

Lunettes et télescopes, des entonnoirs à lumières

Sylvain Chaty

Astrophysicien, chercheur à l'IRFU
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers, CEA

Tycho Brahe, astronome danois (1546–1601), régnera sur l'observatoire d'Uraniborg, construit sur l'île de Hven grâce à l'appui et aux dons généreux du roi Frédéric II du Danemark. Brahe n'a jamais utilisé aucune lunette astronomique, ou télescope. Il a cependant révolutionné l'observation astronomique, en s'appuyant sur des instruments de visée de grande taille (quadrants, quarts de cercles, sphères armillaires, etc, cf. figure 1), permettant de repérer la position des astres (Lune, planète, étoiles...) à la minute d'arc près, soit un trentième de la taille apparente de la Lune. Il effectuera ainsi un nombre impressionnant d'observations d'étoiles et de planètes, qui seront utilisées, après sa mort, par l'astronome bavarois Johannes Kepler (1571–1630), et en particulier celles de la planète Mars, pour en déduire, après plusieurs années de calcul intensif, trois lois fondamentales qui sont toujours aujourd'hui enseignées dans les programmes de lycée, et dont la première énonce que l'orbite des planètes est une ellipse, dont l'un des foyers est le Soleil.



Figure 1 :
Tycho Brahe dans son observatoire
d'Uraniborg (Danemark).

*Illustration du livre de Tycho Brahe,
Astronomiae instauratae mechanica,
1598.*

La révélation galiléenne

Au cours de l'hiver 1609 survient la découverte de cieux accessibles à la vue de tous, grâce à une invention néerlandaise : la lunette, qui n'est rien d'autre qu'un assemblage de deux lentilles (d'un diamètre de 3 à 7 cm) à chaque bout d'un tube en carton (de longueur de l'ordre de 1 m, cf. figure 2). C'est Galileo Galilei, astronome italien (1564–1642), qui le premier a l'idée de pointer cet instrument vers le ciel... Bien lui en a pris, car il découvre, pêle-mêle, que la Lune a des cratères, tranchant avec la sphère de cristal aristotélicienne, que le Soleil a des taches, ce qui ne devrait pas être l'apanage d'un astre parfait, que Vénus présente des phases (comme la Lune), indiquant qu'elle est située entre la Terre et le Soleil, et que la Voie lactée est constituée d'étoiles, prouvant qu'une multitude d'étoiles existe dans l'Univers. Last but not least, Galilée découvre quatre petites *étoiles* tournant autour de Jupiter, prouvant ainsi que si des satellites existent, alors les planètes peuvent orbiter autour du Soleil... démontant ainsi la thèse aristotélicienne de géocentrisme. Il s'en est

même fallu de peu que Galilée ne découvre les anneaux de Saturne, mais sa lunette *astronomique* ne permettait pas de les distinguer assez clairement. Il faut dire qu'elle était de bien petite taille, constituée de verres de plutôt mauvaise qualité, et grossissant entre trois et six fois seulement, donc beaucoup moins que la plupart des jumelles actuelles...

L'ère pionnière de la lunette

La lunette astronomique va peu à peu s'améliorer, voir son diamètre (capacité de voir des astres de plus en plus faibles) s'agrandir, et sa focale (capacité d'agrandissement des images) s'allonger... jusqu'au début du vingtième siècle, qui a vu apparaître les limites des lunettes. Le record (éphémère) est détenu par la *grande lunette astronomique* de l'exposition universelle de 1900, qui fut démontée à la fin de l'exposition, car elle ne fonctionnait pas très bien, preuve que le gigantisme



Figure 2 :

Lunette de Galilée.

Crédits : Musée Galilée à Florence, Italie

à ses limites... La lunette (conservée à l'Observatoire de Paris) avait une lentille de 1,25 m de diamètre, pour une focale de 57 m : un monstre ! La plus grande lunette en France est celle de l'Observatoire de Meudon, construite en 1891: 83 cm de diamètre, pour une focale de 16,2 m. Il n'existe aujourd'hui dans le monde qu'une seule lunette dont le diamètre dépasse 1 mètre, il s'agit de celle de l'Observatoire de Yerkes (Williams Bay dans le Wisconsin, États-Unis), construite en 1897 : son diamètre est de 1,02 m, pour une focale de 19,4 m. Sa masse très élevée, et sa longue focale, en faisaient un instrument difficile à manipuler, avec des vibrations importantes à chaque pointage de l'instrument, empêchant des observations précises...

Les débuts sans fanfare du télescope

Découvert par Newton en 1671, le télescope comporte un miroir, les rayons lumineux ne sont donc pas perturbés par la traversée de lentilles, mais le miroir doit avoir une forme parabolique, avec une précision meilleure que le $1/10^e$ de la longueur d'onde observée. Comme il était techniquement plus simple, pendant longtemps, de tailler des lentilles de lunette, en verre, plutôt que des miroirs de télescope, recouverts d'un matériau réfléchissant, le développement du télescope a été pendant longtemps délaissé, au profit de la lunette astronomique.

L'âge d'or du télescope

Il a fallu plus d'un siècle pour qu'arrivent les heures de gloire du télescope... Elles débutent avec la découverte fortuite, par le futur astronome royal britannique Sir William Herschel (1738–1822), de la planète Uranus (qu'il prend d'abord pour une comète !), le 13 mars 1781, lors d'une recherche systématique d'étoiles doubles, à l'aide du télescope achevé quelques années auparavant, et placé dans le jardin de sa maison de Bath (Royaume-Uni). Son télescope, de 17 cm de diamètre et 2,3 m de



Figure 3 :

Le télescope de Newton, construit en 1671.

Crédits : Observatoire de Greenwich

distance focale, est très similaire aux petits télescopes actuels vendus dans les magasins d'astronomie. Soixante-cinq ans plus tard, c'est au tour de la planète Neptune d'être découverte, non pas par hasard cette fois-ci, mais par prédiction... L'astronome français Urbain Le Verrier (1811–1877) avait en effet proposé, le 31 août 1846, l'existence d'une planète, afin d'expliquer les perturbations du mouvement d'Uranus. Comme les astronomes français et britanniques n'y prêtaient pas attention, Le Verrier fit appel à l'astronome prussien Johann Gottfried Galle (1812–1910) de l'Observatoire de Berlin, qui repère, le soir même de la réception de la prédiction, la planète à la position prédite, grâce à un télescope de 2 cm de diamètre !

Spectroscopie, photographie...

Au cours du vingtième siècle, les moyens d'observation s'améliorent, la photographie est de plus en plus utilisée, la lumière n'est plus seulement récoltée pour former des images, elle est aussi analysée par spectroscopie, formant ainsi un *spectre*. Dans ce spectre sont détectées des raies d'absorption ou d'émission, dont la longueur d'onde permet de reconnaître les atomes présents. En particulier, des observations de spectres de galaxies présentant des raies d'émission décalées vers les grandes longueurs d'onde (vers le rouge), seront reliées, via l'effet Doppler–Fizeau, à la vitesse d'éloignement des galaxies... C'est en analysant plusieurs de ces spectres, obtenus avec le télescope de 2,5 m du Mont Wilson, que l'astronome américain Edwin P. Hubble propose en 1929 une loi linéaire (aujourd'hui nommée loi de Hubble–Lemaître), reliant cette vitesse v à la distance des galaxies D ... Le Big Bang est né ! En 1948 entre en service le fameux télescope Hale du mont Palomar, qui, avec ses cinq mètres de diamètre, resta le plus grand instrument astronomique du monde jusqu'en 1976, détrôné par le grand télescope azimutal de Zelenchukskaya, de 6 m de diamètre.

Atmosphère, atmosphère...

Le problème principal de l'observation astronomique reste la déformation du rayon lumineux, due à la présence de l'atmosphère. Pour s'affranchir de cette déformation, il existe deux solutions. La première est d'envoyer des télescopes dans l'espace. Le plus connu est le Hubble Space Telescope (HST) de 2,4 m de diamètre, en orbite autour de la Terre, en dehors de (et donc pas gêné par) l'atmosphère ! Opérationnel depuis 1990, il a maintenant un successeur qui attend son tour (vers 2018) : le James Webb Space Telescope (JWST), 6,5 m de diamètre, sera situé au point de Lagrange L2, à 1,5 millions de km de la Terre...



Figure 4 :
Le futur télescope spatial James Webb Space Telescope *JWST*,
lancement prévu en 2018.

Crédits : NASA

Il existe bien d'autres télescopes actuellement dans l'espace, lancés par les américains, les Européens, les Asiatiques, etc. Ces télescopes observent non pas seulement dans le domaine des longueurs d'onde visibles, mais aussi en infrarouge (rayonnement découvert par Herschel !), ultra-violet, rayons X, rayons gamma, autant de domaines invisibles à l'œil nu, mais donnant accès à un univers auparavant insoupçonné ! La deuxième solution, pour corriger la déformation de la lumière, est, tout simplement, d'effacer l'atmosphère ! On parle alors d'*optique active* (déformation du miroir par des vérins, en temps réel) et d'*optique adaptative* (correction, par une combinaison de systèmes optique et informatique, de la déformation de la lumière, en utilisant une étoile de référence, ou même un faisceau laser, détectant en temps réel les perturbations subies par la lumière lors de la traversée de l'atmosphère). Ces systèmes justifient à eux-seuls de continuer à construire de grands télescopes optiques sur Terre.

La fin des grands miroirs

L'Observatoire de Paranal (Very Large Telescope, VLT) au Chili constitue actuellement la vitrine de l'astronomie optique depuis le sol et, cocorico, il s'agit d'un observatoire européen, développé par l'Observatoire européen austral (ESO), constitué de quinze Etats euro-



L'observatoire du VLT, site de Paranal, ESO Chili.

Crédits : ESO/Ciel et Espace

peens et du Brésil (en cours de ratification). Quatre télescopes constituent le VLT, chacun avec un miroir de 8 m de diamètre. Il est possible de combiner, par interférométrie, la lumière provenant de ces quatre télescopes, pour n'en faire qu'un, possédant un diamètre virtuel de 150 m ! Le polissage de chacun de ces miroirs a duré quasiment un an, s'approchant d'une parabole, avec une précision en surface de 8,5 nm. Ces miroirs de 17,5 cm d'épaisseur, proportionnellement plus fins qu'un DVD, et de masse totale 23 tonnes, sont extrêmement fragiles. Ils représentent aujourd'hui la limite en diamètre du miroir mono-bloc. À partir de maintenant, le futur appartient aux miroirs multi-segments, dont sont déjà équipés deux télescopes pionniers de 10 m de diamètre : l'américain Keck (mis en service en 1993) et l'espagnol GTC (Gran Telescopio de Canarias, inauguré en 2009).

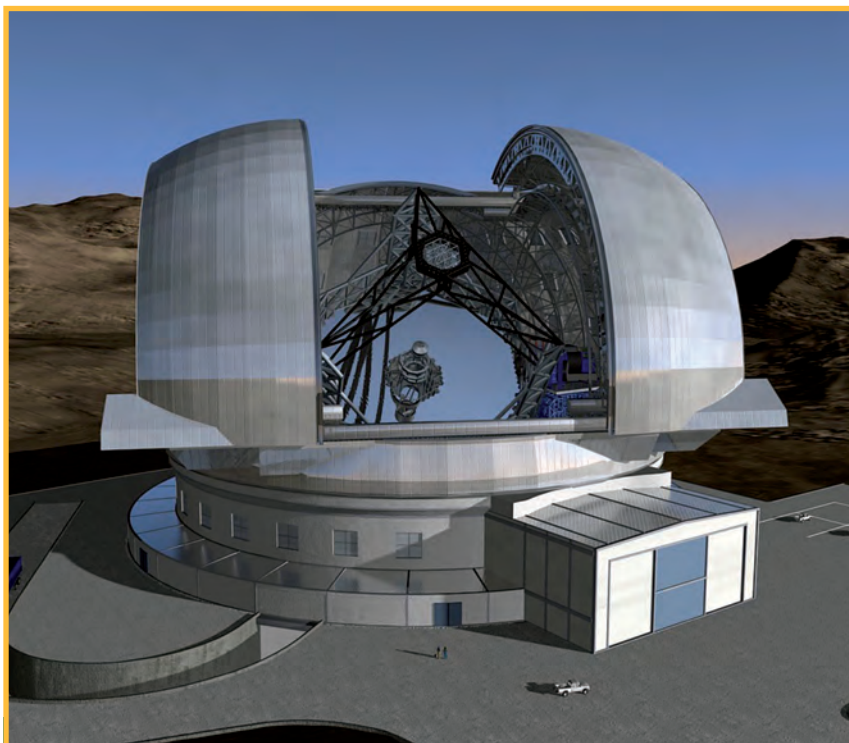
La course au gigantisme...



L'observatoire d'ALMA,
plateau de Chajnantor, Chili.

Crédits : ESO/ALMA

Des observatoires géants sont aujourd'hui développés, comme celui d'ALMA (Atacama Large Millimeter Array), à 5000 m sur le plateau de Chajnantor au Chili : 66 antennes de 12 m de diamètre, reliées par interférométrie jusqu'à 15 km de distance, pour détecter les ondes radio sub-millimétriques... Et comme l'imagination est sans borne, il existe actuellement deux projets concurrents de télescopes avec miroir géant : un projet américain de télescope de 30 m de diamètre (Thirty-Meter Telescope, TMT) constitué de 492 segments d'environ 1,45 m de diamètre, au Mauna Kea (Hawaï), et un projet européen de télescope multi-segments de 39 m de diamètre (European-Extremely Large Telescope, E-ELT), constitué de presque 800 éléments hexagonaux de 1,45 m de diamètre, sur le Cerro Armazones au Chili. Les thèmes d'étude de ces deux projets seront : la naissance de l'Univers, la formation des étoiles et des galaxies, les exoplanètes et, en particulier, la caractérisation de leur atmosphère, la matière sombre et l'énergie sombre.



Le projet d'observatoire du E-ELT,
site de Armazones, ESO Chili.

Crédits : ESO

Et après...

Il y a environ quatre cents ans, Galilée découvrait les satellites de Jupiter avec un instrument de 5 cm de diamètre, aujourd'hui, nous observons des exoplanètes et les premières galaxies de l'Univers avec des télescopes de 8 m de diamètre...

Que découvrirons-nous dans quatre cents ans, et avec quels instruments ? Observerons-nous encore depuis la Terre, depuis l'orbite terrestre, ou aurons-nous des observatoires sur la Lune, sur Mars ou ailleurs ?

Autant de questions auxquelles nous ne pouvons répondre actuellement, même avec le plus gros télescope !

S. C.

Pour en savoir plus :

ESO/Paranal :

<http://www.eso.org/public/teles-instr/vlt/>

<http://www.univ-paris-diderot.fr/sc/site.php?bc=accueil&np=pageActu&ref=7078>

ESO/E-ELT :

<http://www.eso.org/public/teles-instr/e-elt/>

http://www.eso.org/public/teles-instr/e-elt/e-elt_num/

ALMA:

<http://www.almaobservatory.org>

<http://www.leparisien.fr/sciences/video-chili-au-plus-pres-des-etoiles-29-03-2015-4647111.php>

GTC:

<http://www.gtc.iac.es>

JWST:

<http://www.jwst.nasa.gov>

Keck:

<http://www.keckobservatory.org>

TMT:

<http://www.tmt.org>

Polarisation de la lumière et optique cristalline

Bernard Maitte

Professeur émérite à l'Université de Lille 1, Sciences et Technologies

1690, Christiaan Huygens publie son *Traité de la lumière*. Il y explique par une théorie géométrique l'émission, la propagation rectiligne, la réflexion, la réfraction de la lumière : celle-ci serait constituée par des ondes se propageant dans un milieu très subtil emplissant l'espace, *l'éther*. La réfraction serait due à un ralentissement des ondes passant, par exemple, de l'air à l'eau. Huygens rend compte aussi d'une curieuse propriété que présentent les cristaux de calcite : ils dédoublent les images sur lesquelles ils sont posés (figure 1). L'une suit les lois de la réfraction, est dite *ordinaire*, l'autre, *extraordinaire*, non. Cette *biréfringence*, Huygens le mesure très précisément, est liée aux formes géométriques du cristal.

Comment expliquer cette relation ? Huygens infère que toutes les propriétés physiques symétriques de la calcite sont dues à l'empilement de petites molécules invisibles, empilées symétriquement. Mieux, de sa conjecture, il infère quelles biréfringences doit avoir le cristal dans telle ou telle direction, déduit que le quartz et le mica doivent eux aussi dédoubler les images, conséquences qui n'avaient jamais été observées et qu'il met en évidence. Sa théorie est explicative et prédictive. Un fait intrigue cependant Huygens : quand il superpose deux calcites, la première transmet deux rayons lumineux, la seconde, qui les reçoit, en transmet quatre. Mais ces quatre rayons n'ont pas la même intensité. Plus, quand il tourne la seconde calcite dans

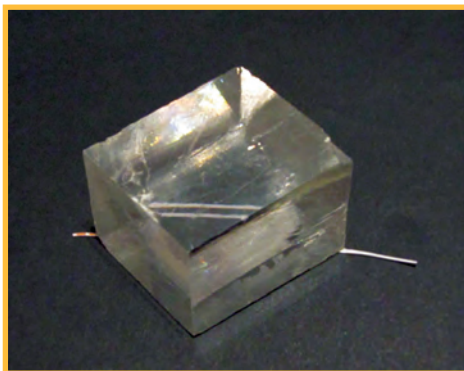


Figure 1 : Biréfringence de la calcite.

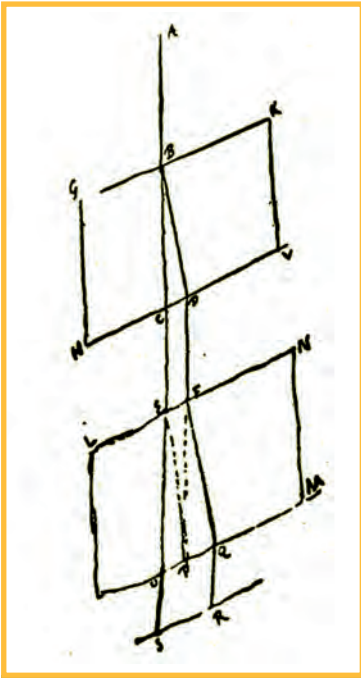


Figure 2 :
les doutes de Christiaan Huygens,
une seconde calcite peut ne pas
dédoubler les rayons incidents.

son plan, les intensités des rayons varient et peuvent devenir nulles : deux fois par tour, deux des rayons s'éteignent (figure 2). «*Quant à expliquer ce fait, je n'ai rien trouvé qui me satisfasse*» écrit Huygens.

1703, après la mort de Huygens, Isaac Newton publie son *Optique*. Il y accumule expériences et démonstrations et fait de la lumière des corpuscules qui se propagent dans un espace vide. Réflexion, réfraction, dispersion... sont expliquées par l'action de forces qui agissent sur des masses. Comme il l'avait fait pour justifier la trajectoire de la Lune autour de la Terre, l'analyse mathématique permet à Newton de préciser les trajectoires que suit la lumière : le calcul lui montre que, contrairement à ce qu'avait déduit la théorie ondulatoire, la réfraction lors du passage air-eau correspond à une augmentation de vitesse dans ce milieu. Ce n'est pas la seule divergence qui apparaît : au sujet de la calcite, Newton

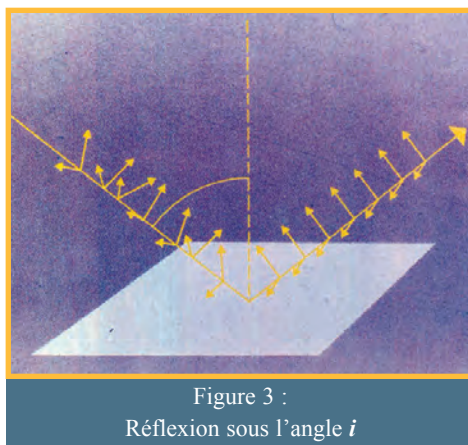
cite la phrase où Huygens exprime son insatisfaction et déclare fausses toutes les mesures effectuées par le savant néerlandais. Pour sa part, il croit pouvoir dire, sans le justifier, que l'extinction des rayons pourrait être due à ce que les corpuscules lumineux possèdent des formes géométriques. Le succès de la gravitation universelle fait que cette divergence sombre dans l'oubli et que les positions de Newton triomphent.

1802, un Britannique, William Hyde Wollaston, reprend les expériences sur la calcite. Extrêmement surpris, il constate que toutes les mesures de Huygens sont justes, celles de Newton fausses. En France, René Just Haüy confirme ces conclusions. Les physiiciens s'intéressent à nouveau à la biréfringence. En 1808, l'Académie des sciences offre un prix à qui en donnera une théorie mathématique vérifiée par l'expérience. Étienne Louis Malus reprend toutes les expériences, en ajoute d'autres. C'est surtout l'extinction des rayons par la seconde calcite qui retient son attention. Il en multiplie les variantes, en vient à regarder la lumière réfléchiée par les vitres du Palais du Luxembourg au travers d'une calcite :

le rayon est dédoublé, mais, lorsqu'il tourne le cristal, il a la grande surprise de voir l'un des rayons s'éteindre, réapparaître quand le second faiblit. La même propriété se manifeste donc lorsqu'une calcite reçoit de la lumière réfléchi ou de la lumière doublement réfractée. Personne n'avait constaté qu'une simple réflexion modifie les caractéristiques de la lumière : Malus se consacre entièrement à ce fait nouveau.

Ses expériences, menées jour et nuit, alors avec des chandelles, lui apprennent qu'il faut une incidence précise i sur un miroir pour que le rayon réfléchi soit ensuite éteint par une calcite ; que s'il remplace ce cristal par un second miroir, celui-ci éteint le rayon qu'il reçoit si l'angle d'incidence est i et que son plan d'incidence est perpendiculaire à celui du premier miroir. Voici mises en évidence des régularités géométriques qui doivent avoir une raison géométrique, pense Malus : il reprend les conjectures de Newton et attribue aux corpuscules de lumière des formes, explique la réflexion par l'action de forces.

Une réflexion sous l'angle i laisserait passer ceux des corpuscules qui auraient une certaine orientation, une seconde réflexion sur un miroir identique aurait la même propriété (figure 3). Si les plans d'incidence sont perpendiculaires, le second miroir ne pourrait laisser passer que des corpuscules à orientations perpendiculaires



à ceux que laisse passer le premier... qu'il ne reçoit pas : il y a extinction. Une explication analogue est donnée pour la double réfraction, avec deux types de forces orientant les corpuscules. Malus décrit donc le phénomène en ayant recours à des corpuscules lumineux qu'il caractérise par les orientations de leurs pôles par rapport aux trois axes de l'espace : il appelle *polarisation de la lumière* la nouvelle propriété observée, du nom de l'explication fournie...

Les physiciens s'intéressent à ce nouveau phénomène, multiplient les expériences. En 1811, François Arago regarde une lame mince transparente de mica au travers d'une calcite. Il voit deux images qui se recouvrent partiellement. L'une est verdâtre, l'autre pourpre, des couleurs complémentaires. Lorsqu'il modifie les orientations de la calcite ou du

mica, les couleurs des teintes varient, tout en restant complémentaires. Il appelle *polarisation colorée* ce phénomène qu'il n'explique pas. C'est Jean-Baptiste Biot qui va développer une théorie analytique des phénomènes. Ses nombreuses expériences lui apprennent que les couleurs observées sur divers cristaux varient avec la nature de ceux-ci, leurs orientations, les épaisseurs traversées (figure 4). En cinq années de dur labeur, il relie ces couleurs à celles qu'avait décrites Newton sur les bulles de savon, les explique en considérant que, non seulement un cristal oriente les pôles des corpuscules lumineux, mais les met en vibrations. Ces vibrations conserveraient les orientations, seraient perpendiculaires à la direction de propagation du rayon lumineux, sinusoïdales et pourraient ou se renforcer ou se contrarier. Toutes ces conjectures expliquent

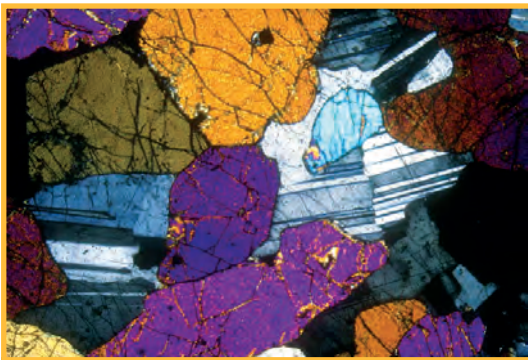


Figure 4 :
Polarisation chromatique des cristaux

les observations effectuées, mais supposent que les cristaux génèrent des forces pouvant mettre en vibration, dès leur entrée dans la lame, des corpuscules lumineux se propageant à, au moins, 300 000 km/s...

Cette invraisemblance n'échappe pas à Arago, lui qui commence à douter de l'ensemble de la physique newtonienne : si elle explique bien le

mouvement des astres et la mécanique, elle rencontre des difficultés en électricité, en magnétisme, dans les phénomènes de chaleur, où elle est obligée d'introduire des substances sans poids.

En 1814, Arago reçoit d'un ancien polytechnicien, Augustin Fresnel, un mémoire soutenant la théorie des ondes, la justifiant par le fait que la lumière, comme une onde, peut contourner les objets, peindre des couleurs à l'intérieur et à l'extérieur des ombres géométriques : c'est ce que l'on appelle *diffraction*. Arago encourage Fresnel, lit ses travaux à l'Académie des sciences : elle offre un prix à qui expliquera cet effet. Fresnel l'obtient pour un mémoire qui décrit de très nombreuses expériences exprimées mathématiquement et en rend compte par la composition d'ondes sinusoïdales. Elles expliquent propagation rectiligne, réflexion, réfraction, dispersion, biréfringence, diffraction, interférences (découvertes un peu plus tôt par Thomas Young). Pas un mot sur la polarisation de la lumière : c'est le seul effet lumineux qui résiste.

Arago et Fresnel vont travailler ensemble. Ils multiplient les expériences, découvrent de nombreuses propriétés de la polarisation, généralisent la polarisation colorée des cristaux, la relient à la symétrie du cristal, en font une méthode de détermination des espèces minérales. Le tout sans explication. Toutes les propriétés mises en évidence impliquent des caractéristiques perpendiculaires à la direction des rayons. Fresnel décide de sauter le pas. Une onde est toujours associée à des vibrations. Arago et Fresnel avaient toujours supposé que celles-ci étaient dans la direction du rayon, longitudinales, comme celles du son. Fresnel les suppose transversales (1821). Arago déclare : « *Je ne vous suis plus dans vos acrobatie.* » Pourquoi cette opposition ? Les calculs mathématiques ne sont pas modifiés (composition d'ondes sinusoidales), les vibrations se feraient dans la même direction que celle des corpuscules de Biot, ce qui traduit la symétrie du phénomène. Oui, mais en physique, des vibrations longitudinales se produisent dans des milieux fluides (l'air, l'eau, l'éther), des vibrations transversales ne peuvent se propager que dans des milieux analogues à de la gelée visqueuse. Toutes les propriétés de la lumière sont expliquées par l'hypothèse des vibrations transversales, mais il faut alors supposer que la Terre circule dans un éther visqueux sans rencontrer de résistance à son mouvement. « *C'est que tout l'éther passe librement au travers de la Terre* » ose proposer Fresnel.

Arago repense alors à la vitesse de la lumière, plus lente dans l'eau selon la théorie ondulatoire, plus rapide selon la théorie corpusculaire. Il suggère d'effectuer cette mesure, ce qui devient possible à cette époque de perfectionnement des instruments de mesure. En 1849, Léon Foucault et Hyppolyte Fizeau montrent que la lumière va plus lentement dans l'eau que dans l'air, qu'elle est donc ondulatoire. Il va falloir se pencher sur les curieuses propriétés de l'éther. Cela se fera lentement : avec la théorie électrodynamique de la lumière (1873), James Clerk Maxwell le réduira à un simple support, support qui perdra toutes ses propriétés et sera rejeté par Albert Einstein dans la théorie de la Relativité restreinte (1905), mais ceci est une autre histoire...

B. M.

Pour en savoir plus :

Bernard MAITTE, *Histoire de l'arc-en-ciel*, Paris, Seuil, Science-Ouverte, (2005)

Bernard MAITTE, *Histoire des cristaux*, Paris, Hermann, (2014)

Bernard MAITTE, *Une histoire de la lumière de Platon aux photons*, Paris, Seuil, Science-Ouverte, (2015)

Peut-on devenir invisible ?



© Photo : contrastwerkstatt/fotolia.com



VIVANT



MATIÈRE



SOCIÉTÉS



UNIVERS



NUMÉRIQUE



TERRE

lejournal.cnrs.fr

L'actualité des sciences
analysée, décryptée, commentée.



Suivez le CNRS
sur les réseaux sociaux



L'opacité ne sera bientôt plus ce qu'elle était ?

Sylvain Gigan

Professeur
Université Pierre et Marie Curie - Laboratoire Kastler Brossel

La diffusion de la lumière

Le Soleil nous éblouit lorsque nous le regardons en pleine journée, un jour de beau temps. Ses rayons, directs, découpent la forme des objets, et projettent leur ombre au sol. En dehors de la direction du Soleil, il n'y a pas de lumière venant du cosmos, ou plutôt celle des étoiles est beaucoup trop faible comparativement à celle du Soleil. Le ciel du jour devrait donc être noir comme de l'encre, pourtant nous savons bien qu'il est lumineux, de couleur bleue. La raison est connue : les particules composant l'atmosphère rediffusent vers nous la lumière du Soleil, plus efficacement dans le bas du spectre visible, le bleu.



Nuages, illustration des différents régimes de diffusion :
ballistique (soleil), diffusion simple (ciel bleu), diffusion multiple (nuages).

Un jour de nuage, par contre, non seulement le Soleil ne nous éblouit pas, mais sauf si la couche de nuage est fine, nous sommes bien en peine de le situer. La luminosité est bien là, seulement un peu moins intense, mais la lumière semble venir de partout, et du coup ne projette pas d'ombre nette. Imaginons maintenant que de sombres nuages menaçants s'avancent. Sont-ils noirs car absorbants ? Non. Ils sont noirs car épais et denses et la lumière du soleil peine à les traverser.

Les phénomènes que nous observons ainsi en levant les yeux vers le ciel, c'est le résultat de la diffusion de la lumière, phénomène quasi-omniprésent dès que la lumière se propage dans un milieu hétérogène. La lumière du soleil qui nous éblouit, c'est la lumière non-diffusée, ou lumière balistique. Le bleu du ciel, c'est la diffusion simple, où la lumière est diffusée une fois seulement avant qu'elle atteigne nos yeux. Enfin, dans les nuages, les gouttelettes d'eau en suspension sont présentes avec une densité telle que la lumière est diffusée de goutte en goutte de très nombreuses fois avant de traverser le nuage, donnant lieu au phénomène de diffusion multiple : elle perd totalement la mémoire de sa direction d'origine. On retrouve la diffusion dans de nombreuses situations, que ce soit dans un verre de lait, la neige, de la peinture sur un mur, le papier sur lequel vous lisez ce texte : tout matériau d'aspect mat et blanc est un matériau diffusant pour la lumière.

La lumière est un outil irremplaçable pour l'imagerie

Les microscopes, maintenant partout, permettent d'imager* à l'échelle de la longueur d'onde (le micron), voire très en dessous (comme l'a couronné le prix Nobel de chimie 2014). Cette échelle est critique car elle donne accès en biologie à la résolution subcellulaire, les cellules ayant une taille de l'ordre de dix microns. Outre l'information structurelle, comme la forme des cellules ou du noyau, qui permettent par exemple de distinguer une cellule tumorale bénigne d'une cellule maligne, on peut utiliser des marqueurs permettant de révéler un large spectre d'informations : depuis la présence d'une protéine, l'expression d'un gène, l'activation d'un neurone. Malgré tout, les tissus biologiques sont également des milieux diffusants pour la lumière : ils sont hétérogènes à toutes les échelles, depuis les protéines, le noyau, au cellules, jusqu'aux organes. La diffusion reste une difficulté majeure pour l'imagerie : toutes ces techniques restent limitées à l'imagerie d'échantillons très fins (par exemple une tranche de quelques microns placée sur une lame de microscope), ou à la surface des échantillons.

* Imager : obtenir ou former une image



Illustration de la diffusion de la lumière dans les tissus biologiques : extrait du tableau *Saint Joseph charpentier*, peint en 1643 par le Lorrain Georges de La Tour. Observez la lumière de la bougie à travers la main de l'enfant. On ne voit pas la bougie, mais on voit sa lumière qui traverse la main.

Musée du Louvre de Lens © 2008 RMN / Jean-Gilles Berizzi

Pénétrer en profondeur dans un tissu reste un défi majeur pour l'imagerie optique, et un champ de recherche extrêmement actif. Peut-on vaincre la diffusion ? Rendre *transparent* un milieu opaque ? La mettre à profit pour améliorer la résolution ?

Un nouveau champ de recherche, pour répondre à ces questions, a émergé ces dernières années.



Effet de la diffusion de la lumière : le mirage des œufs, on éclaire un œuf par l'arrière avec une source lumineuse intense, afin de déterminer si l'œuf est fécondé et à quel stade de développement il se trouve.

© École de Verny, J. Moreau

Optique adaptative et contrôle de front d'onde

Pour vaincre la diffusion, la communauté scientifique s'est inspirée de concepts et d'outils développés pour l'astronomie. Dans l'observation céleste depuis les télescopes terrestres, on a tout d'abord augmenté la qualité et le diamètre des télescopes afin d'améliorer la résolution et la quantité de signal collecté venant du ciel. C'est ainsi que Galilée a découvert les satellites de Jupiter. Cependant, les meilleurs télescopes d'aujourd'hui sont limités par les perturbations, même minimales, dues à la traversée par la lumière dans les derniers kilomètres de l'atmosphère. Ces perturbations sont dues à la turbulence de l'air, similaire à ce que l'on peut observer lors d'une journée chaude en observant une route goudronnée chauffée par le soleil. L'optique adaptative, consistant à mesurer ces perturbations et à utiliser un miroir déformable pour les corriger en temps réel, équipe maintenant tous les nouveaux télescopes et a permis depuis vingt ans d'améliorer significativement la qualité des observations astronomiques, en imageant les étoiles avec une résolution donnée par la limite de diffraction permise par l'instrument.

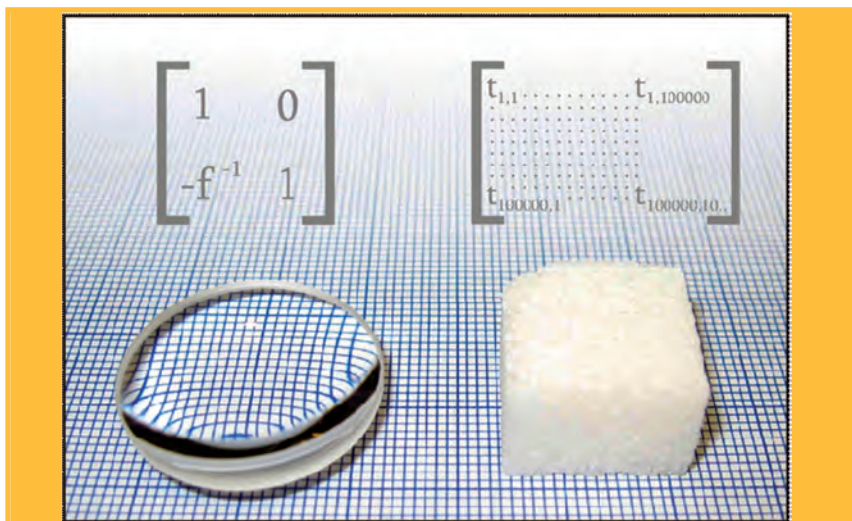


Effet de la turbulence de l'air : une tuyère souffle de l'air chaud qui brouille l'image de l'avion.

© Creative Commons, Mean as custard

Si on peut ainsi dynamiquement corriger les faibles perturbations dues à la turbulence, peut-on étendre cette idée à la diffusion ? Après tout, le phénomène est le même (des inhomogénéités du milieu de propagation), dans des régimes extrêmement différents. Cette idée peut paraître folle, quand on pense à la complexité du processus de diffusion.

Cependant, on dispose maintenant d'outils exceptionnels qui ont rendu cette prouesse possible : les modulateurs spatiaux de lumière. Ces dispositifs permettent, tout comme un miroir déformable, de contrôler spatialement une onde lumineuse, mais avec un nombre de pixels pouvant atteindre plusieurs millions (au lieu de quelques dizaines en astronomie), rendant ainsi possible de s'attaquer à un phénomène aussi complexe que la diffusion. Technologiquement, ils sont les cousins de produits grands publics que nous connaissons tous : écrans LCD, vidéoprojecteurs, afficheurs divers.,

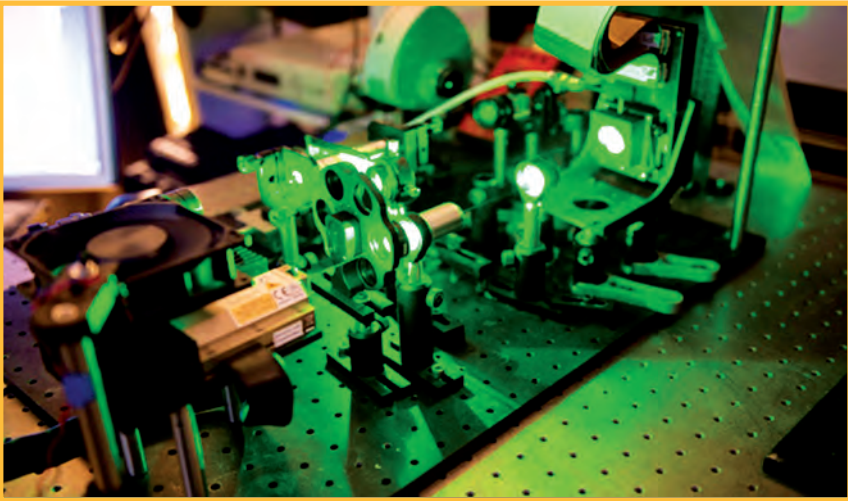


Un milieu diffusant, même très complexe, reste linéaire et déterministe, tout comme une lentille. Si on connaît sa *matrice de transmission*, on peut focaliser la lumière ou imager à travers lui.

© American Physical Society

Imager en profondeur dans les milieux diffusants

Grâce à ces nouveaux outils, il a ainsi été montré qu'on pouvait focaliser ou imager à travers et dans les milieux complexes, en particulier en apprenant puis en exploitant la *matrice de transmission*, c'est-à-dire la fonction, très complexe, qui décrit la propagation de la lumière à l'échelle de la longueur d'onde, à travers un milieu linéaire, aussi complexe soit-il. Ce processus d'apprentissage, long, consiste à *interroger* le milieu à l'aide d'un modulateur spatial de lumière, et à enregistrer sa réponse à chaque excitation à l'aide d'une caméra. Une fois cette matrice connue, on peut à volonté concentrer la lumière à la limite de diffraction, ou retrouver l'image d'un objet, tant que le milieu complexe n'a pas bougé.



Expérience au Laboratoire Kastler-Brossel visant à pénétrer des milieux complexes.

© CNRS

Pour l'instant, les recherches en laboratoire se concentrent sur des milieux certes très diffusants, mais stationnaires, comme par exemple une fine couche de peinture blanche. Le brouillard ou les nuages restent encore hors de portée de ces techniques, car ils évoluent bien plus vite que les modulateurs spatiaux actuels : quelques microsecondes contre quelques dizaines de millisecondes à une fraction de milliseconde.

Néanmoins, focaliser ou imager à travers un milieu biologique, qui évolue plutôt à l'échelle de la fraction de seconde, reste envisageable. Mais de nombreuses questions pratiques ou fondamentales restent ouvertes. Cependant, ces concepts sont une révolution prévisible pour l'imagerie biologique.

La diffusion de la lumière dans les tissus reste une barrière opaque, mais pour combien de temps encore ?

S. G.

L'arc-en-ciel

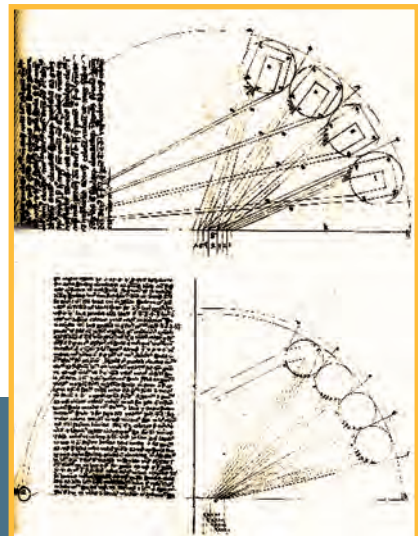
Michel Blay

Directeur de recherche émérite au CNRS

Le phénomène de l'arc-en-ciel a été l'objet de nombreuses explications au cours des siècles. La première, géométriquement organisée, est proposée par Aristote (384–322 av. J.-C.) dans ses *Météorologiques*. Il y montre, ce qui est remarquable, que la forme circulaire de l'arc-en-ciel est due à un phénomène de révolution autour d'un axe passant par le Soleil et l'œil de l'observateur de telle sorte qu'un cône se trouve engendré dont le sommet est confondu avec l'œil de l'observateur.

Il n'est pas possible dans ce bref article de suivre toute l'histoire des théories de l'arc-en-ciel. En revanche, nous nous servons ponctuellement de cette histoire afin de rendre compte le plus clairement possible de ce magnifique phénomène qui a nourri l'imaginaire mythologique avant d'entrer, avec Aristote, dans le champ des mathématiques et de la démonstration.

L'explication de ce phénomène dont la circularité est due, comme l'a affirmé Aristote, à un phénomène de révolution repose pour l'essentiel, d'une part, sur la réflexion des rayons lumineux par la face arrière des gouttes et, d'autre part, sur la réfraction de ces mêmes rayons à l'entrée et à la sortie des gouttes. Ces deux aspects du trajet



La genèse des arcs
suivant Dietrich de Freiberg vers 1300.

des rayons lumineux, déjà dégagés autour des années 1300 par Al Farisi et Dietrich de Freiberg, vont se trouver, après un relatif oubli, successivement mis en avant par Francesco Maurolico (1494–1575) et par Giambattista della Porta (1535–1615). Chacun d’eux concentre son attention sur l’un des aspects du trajet des rayons et néglige l’autre. De telles hésitations soulignent les difficultés soulevées par la compréhension de ce phénomène.

La première explication cohérente de l’arc-en-ciel est donnée par Isaac Newton (1642–1727). Celle-ci permet de comprendre le phénomène, c’est-à-dire de rendre compte à la fois de la forme des arcs (cf. Aristote), de leur luminosité dans le ciel et de la répartition des couleurs dans les différents arcs.

Lorsqu’on observe le ciel après une forte pluie et que le Soleil perce les nuages derrière soi à une certaine hauteur au-dessus de l’horizon plutôt vers la fin de l’après-midi, se déploie ce qu’on appelle un arc-en-ciel. On observe en général deux arcs lumineux et colorés, séparés par une bande plus sombre appelée *bande d’Aphrodise* du nom d’Alexandre d’Aphrodise (III^e siècle.) qui l’introduisit dans son commentaire aux *Météorologiques* d’Aristote. Pourquoi y a-t-il de telles différences de luminosité dans le ciel ? Pourquoi les bandes les plus lumineuses sont-elles colorées ?



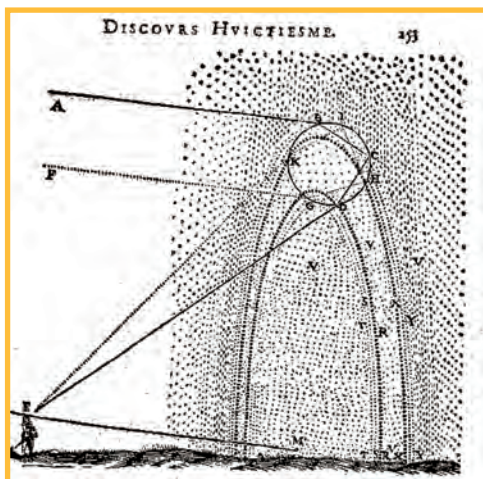
Double arc-en-ciel après une tempête de neige sur les montagnes du parc national Zebra, dans la province du Cap oriental en Afrique du Sud.

© Rute Martins - Commons Wikipedia - CC-BY-SA 3.0

Luminosité et rayons efficaces

La réponse à la première question, celle portant sur les différences de luminosité, est apportée par René Descartes en 1637 dans le Discours VIII de ses *Météores*.

Dans cet écrit, Descartes s'engage dans une remarquable étude expérimentale. Il utilise un grand vase sphérique transparent rempli d'eau et imitant une goutte d'eau. Par ce geste, il transporte l'arc-en-ciel dans le laboratoire et peut étudier avec soin et minutie les trajets des rayons entrant et sortant du vase-goutte. Il montre alors, en faisant varier l'angle d'incidence des rayons sur le vase et en construisant des tableaux de valeurs



Extrait du *Discours VIII des Météores*
de Descartes (1596-1650).

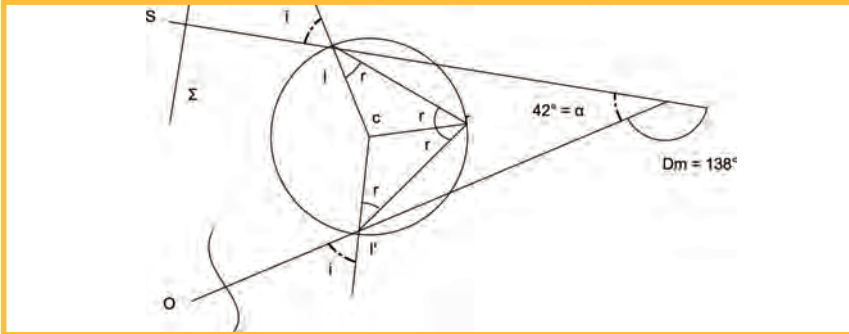
caractérisant en particulier les angles d'émergence des rayons, que l'apparition des arcs correspond à une situation d'extrema : pour certains angles d'incidence sur les gouttes (ou le vase), les rayons émergent suivant une certaine direction, presque tous parallèlement, et engendrent ainsi une plus grande luminosité dans le ciel. Il introduit ainsi, de façon implicite, le concept de rayon efficace. Voilà donc pourquoi des bandes plus lumineuses apparaissent sous un angle d'environ 42° et 58° (angle formé par les rayons du Soleil et ceux émergeant des gouttes vers l'œil de l'observateur dans le cas du premier et du deuxième arc).

La répartition des couleurs dans les arcs lumineux

Descartes a rendu compte des différences de luminosité dans le ciel. Newton reprend l'analyse cartésienne mais en s'appuyant sur de délicats calculs de géométrie infinitésimale. Sans entrer dans le détail, au sens historique du terme, de sa démarche, nous pouvons reprendre son approche dans un langage modernisé : il s'agit de calculer la déviation D (entre le rayon incident provenant du Soleil et le rayon émergent se dirigeant vers l'œil de l'observateur).

Cas du premier arc

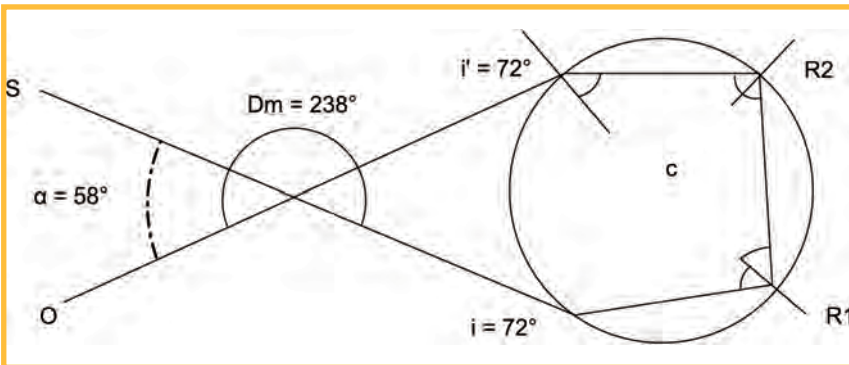
Considérons un rayon lumineux S qui rencontre une goutte de pluie en I, il se réfracte suivant IR pour se réfléchir (réflexion partielle) suivant RI' puis se réfracte à nouveau vers l'observateur. Il s'ensuit immédiatement que le rayon incident a subi trois déviations dans le même sens : par réfraction $2(i - r)$ et par réflexion $(180^\circ - 2r)$. Au total, $D = 180 + 2i - 4r$ degrés.



Genèse du premier arc.

Cas du deuxième arc

Considérons un rayon lumineux qui rencontre une goutte de pluie en I, il se réfracte puis se réfléchit successivement en R1 et R2 et finalement émerge vers l'observateur. Il s'ensuit immédiatement que le rayon incident a subi quatre déviations dans le même sens : par réfraction $2(i - r)$ et par réflexion $(360^\circ - 4r)$. Au total, $D = 360 + 2i - 6r$ degrés.



Genèse du deuxième arc.

Cas général

Dans la situation où le rayon incident subit k réflexions internes et $k + 2$ déviations dans le même sens, la déviation D est donnée par :
 $D = 2(i - r) + k(180 - 2r)$ degrés.

Recherche du minimum D_m

La déviation D calculée précédemment passe par un minimum D_m obtenu pour une valeur i_m de i et en sachant que $\sin i = n \sin r$ (n est l'indice de réfraction).

Par le calcul de la dérivée, $\frac{dD}{di}$ s'annule pour $\cos^2 i_m = \frac{n^2 - 1}{k^2 + 2k}$.

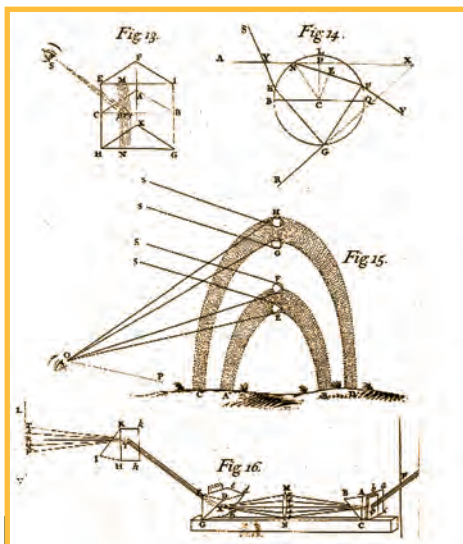
D'où il suit pour $k = 1$, $\cos i_m = \sqrt{\frac{n^2 - 1}{3}}$ et pour $k = 2$, $\cos i_m = \sqrt{\frac{n^2 - 1}{6}}$.

Il est alors aisé, connaissant n et k , d'en déduire la valeur de i_m puis celle de D_m et d'obtenir ainsi la valeur de l'ouverture D des différents arcs. En outre, il apparaît que le nombre d'arcs, dépendant de k , ne se limite pas à 2. La répartition et la position des couleurs dépendent de l'indice de réfraction de chaque lumière monochromatique.

Les développements de la théorie

Si la théorie que nous venons de présenter explique pour l'essentiel le phénomène de l'arc-en-ciel, elle n'en reste pas moins très élémentaire. Ne sont pas pris en considération entre autres les phénomènes d'arcs surnuméraires ou supplémentaires.

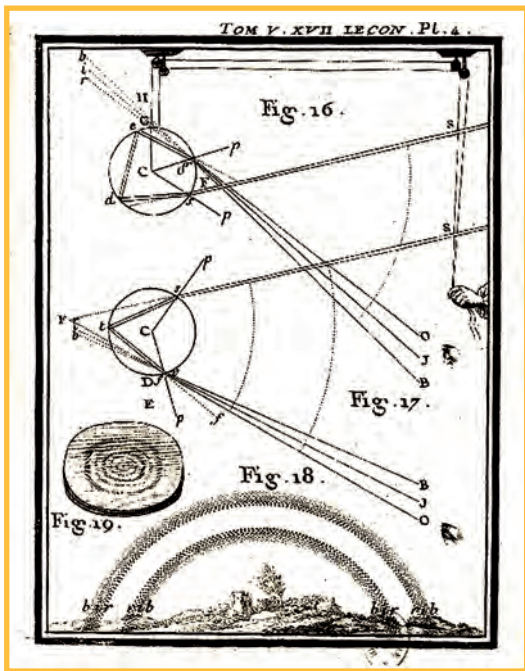
En effet, vers les années 1720, Henry Pemberton (1694–1771) reconnaît que les arcs principaux sont souvent accompagnés d'arcs surnuméraires. Ceux-ci apparaissent à l'intérieur du premier arc et à l'extérieur du second, c'est-à-



Prisme, couleurs et arc-en-ciel suivant Newton

dire toujours du côté du violet, à l'intérieur des zones lumineuses. Leur visibilité, leur écart angulaire, leur coloration et leur aspect sont extrêmement variables. Une observation plus fine, à

travers par exemple un écran monochromatique, permet de constater que l'intensité des franges brillantes décroît globalement très lentement à partir des arcs principaux. Ces arcs surnuméraires constituent de la sorte un phénomène que la théorie newtonienne sous la forme classique que nous avons analysée précédemment ne peut pas laisser prévoir et qu'elle est, à strictement parler, incapable d'expliquer.



Un exemple d'étude de l'arc-en-ciel au XVIII^e siècle.

Ce n'est finalement qu'au début du XIX^e siècle que cette question, impliquant une refonte de la théorie de l'arc-en-ciel, trouve sa solution. En 1803, Thomas Young, qui vient de montrer que la lumière est susceptible d'interférer, imagine que l'existence des arcs surnuméraires est liée à l'interférence des rayons efficaces. En effet, deux rayons parallèles atteignant une goutte d'eau dans la zone des rayons efficaces émergent pratiquement parallèles, mais après avoir parcouru des chemins optiques différents tant dans l'air que dans l'eau. Des interférences seront donc observables donnant naissance, non pas à un simple arc principal, mais à toute une série d'arcs colorés comme dans le cas des anneaux de Newton. Un nouveau facteur entre maintenant en jeu : le chemin optique et, par voie de conséquence, la taille des gouttes. Cette théorie constitue une nouvelle étape par rapport à la théorie newtonienne. Malheureusement elle explique mal la bande plus sombre séparant les deux arcs principaux, et Young est incapable de construire un véritable modèle mathématique quantitatif. Une meilleure connaissance des phénomènes d'interférence et de diffraction ainsi que de leur traitement mathématique devient alors la condition d'une recons-

truction rationnelle de l'arc-en-ciel. Ce sera principalement l'œuvre de Richard Potter (1799–1886) et de Sir Biddell Airy (1801–1892).

Dans cette nouvelle théorie, deux idées, déjà anciennes, vont intervenir. La première est celle du front d'onde introduite par Christiaan Huygens dès la fin du XVII^e siècle. La seconde est celle suivant laquelle un faisceau de rayons parallèles tombant sur un miroir hémisphérique parallèlement à son axe se réfléchit en engendrant une caustique (surface tangente aux rayons lumineux issus d'un même point après avoir traversé un instrument optique ; ici un miroir hémisphérique).

L'introduction de ces idées dans la théorie de l'arc-en-ciel est alors envisagée, d'abord par Potter en 1835, puis d'une façon plus mathématique et plus élaborée par Airy. Leur approche consiste alors à comprendre la genèse de l'arc-en-ciel comme un problème classique de diffraction auquel on peut appliquer les méthodes du calcul par intégration d'Augustin Fresnel. Dans la théorie antérieure de Young, on ne fait interférer, au loin, que les deux rayons parallèles de l'optique géométrique, tandis que dans la théorie d'Airy on fait interférer les vibrations issues de tous les points de la surface d'onde. C'est à cet endroit de la construction théorique que l'application du principe de Huygens prend tout son sens. Cette théorie n'est donc qu'un cas particulier des études de Fresnel sur la diffraction. En 1836, Airy donne, dans les *Transactions of the Cambridge Philosophical Society* (1838, p. 379-403), la loi de répartition de l'intensité lumineuse. Celle-ci représente les valeurs des carrés de l'intégrale appelée aujourd'hui *intégrale d'Airy*. La distribution des intensités lumineuses données par cette intégrale est semblable à celle correspondant à la figure de diffraction donnée par le bord d'un objet rectiligne. Elle fait donc connaître les intensités relatives des différents arcs et leurs directions par rapport au rayon efficace considéré. L'essentiel est en place. James Clerk Maxwell (1831–1879) et Lord Rayleigh (1842–1919) préciseront certains aspects relatifs à la perception des couleurs, au développement du traitement mathématique et au rôle de la polarisation de la lumière. Quelques derniers raffinements théoriques ont encore été récemment introduits grâce à la mise en œuvre, en particulier, des gros moyens de calcul par ordinateur.

M. B.

Pour en savoir plus :

Michel BLAY, *Les figures de l'arc-en-ciel*, Paris, Carré, (1995), rééd. Paris, Belin, (2006).

Carl B. BOYER, *The Rainbow from Myth to Mathematics*, New York, Thomas Yoseloff, (1959).

Herch Moysés NUSSENZVEIG, *The theory of the Rainbow*, *American Scientific*, (avril 1977), p. 116-127.



QUI A DIT QUE LES MATHS NE SERVAIENT À « Ri1 » ?

Sans les maths...

- Internet serait encore un minitel
- La calculette serait encore un boulier
- Christophe Colomb serait encore en Méditerranée
- La tour Eiffel ne serait pas droite



FSMP
Fondation Sciences
Mathématiques de Paris

UPMC
SORBONNE UNIVERSITÉS



La lumière laser

Lucile Julien

Professeure émérite

Université Pierre et Marie Curie - Laboratoire Kastler Brossel

Une lumière différente

Nous distinguons du premier coup d'œil la lumière émise par un laser de la lumière émise par une lampe ordinaire, qu'il s'agisse d'une lampe à incandescence ou d'une lampe à décharge. En effet le laser délivre un faisceau fin et directif, souvent monochromatique, c'est-à-dire d'une couleur pure. Au contraire, les lampes émettent de la lumière dans toutes les directions et cette lumière est en général blanche, composée de nombreuses couleurs. C'est bien ce qu'on attend d'une lampe : éclairer largement et fournir de la lumière qui peut être diffusée par les surfaces éclairées, quelle que soit leur couleur. Les lasers ne sont pas utiles pour l'éclairage, mais ils ont bien d'autres applications.

Comme la lumière ordinaire, la lumière laser peut être décrite soit comme un flux de photons, des particules transportant l'énergie lumineuse, soit comme une onde électromagnétique, c'est-à-dire un champ électrique et un champ magnétique oscillants tous deux à une fréquence f et couplés entre eux. Ces descriptions sont l'une et l'autre pertinentes et confirmées par l'expérience. Elles sont complémentaires entre elles : l'énergie des photons est donnée par hf ou h est la constante de Planck, et les photons comme l'onde se propagent dans le vide à la vitesse de la lumière c . La longueur d'onde est donnée par $\lambda = c/v$. Elle est comprise entre 400 et 800 nm environ dans le domaine visible. Dans la lumière laser, les photons sont identiques entre eux. On dit qu'ils sont dans le même mode du champ électromagnétique : ils ont alors même direction de propagation et même fréquence. La lumière laser est concentrée et ordonnée.

De la lumière concentrée

Comme un faisceau laser a une direction bien définie et une extension latérale limitée, il peut matérialiser une ligne droite. Il faut pour cela qu'il se propage dans un milieu transparent et homogène, ce qui est assez



Figure 1 :

Faisceau laser vert entre la coupole de l'Observatoire de Paris et Montmartre en 2005
(photo Nicolas Treps)

bien vérifié pour l'air ambiant (figure 1). C'est ainsi qu'on utilise des faisceaux lasers sur les chantiers comme outil d'alignement, et même – associé à un niveau d'eau ou à un fil à plomb – comme référence horizontale ou verticale sur une longue distance.

Une autre façon de transporter la lumière laser est d'utiliser une fibre optique, un fil en verre ou en plastique, de faible diamètre appelé *cœur*, entourée d'une gaine d'indice légèrement inférieur. En raison du phénomène de réflexion totale à l'interface entre le cœur et la gaine, la lumière se propage dans le cœur en y restant confinée (figure 2). Le diamètre de la fibre est de l'ordre de quelques micromètres : seul un faisceau de lumière laser peut donc être injecté dans la fibre. Même si la fibre est courbée, le faisceau est transporté jusqu'à l'autre extrémité de la fibre. Avec des fibres actuelles en silice et un faisceau laser dans l'infrarouge à 1 550 nm (longueur d'onde utilisée dans les télécommunications) l'atténuation est de l'ordre d'un facteur 100 sur une centaine de km. En modulant l'intensité du faisceau lumineux, on peut transmettre des données par fibre

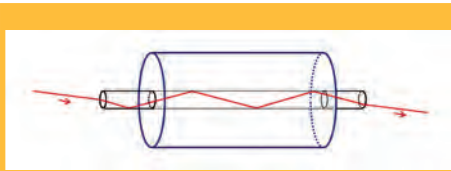


Figure 2 :

Principe d'une fibre optique. Le cœur de la fibre (en noir) a un indice légèrement supérieur à celui de la gaine (en bleu). Par réflexion totale, le faisceau laser (en rouge) est confiné dans le cœur et se propage d'une extrémité à l'autre de la fibre.

optique. Le signal est codé sous forme numérique (avec des 0 et des 1), et selon les cas est utilisé pour les communications téléphoniques ou l'échange de données sur le réseau Internet.

Les fibres optiques, qui ont l'avantage de transporter sous un faible volume plus de données avec moins de pertes, remplacent ainsi progressivement les câbles électriques.

Si elle peut transporter de l'information, la lumière laser se contente parfois simplement de transporter de l'énergie sous forme concentrée. Les faisceaux lasers sont de plus en plus répandus dans l'industrie pour découper, percer, souder, usiner des matériaux de toutes sortes. Pour la même raison, et souvent à l'aide de fibres optiques, les lasers ont maintenant de très nombreuses applications médicales : ils servent couramment de bistouris pour la chirurgie interne, ou bien en dermatologie ou en ophtalmologie. La profondeur de pénétration du faisceau dans les tissus et son effet dépendent des propriétés du laser, en particulier de sa longueur d'onde. Pour corriger la myopie, on utilise par exemple un laser infrarouge à impulsions très courtes pour découper un volet de cornée, et un laser ultraviolet pour rectifier la courbure de la cornée sous ce volet.

Le laser : un oscillateur optique

Le mot laser est un acronyme qui signifie *amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement* (en anglais *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Bien que le processus d'émission stimulée de rayonnement ait été découvert par Albert Einstein en 1917, le premier laser n'a fonctionné qu'en 1960 aux Etats-Unis. Depuis, des lasers de toutes sortes ont été réalisés, avec des longueurs d'onde, des puissances et des dimensions très variées : certains lasers ont pour dimension le diamètre d'un cheveu, d'autres, des centaines de mètres !

Tous fonctionnent selon le même principe et contiennent un milieu amplificateur placé dans une cavité optique. Le milieu amplificateur est constitué d'atomes, d'ions ou de molécules, qui peuvent être sous forme gazeuse, dans une solution liquide ou dans un solide. Dans les lasers à semi-conducteurs, appelés *diodes lasers* qui sont actuellement les lasers les plus répandus, ce sont les électrons et les trous (lacunes d'électrons au sein du solide semi-conducteur) qui, groupés par paires, jouent le rôle d'atomes. Le milieu est pompé, c'est-à-dire qu'on lui fournit de l'énergie pour porter les atomes dans un état excité. Cette énergie peut être d'origine électrique, chimique, optique, ou autre. Un atome excité d'énergie E_2 peut alors se désexciter vers un autre état d'énergie E_1 , en émettant un photon à la fréquence f telle que $hf = E_2 - E_1$ (c'est la *condition de résonance*, qui découle de la conservation de l'énergie quand l'atome émet le photon).

Ce qu' Einstein a découvert, c'est que cette émission de lumière pouvait être provoquée par des photons incidents de fréquence f : la lumière émise a alors les mêmes propriétés que la lumière incidente et cette émission stimulée est à l'origine d'une amplification de l'onde lumineuse par le milieu (figure 3).

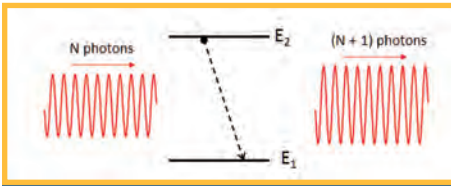


Figure 3 :

Sous l'effet de l'émission stimulée, un atome se désexcite en émettant de la lumière ayant les mêmes propriétés que la lumière incidente.

Celle-ci se trouve amplifiée lors de la traversée du milieu.

Pour réaliser un laser, on place le milieu amplificateur dans une cavité optique. La plus simple est la cavité Fabry–Perot constituée de deux miroirs se faisant face (figure 4). La lumière fait alors des allers-retours entre les deux miroirs, en étant amplifiée à chaque passage. Si les bonnes conditions d'alignement de la cavité, de réflectivité des miroirs et

d'efficacité du pompage sont remplies, l'amplificateur se transforme de lui-même en oscillateur, comme il arrive à certains dispositifs électroniques à fort gain ou dans l'effet Larsen.

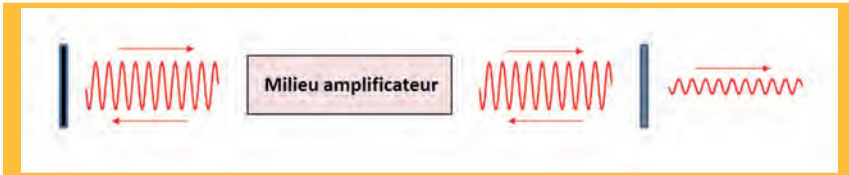


Figure 4 :

Le milieu amplificateur contenant les atomes est placé entre deux miroirs, dans une cavité Fabry–Perot. La lumière fait des allers-retours entre les deux miroirs et est amplifiée à chaque passage. Si le gain de l'amplification est suffisant, l'ensemble devient un oscillateur optique. Le faisceau laser est émis par le miroir de sortie, dont la réflectivité n'est pas totale.

On obtient alors une source de lumière : un faisceau laser est émis par l'un des miroirs, le *miroir de sortie* qu'on a volontairement choisi avec une petite transmission. La direction du faisceau émis est imposée par l'orientation des miroirs, et sa fréquence par le choix du milieu amplificateur et les propriétés du miroir et de la cavité.

De la lumière pour mesurer

La sélectivité en fréquence d'un faisceau laser est ce qu'on appelle sa *pureté spectrale*. Elle a de nombreuses applications, par exemple l'holographie, l'interférométrie, la spectroscopie, la détection de traces de polluants, etc.

En outre, la mise au point de lasers délivrant des impulsions courtes a permis le développement de dispositifs de mesure de distances et de vitesses de plus en plus répandus : télémètres lasers pour le métrage dans les bâtiments, jumelles lasers pour les contrôles de vitesses sur la route.

Ces appareils émettent des impulsions régulièrement espacées, en général dans l'infrarouge, et mesurent le temps mis par une impulsion pour faire un aller-retour en se réfléchissant sur un mur ou une plaque minéralogique. La vitesse est déterminée par une mesure répétée de distance.

De la même façon, on mesure la distance Terre–Lune avec des impulsions de courte durée émises à partir d'un télescope, comme à l'Observatoire de la Côte d'Azur. Les impulsions sont réfléchies sur des réflecteurs qui ont été disposés sur la Lune lors de missions spatiales. Un aller - retour dure environ 2 s (la distance Terre–Lune est d'environ 384 000 km) et, bien que très peu de photons émis soient reçus après un aller-retour, il en reste suffisamment pour déterminer la distance entre l'émetteur et le réflecteur avec une précision de quelques millimètres. On observe ainsi que la Lune s'éloigne de la Terre de 3,8 cm par an...

C'est aussi leur pureté spectrale qui a permis dans les années 1970 de mesurer simultanément la fréquence et la longueur d'onde de différents lasers et d'en déduire la vitesse de la lumière, qui est le produit des deux. En 1983, il a été décidé de remplacer la définition du mètre – qui s'appuyait auparavant sur la longueur d'onde d'une raie orangée de la lampe à krypton – par la vitesse parcourue par la lumière dans le vide en $1/299\,792\,458^{\text{ème}}$ de seconde. La vitesse c a donc maintenant pour valeur exacte : $c = 299\,792\,458$ m/s. Ici encore, les lasers ont de bien meilleures performances que les lampes, non seulement comme instruments de mesure, mais aussi comme références pour la métrologie.

L. J.

Pour en savoir plus :

Nicolas TREPS et Fabien BRETENAKER, *Les lasers*, EDP Sciences (2010)

http://www.dailymotion.com/playlist/x31pmk_CNRS_physique/2#video=x1joo13

<https://geoazur.oca.eu/spip.php?rubrique201>

<http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/dossierthematiques/laser/>

<http://videothèque.cnrs.fr/doc=2226>



Cap'Maths est un consortium rassemblant les principaux acteurs du monde des mathématiques, avec comme objectif de promouvoir les mathématiques en

- atténuant les disparités sociales et géographiques ;
- incitant et aidant les jeunes filles à surmonter la barrière des préjugés pour se lancer dans des études à forte composante mathématique ;
- améliorant la perception générale des mathématiques par le grand public et notamment les jeunes scolarisés, en améliorant la compréhension de leur impact, de leur utilité et de leur vitalité ;
- augmentant globalement le flux d'étudiants effectuant des études longues dans un domaine scientifique, et en particulier dans les sciences à forte composante mathématique.

Cap'Maths en est sa troisième année de fonctionnement. Plus d'1 million d'Euros de subventions ont été accordés depuis 2012 permettant de réaliser des actions à hauteur de près de 3 millions d'Euros.

Cap'Maths est porté par l'association Animath, créée en 1998, et qui bénéficie de l'agrément du ministère de l'éducation nationale. L'association soutient, avec ses partenaires, de nombreux projets d'animations mathématiques :

- Journées Filles et maths, une équation lumineuse
- Des conférences : Un texte, un mathématicien, Promenades mathématiques
- Des interventions de professionnels d'entreprises dans des classes : Les Maths, ça sert !
- Stages
- Concours et Olympiades
- Tutorat
- Action internationale.



Renseignements
et contacts :

www.animath.fr

www.capmaths.fr

Petit éclairage, avec coloration mathématique, sur les horloges du vivant

André Klarsfeld

Professeur
ESPCI ParisTech - Laboratoire *Plasticité du Cerveau*, ESPCI/CNRS

Des horloges internes en général décalées, mais redoutablement précises

Décrits pour la première fois en 1729 par le botaniste français Jean-Jacques d'Ortous de Mairan¹, les rythmes circadiens – ce qui signifie *de période proche d'un jour* – sont présents dans la plupart des organismes vivants. Ces rythmes, qui persistent en conditions parfaitement constantes, reflètent l'existence d'horloges biologiques internes (figure 1). Leur période propre est dans une large mesure indépendante de l'environnement, et caractéristique de l'espèce considérée. Livrées à elles-mêmes, elles présentent donc le défaut d'avancer ou retarder chaque jour de plusieurs minutes, voire quelques heures. Elles y mettent en revanche une remarquable régularité. Un chronobiologiste qui maintient des rongeurs dans une pénombre et une température constantes peut ainsi, dès l'été, prévoir à une quinzaine de minutes près quand chacun de ses animaux se réveillera le jour de Noël !

Toutefois de telles conditions n'existent pas dans la nature, si ce n'est pour les organismes strictement cavernicoles, tels que des poissons vivant dans des lacs souterrains.

¹ - qui succédera à Fontenelle comme secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences, de 1740 à 1743.

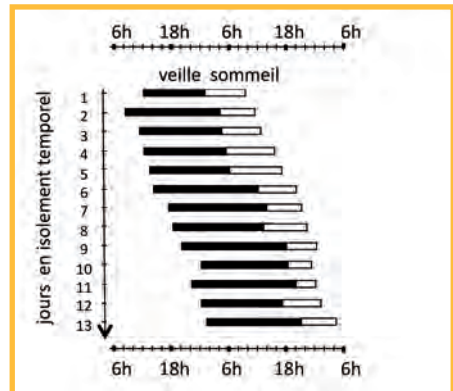


Figure 1 :

Rythme veille-sommeil chez un humain en isolement temporel.

Il s'agit d'un rythme circadien : les plages d'éveil (en noir) et de sommeil (en blanc) alternent très régulièrement, mais en se décalant chaque jour un peu vers la droite. La période propre de ce sujet est de 25,7 h.

Les horloges du vivant,
A. Klarsfeld, éd. O. Jacob, 2009

Pour que les horloges circadiennes aient une utilité, il faut intuitivement que des signaux extérieurs puissent les remettre à l'heure solaire, d'un jour sur l'autre. De fait, elles sont synchronisées par l'alternance jour-nuit, ou *nyctémère* (du grec *nyct*-*jour*), qui impose à l'organisme une périodicité de vingt-quatre heures, bien que la période propre de ses horloges soit plus ou moins différente. Les physico-mathématiciens parleront d'*oscillations forcées*, et s'attendront à ce que ce forçage ne soit possible que dans certaines limites.

Cela se vérifie expérimentalement : si l'on impose en laboratoire des cycles jour-nuit artificiels de durées trop éloignées de la période propre d'un organisme, son horloge tourne en libre cours, sans pouvoir se synchroniser sur ces journées trop extra-terrestres. Les chercheurs en tirent parti pour étudier l'horloge circadienne humaine en proposant à leurs cobayes de vivre comme des navigateurs solitaires, avec des cycles veille-sommeil très courts, plutôt qu'en pénombre constante, qui est plus difficile à maintenir de manière à la fois assez rigoureuse et pas trop désagréable pour les sujets d'expérience.

Les mathématiques sont bien sûr très utiles pour analyser les données de chronobiologie, qui ne sont rien d'autres que des séries temporelles : mesures régulières de température corporelle, d'activité physique, de concentrations hormonales... Pour établir si ces données présentent une périodicité proche de vingt-quatre heures, et le cas échéant en calculer la période aussi précisément que possible, il faut en général d'abord les filtrer, puis leur appliquer des méthodes telles que la transformation de Fourier, associées à des outils statistiques qui évaluent la probabilité que le rythme détecté ne résulte pas de variations en fait aléatoires – en d'autres termes, que ce rythme soit significatif.

On ne sait pas vraiment pourquoi la période des horloges circadiennes est supérieure à vingt-quatre heures chez certaines espèces (chez l'homme, $24,2 \pm 0,2$ h), et inférieure à vingt-quatre heures chez d'autres. Selon l'hypothèse qui me semble la plus plausible, ces écarts illustreraient simplement un aspect essentiel, mais méconnu, du mode d'action de la sélection naturelle. Celle-ci ne produit pas de la perfection, mais du convenable, qui peut aller jusqu'au plus convenable possible, matériellement² ... tant que ce plus confère *un plus*. À quoi bon une horloge qui mesure très précisément les heures, si elle est remise à l'heure automatiquement tous les jours ?

² - par exemple, chez les insectes, des yeux à facettes dont la résolution soit la meilleure possible, compte tenu de la diffraction par les bords de chaque facette.

Répondre à *rien* conduit toutefois à une autre question, presque symétrique, et pour l'instant sans réponse : à quoi bon une horloge aussi robuste, qui tourne de manière autonome pendant des semaines voire des mois, alors que cette performance n'est jamais mise à contribution dans la nature, sauf dans quelques environnements extrêmes ?

La lumière à la rescousse

Voyons maintenant de plus près comment nos horloges internes sont remises à l'heure solaire, d'un jour sur l'autre, par ce que les chronobiologistes appellent des *Zeitgebers*, mot allemand qui signifie *Donneurs de temps*. Le principal d'entre eux n'est autre, comme on peut s'en douter, que la lumière du jour³. Il n'est pas nécessaire d'exposer l'organisme à des plages de lumière prolongées. En laboratoire, un épisode lumineux de quelques minutes voire moins, s'il est assez intense, peut suffire, à condition de le répéter à intervalles réguliers de vingt-quatre heures⁴. Il y a mieux. Lorsque l'organisme est en obscurité constante, un seul éclair lumineux permet de décaler son horloge de quelques heures. La valeur exacte de ce décalage (que les mathématiciens appelleront *déphasage*), et notamment son signe, dépend du moment où se produit l'exposition à la lumière.

Si l'horloge interne marque alors le jour, l'effet de la lumière sera nul ou très faible. Si elle marque le début de la nuit, la lumière retardera l'horloge, tandis qu'elle l'avancera au contraire en fin de nuit. On peut en tirer des *courbes de réponses de phase*, caractéristiques de chaque espèce, mais dont l'allure générale est souvent proche de la (figure 2) : assez plate pendant le jour subjectif, et changeant de signe en milieu de nuit subjective. Citons juste une conséquence pratique : s'exposer trop longtemps à des lumières trop intenses avant de se coucher, surtout de manière régulière, cela retarde notre horloge, et donc notre heure d'endormissement.

Les voies par lesquelles la lumière met notre horloge à l'heure n'ont été identifiées qu'au début des années 2000. Elles passent entièrement par la rétine, contrairement à ce qu'on a cru un moment, mais les principaux acteurs n'en sont pas les cellules photoréceptrices usuelles, cônes et bâtonnets, qui nous permettent de voir. L'œil contient en effet une troisième classe de constituants sensibles à la lumière. Ils font partie des cellules ganglionnaires de la rétine, dont la très grande majorité se contentent de relayer vers le cerveau les signaux en provenance des cônes et des bâtonnets.

³ - Un autre *Zeitgeber* important est la température, qui varie elle aussi entre le jour et la nuit. Des cycles réguliers d'1,5°C d'amplitude suffisent en général à synchroniser les horloges circadiennes.

⁴ - comme mentionné plus haut, varier la durée des cycles met en évidence des limites au-delà desquelles la synchronisation des horloges devient impossible.

Un à deux pour cent des cellules ganglionnaires contiennent un pigment photosensible appelé *mélanopsine*, qui leur confère en plus une sensibilité intrinsèque à la lumière. Le mécanisme moléculaire en est apparenté à celui des cônes et des bâtonnets, tout en étant, fait surprenant, beaucoup plus proche de celui des photorécepteurs des yeux composés des insectes. La mélanopsine a son pic de sensibilité dans le bleu, ce qui rend la lecture prolongée sur écran électronique (plus généralement sous un éclairage à LED riche en bleu) particulièrement inappropriée tard le soir...

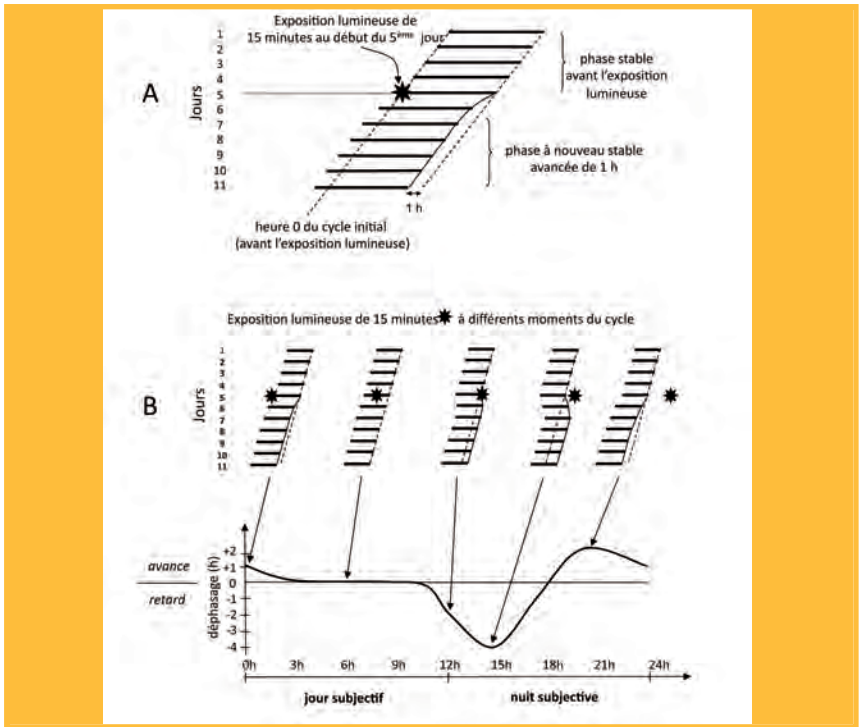


Figure 2 :

Déphasage de l'activité d'un organisme diurne par une courte exposition à la lumière. Le principe de l'expérience est indiqué en A. En conditions constantes, la phase d'activité (segment noir) est déterminée par l'horloge circadienne, dont la période est ici inférieure à vingt-quatre heures, d'où le décalage progressif vers la gauche. Au 5^{ème} jour, l'organisme est exposé à quinze minutes de lumière intense, au tout début de sa phase d'activité, qui définit son jour subjectif. Au bout d'un jour ou deux, on constate un décalage de son rythme d'activité : son horloge a été légèrement avancée. Cette expérience peut être menée à différents moments du cycle d'activité, comme indiqué en B. Le décalage produit par la lumière est fonction de l'heure, ce qui se traduit par une «courbe de réponse de phase».

Les horloges du vivant, A. Klarsfeld, éd. O. Jacob, 2009

Il est impossible, dans le cadre de ce court article, de détailler davantage ce qui est actuellement connu des mécanismes moléculaires de remise à l'heure de nos horloges. Mentionnons seulement que les mammifères, dont nous autres humains, font figure dans ce domaine de malvoyants. Dans toutes les autres espèces animales, les horloges présentes dans tous les organes n'ont en effet pas besoin des yeux, elles peuvent aussi percevoir la lumière directement. La remise à l'heure des nôtres, en revanche, passe par une horloge centrale, située dans le cerveau, et véritable chef de l'orchestre circadien.

Lumière et saisonnalité

Les horloges et la lumière jouent aussi un rôle crucial pour la reproduction, tant animale que végétale, et plus généralement l'adaptation aux saisons. La plupart des organismes qui vivent en-dehors des zones équatoriales doivent respecter des rythmes saisonniers stricts, sous peine de mort pour eux-mêmes ou leur descendance. Si les biches mettaient bas en décembre, leurs faons auraient bien peu de chances d'atteindre l'âge adulte. Pensez aussi à la fourmi de La Fontaine, que son insouciance estivale amène, *quand la bise fut venue, à crier famine*.

Quel est alors le signal qui indique le moment d'accumuler des réserves alimentaires, ou de chercher un partenaire sexuel ? La température peut accélérer ou ralentir le processus. Mais elle ne constitue pas un signal très fiable, d'une part parce qu'il faudrait l'intégrer entre le jour et la nuit, et surtout parce que ses variations peuvent être très importantes, en seulement quelques jours. D'où des fruits ou des fleurs qui gèlent parfois sur les arbres...

Le signal principal est connu depuis les années 1920 : il s'agit des variations de longueur du jour et de la nuit entre les deux solstices (hiver et été). L'amplitude de ces variations croît avec la latitude. En France, elle est d'environ 8 h, soit un tiers de la durée totale du jour. Les chronobiologistes appellent *photopériode* la durée d'éclairement quotidien, ce qui a l'avantage d'éviter l'ambiguïté du mot jour, qui désigne aussi les vingt-quatre heures du cycle complet... mais aussi l'inconvénient d'évoquer la période d'un rythme.

Les organismes vivants, végétaux comme animaux, sont sensibles à la photopériode. Ils la mesurent en général avec leurs horloges circadiennes. Comment ? En résumé, le fonctionnement de ces horloges définit chaque jour une plage limitée de sensibilité à la lumière. Sa durée est propre à chaque espèce, de même que l'effet de la lumière. Ainsi, pour certaines espèces, tant que le jour est trop court, il n'empiète pas sur la

plage photosensible quotidienne, et les processus de reproduction restent en sommeil. Dès que la durée du jour dépasse le seuil, en revanche, la lumière peut agir et déclencher la fameuse *saison des amours*. A noter que celle-ci ne correspond pas forcément au printemps. Si la gestation dure plusieurs mois, comme par exemple chez le renard, l'accouplement aura lieu au tout début de l'hiver. Ainsi les petits naîtront-ils toujours à la saison la plus propice à leur survie et à leur croissance.

L'une des démonstrations les plus frappantes de ce phénomène est donnée par des graphiques comme celui de la (figure 3).

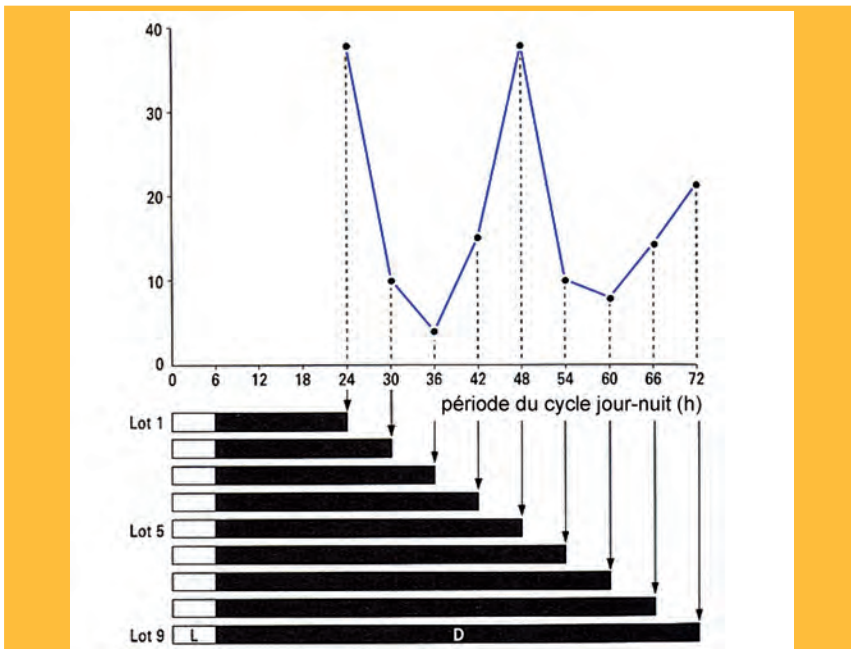


Figure 3 :

Effet de la durée du cycle jour–nuit sur la reproduction d’un organisme saisonnier. Une même photopériode courte, de six heures seulement, peut être associée à l’activation ou à l’inhibition de la reproduction (indiquée en unités arbitraires sur l’axe vertical). Tout dépend de la durée totale du cycle lumière–obscurité (L–D, axe horizontal). On observe des maxima pour des durées de 24, 48 et 72 h, séparés par des minima à 36 et 60 h. Pour ces derniers cycles, la lumière tombe une fois sur deux pendant la fenêtre de sensibilité de l’organisme, qui revient toutes les vingt-quatre heures environ, sous le contrôle de l’horloge circadienne. La reproduction est alors inhibée. Chez les animaux, dans la nature, cette situation se retrouve par exemple chez le mouton ou le renard. Leurs fonctions reproductives ne se mettent en route que lorsque les jours sont devenus assez courts (après le solstice d’été).

Adapté de *Les rythmes du vivant*, Boissin et Canguilhem, Nathan-CNRS Ed., 1998

En ordonnée, il peut s'agir de l'activation testiculaire d'un animal, ou du nombre de fleurs produites par une plante. L'axe horizontal indique la durée du cycle lumière-obscurité auquel les organismes ont été soumis pendant l'expérience.

Cette durée variait d'un groupe expérimental à un autre, mais en conservant toujours la même photopériode. On observe une alternance régulière de pics (et de creux) toutes les vingt-quatre heures. Elle démontre que ce n'est pas tant la durée absolue d'éclairement qui compte, mais où elle se situe dans des fenêtres consécutives de vingt-quatre heures.

Il y a donc une forme de *résonance* entre la récurrence de la lumière et un cycle endogène de l'organisme, dont la période est de vingt-quatre heures environ.

A. K.

Pour en savoir plus :

Jean BOISSIN et Bernard CANGUILHEM, *Les rythmes du vivant*, Nathan-CNRS Ed., 1998.

André KLARSFELD, *La controverse des horloges biologiques*, *La Recherche*, n°351, 44-7, 2002.

André KLARSFELD, *Les horloges du vivant – comment elles rythment nos jours et nos nuits*, Odile Jacob, 2009.

Albert GOLDBETER, *La vie oscillatoire – au cœur des rythmes du vivant*, Odile Jacob, 2010.

<http://www.hhmi.org/biointeractive/clocks/> (en anglais, avec des animations et conférences vidéos)

<http://circadiana.blogspot.com/> (en anglais)



tangente

l'aventure mathématique

Le magazine de l'aventure mathématique

Unique revue mathématique accessible à tous, *Tangente* propose, tous les deux mois, de « décoder » le présent sous l'angle des maths.

Les mathématiques font partie de notre culture

Tangente pose un regard différent sur les grands thèmes scientifiques et lance des passerelles entre mathématiques, jeux, histoire, arts et société.

Chaque trimestre, un hors-série explore divers sujets (architecture, musique, peinture, sculpture, littérature, poésie...). Ces hors-séries existent sous deux versions : **magazine** (en kiosque, pour découvrir)

et « **Bibliothèque** » (en librairie, pour approfondir).



3 formules d'abonnement :

- Simple (*Tangente*, 6 n^{os} par an)
- Plus (avec 4 hors-séries « kiosque » par an)
- Superplus (avec 4 hors-séries « bibliothèque »)

Rendez-vous sur
www.infinimath.com



Art et lumière De l'observation optique à l'absorption sensorielle

Hélène Mugnier

Historienne de l'art

L'art est ce qui rend la vie plus intéressante que l'art.

Robert Filliou

La lumière, vecteur d'exploration du réel pour les peintres classiques

Avant que les disciplines ne se scindent au XVII^e siècle, artiste et scientifique pratiquaient le même métier, l'étude du réel visible, à partir d'une observation attentive, pour en décoder les mécanismes et en dégager les permanences. C'est à ce titre d'abord que la lumière et ses effets sont au cœur des préoccupations techniques des peintres européens, à la fois comme condition de l'observation optique et comme vecteur de lisibilité du réel. La peinture est ainsi pour Léonard de Vinci ou Albrecht Dürer partie prenante d'une étude méthodique de la réalité et le tableau, conçu comme *une fenêtre ouverte sur le monde*, doit offrir au spectateur un espace de connaissance et de compréhension du monde, une *cosa mentale*. Sa réussite dépend donc de son niveau d'illusionnisme, de sa capacité à tromper l'œil du spectateur en prolongeant de manière convaincante son espace physique dans l'espace de la représentation. Corollaires de la perspective mathématique théorisée par Alberti en 1425, la lumière est le moyen décisif permettant de rendre tangibles les volumes.

Dans l'art classique occidental pourtant, la lumière n'est pas seulement un objet d'étude scientifique. Elle a aussi valeur symbolique. Les horizons limpides et la lumière solaire naturelle dominent la peinture de la Renaissance, ils sont à la fois le signe d'une ère de certitudes reconstituées et de confiance retrouvée en l'homme, ils sont aussi le symptôme d'une présence divine bienveillante. Le clair-obscur met en évidence

les incertitudes de la connaissance au contraire, comme en témoignent les paysages montagneux noyés dans le *sfumato* de Léonard de Vinci ou les éclairages nocturnes contrastés de Rembrandt et Caravage. Jusqu'au XIX^e siècle, si le symbolisme religieux chrétien a continué de connoter la lumière d'une signification divine, sa transcription picturale était donc le signe d'une exploration méthodique du réel, de la connaissance et de la capacité de l'homme à comprendre ses phénomènes. C'est en quoi elle accompagnait étroitement les avancées scientifiques contemporaines.



Léonard de Vinci, L'annonciation, 1475.
Galerie des Offices, Florence

L'impressionnisme ou le sommet de l'art optique

Entre 1865 et 1880, l'impressionnisme marque une étape charnière, tant sous la pression d'une invention technique que dopé par les découvertes récentes de l'optique. Cette innovation picturale naît en effet de l'impasse dans laquelle sont acculés les peintres après l'invention de la photographie. Si la peinture est bien toujours le lieu du réalisme optique, alors comment dépasser la précision de la technique photographique ? Monet, Renoir et leurs collègues répondent magistralement en concentrant leurs efforts d'observation, non plus sur la description du réel lui-même, mais sur celle de la lumière et ses effets. «*Le motif est quelque chose de secondaire, ce que je veux reproduire, c'est ce qu'il y a entre le motif et moi. (...) Je veux peindre l'air dans lequel se trouve le pont, la maison, le bateau. La beauté de l'air où ils sont, et ce n'est rien d'autre que l'impossible*». Comme l'explique Monet, le défi était redoutable : dépeindre une donnée immatérielle, la lumière, qui plus est mobile et changeante ! Relevé haut la main après une dizaine d'années d'expérimen-

tation tâtonnantes et de partage de savoir-faire au coude-à-coude, il débouche sur une innovation sans précédent : le mélange optique, c'est-à-dire l'application sur la toile de multiples touches colorées, sans mélange préalable sur la palette.

Face aux paysages impressionnistes, c'est désormais l'œil du spectateur (et non plus le pinceau de l'artiste) qui opère la synthèse optique. Le dessin de contour disparaît dans leurs toiles au profit d'une touche frag-

mentée, floutant le motif. Leurs sujets de prédilection ? La nature extérieure, en particulier l'eau ou la neige, c'est-à-dire les éléments les plus impactés par la diffraction lumineuse, et les plus déstabilisants pour l'œil humain. Nul doute que le traité du chimiste Michel-Eugène Chevreul sur les *Lois du contraste simultané des couleurs*, publié en 1839, a alors fourni aux artistes un solide point d'appui pour décomposer le spectre coloré de la lumière de manière convaincante, en tenant compte en particulier des couleurs primaires et de leurs interactions dans l'œil humain. Les ombres ne sont plus grises mais bleutées et les jeux de contraste entre couleurs primaires sont exploités pour intensifier la luminosité.



Illustration, Michel-Eugène Chevreul,
De la Loi du contraste simultané des couleurs, 1839

Résultat : leurs paysages, plus vrais que nature, nous procurent encore aujourd'hui l'illusion saisissante d'une immersion vivante dans la nature.

Pour autant, l'impressionnisme ne saurait évidemment se résumer à l'application des théories optiques de Chevreul. Leur réussite dans la transcription de la lumière doit bien plus à un talent intuitif et sensible. «*Monet, ce n'est qu'un œil, mais bon Dieu, quel œil !*» soupirait Cézanne.

Une trouvaille industrielle en apparence anodine a joué un rôle essentiel dans l'aventure : le tube en étain. Ce petit outil transportable en exté-

rieur, aussi aisément que la boîte d'aquarelle, est bien le secret de la fraîcheur inégalée des paysages impressionnistes. Il a rendu possible de peindre face au motif, et non plus de reprendre en atelier des esquisses saisies sur le vif. C'est toute la différence entre la lumière d'un paysage classique, fût-il signé Claude Lorrain ou Camille Corot, et celle de *La Pie* de Monet ! L'obsession illusionniste des peintres depuis la



La Pie, Claude Monet, 1869,
Musée d'Orsay

Renaissance atteint bien un sommet avec l'impressionnisme. Comment aller plus loin ? La photographie en couleurs et le cinéma resserrent l'étai d'exigence et les efforts scientifiques revendiqués par Paul Signac et Seurat, avec le Pointillisme dans les années 1880, ne parviendront pas à rivaliser davantage avec la technique.

Conséquence radicale : dès 1900, une rupture s'impose. «*La peinture ne doit pas être exclusivement visuelle ou rétinienne. Elle doit intéresser aussi la matière grise, notre appétit de compréhension.*» Marcel Duchamp réfute ainsi la course au *vérisme illusionniste* et propose aux artistes de revoir leurs ambitions. Au même moment, la science et la physique opèrent un basculement décisif face au phénomène lumineux. Depuis le XVII^e siècle, la nature de la lumière faisait l'objet d'un débat non tranché : les héritiers de Huygens défendaient l'hypothèse d'une onde tandis que ceux de Newton privilégiaient la piste d'une particule. La théorie ondulatoire qui avait dominé le XIX^e siècle légitimait en

quelque sorte la fascination pour traquer une matérialité de la lumière, celle-là même que semblaient avoir apprivoisée les Impressionnistes grâce à leurs talents de coloristes. Leur travail n'en était que plus héroïque. Mais voilà qu'autour de 1900–1905 justement, Einstein puis Planck émettent l'hypothèse du *photon*, soit une particule constitutive de la lumière, pour expliquer son transfert d'énergie dans l'effet photo-électrique. Dès 1926 (invention du photon), leur intuition se précise et la lumière est désormais définie comme duelle, à la fois onde et particule. Le diagnostic de Marcel Duchamp face à l'impasse de *l'art rétinien* trouve un écho direct dans cette approche contemporaine des physiciens. Désormais, «*L'art ne rend pas le visible, il rend visible*» conclut Paul Klee. Quelle place nouvelle peut-il alors faire à la lumière ?

L'art comme expérience physique et sensorielle de la lumière

Dans la peinture du XX^e siècle, les recherches chromatiques prolongent la trouvaille impressionniste. Celles de Matisse, puis de Robert et Sonia Delaunay (par exemple), illuminent leurs toiles et s'affranchissent de tout dévoilement du réel figuratif au profit d'une abstraction suggestive. Par ailleurs, l'explosion industrielle procure de nouveaux outils techniques d'éclairage artificiel dont s'emparent très vite les artistes. Après les magies de la *fée électricité*, Dan Flavin introduit des tubes de néon dans ses installations. Cette nouvelle place que l'art invente pour la lumière ne cherche plus à rendre le monde lisible pour le spectateur. Elle lui substitue une nouvelle poétique, énigmatique et suggestive, qui s'affirme à partir des années 1950.

Pierre Soulages propose avec ses monochromes noirs une réinterprétation picturale fulgurante de la lumière. L'application striée, rayée, balafmée de la matière pigmentée produit des effets de surface étonnamment lumineux, que l'artiste a appelés *noir lumière* puis *outré-noir*. «*Par là j'entends surtout le champ mental que ça ouvre pour celui qui regarde* explique-t-il. *L'espace de la toile n'est plus sur la toile, il est devant la toile, et vous qui regardez, vous êtes pris dans cet espace-là, vous êtes dans l'espace de la toile (...)*

Pierre Soulages, *Peinture*, 2008.
Collection particulière

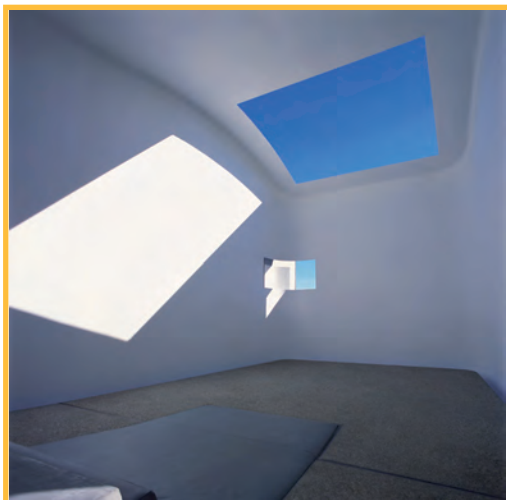


Se déplacer dans l'espace, c'est introduire la dimension du temps.» La lumière n'est plus un sujet pour le peintre mais un objet artistique à part entière. Le tableau se transforme en expérience sensorielle absorbant littéralement le spectateur dans un nouvel espace-temps.

La lumière dans l'art contemporain quitte donc l'espace de la peinture pour conquérir, voire élargir, celui du spectateur. D'ailleurs, c'est probablement hors du champ pictural lui-même et dans des installations pluridisciplinaires qu'on peut en observer les manifestations les plus abouties. Si l'artiste américain James Turrell invoque volontiers Monet comme référence à ses propres travaux, lui-même crée de véritables *environnements perceptuels* à partir de la lumière, qu'elle soit naturelle ou artificielle. En effet, *« nous ne pouvons entrer dans le XXI^e siècle en réfléchissant à partir de la théorie chromatique, argumente-t-il, nous devons penser la lumière additive avec un spectre comparable à celui du son »*. Ses Skyspaces consistent en des pièces aménagées de bancs pour les visiteurs et dont le plafond est percé sur le ciel. Le dispositif est d'une simplicité radicale, les corps baignent dans une luminosité diffuse, les regards s'élèvent irrésistiblement pour absorber la lumière en face, l'expérience immersive transporte le spectateur dans une autre dimension.

L'artiste a même acheté en 1979 un volcan en Arizona, le Roden Crater, qu'il a dédié à la contemplation du ciel. Avec la lumière comme principal matériau de création, Turrell développe une ambition qui dépasse

largement la perception visuelle : *« La lumière affecte le corps mais aussi le cerveau et l'âme (...) Ce qui m'intéresse dans la lumière, c'est la qualité de pensée qui s'en dégage. Une pensée sans mots, différente de nos modes de pensée habituels. »* Diplômé en philosophie, en art et en mathématiques, il n'est pas le seul à travailler la lumière sur ce mode immersif et pluri-sensoriel mais il revendique explicitement la référence aux découvertes scientifiques contemporaines.



James Turrell, *Skyspace*.

«*Mes œuvres n'illustrent pas des principes scientifiques mais je veux qu'elles expriment une certaine conscience, une certaine connaissance.*» De sorte qu'avec lui s'opère un curieux renversement de situation : la lumière comme phénomène ni strictement ondulatoire, ni vraiment corpusculaire, redevient une énigme fascinante pour l'homme. L'expérience physique qui en est faite dans ses installations renoue avec une forme de matérialisme spirituel. Le corps et l'esprit, l'espace et le temps, la finitude humaine et l'infini de la nature sont simultanément convoqués.

C'est un drôle de pied de nez que l'art contemporain semble nous adresser, comme en écho à la perte de repères induite par la physique quantique. Irréductible à l'analyse rationnelle, la lumière s'y affiche comme un mystère insondable dont l'expérience nous ouvre l'accès à l'infini, sinon au sacré. «*Chez Rembrandt, Seurat, Turner, ce ne sont pas les aspects anecdotiques, temporels, qui comptent mais leur relation spirituelle à la lumière, à l'espace et au temps qu'ils nous transmettent et nous rendent perceptibles*». Ainsi Turrell boucle-t-il la boucle avec une histoire séculaire. La lumière dans l'art garde l'épaisseur de tous ses secrets. Plutôt que de l'utiliser comme un outil de dévoilement du réel, au service d'une *science positiviste*, les artistes contemporains nous invitent à en investir toutes les dimensions sensorielles, au risque d'un plongeon dans l'éternité. La poésie répond à la science sur le ton de l'humilité et renoue avec un émerveillement médusé. Voilà qui donne à réfléchir sur notre culte contemporain de l'innovation et notre aspiration à un progrès linéaire...

H. M.

Pour en savoir plus :

Hélène MUGNIER, *Quand la nature inspire les peintres*, éditions Plume de Carotte (2012)

Jean-Marc LEVY-LEBLOND, *La science n'est pas l'art*, éditions Hermann (2010)

Hélène MUGNIER : <http://artetnous.typepad.com/>

Le Comité International des Jeux Mathématiques propose pour les enseignants et le grand public :



des éditions pédagogiques



des expositions



des jeux

des animations

et

le salon annuel
Culture et Jeux
Mathématiques



www.cijm.org

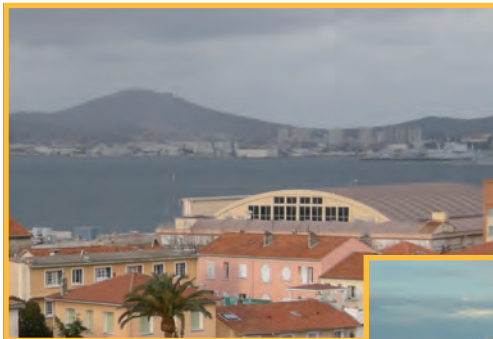
Ombres, couleurs et lumières dans les arts graphiques

Hervé Lehning

Agrégé de mathématiques,
journaliste et écrivain scientifique

*Que la lumière soit... et la lumière fut (La Bible, Genèse 1).
Ce n'est pas un hasard si l'auteur du premier chapitre de la Genèse
a placé la création de la lumière en tête, car elle est la condition
de toute vie mais aussi de toute perception, des formes comme
des couleurs. Elle est à la source des ombres et son étude établit
des ponts entre mathématiques et art.*

Sous des lumières différentes, le même paysage donne des impressions différentes, comme le montrent ces deux photographies de la rade de Toulon sous les nuages. La différence essentielle est que, dans la seconde photographie, un rayon de lumière vient illuminer les bâtiments en premier plan et créer des ombres. Les couleurs en sont également modifiées. Certains bâtiments passent du rose au jaune ou même au noir !

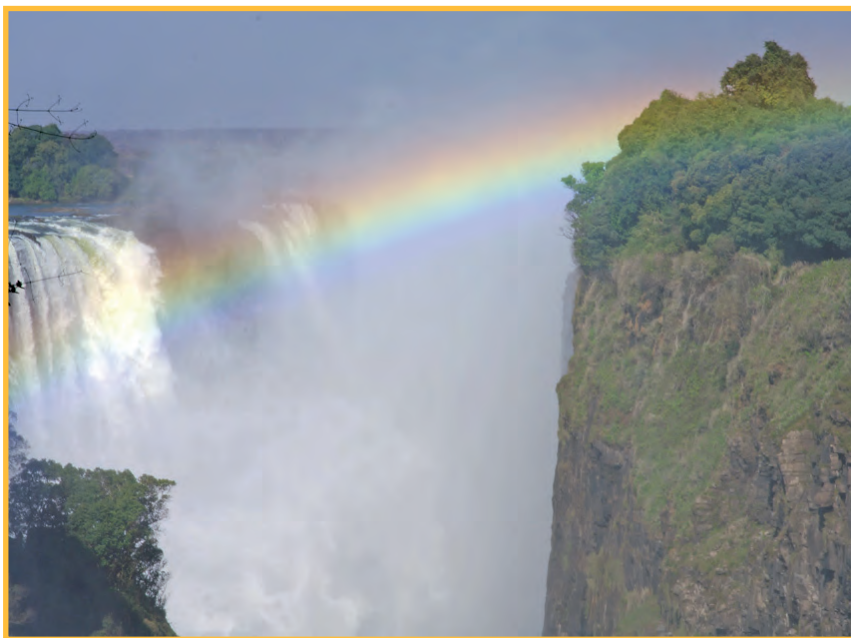


Vue de la rade de Toulon
sous les nuages, avec ou sans
rayon de soleil.



© Hervé Lehning

La couleur n'existe pas en elle-même, elle correspond à notre perception des ondes lumineuses qui, mathématiquement parlant, sont analogues aux ondes acoustiques. L'ensemble des longueurs d'onde de la lumière visible constitue le spectre de la lumière. Il s'étend du violet, dont la longueur d'onde est de 400 nanomètres, au rouge, dont la longueur d'onde est de 700 nanomètres. Au-delà de ces longueurs d'onde, la lumière devient invisible et on entre dans le domaine de l'ultraviolet, dont les rayons sont responsables du bronzage de la peau et dans l'infrarouge ou rayonnement calorifique. On retrouve ces diverses couleurs dans les arcs-en-ciel.



Les différentes couleurs du spectre chromatique, du violet au rouge et de bas en haut, se retrouvent dans cet arc-en-ciel apparaissant au-dessus des chutes du Zambèze.

© Hervé Lehning

La même théorie mathématique, inventée par Joseph Fourier (1768 – 1830), permet de décomposer les ondes sonores et les ondes lumineuses en sommes d'ondes élémentaires, dites *harmoniques* en acoustique et ondes *monochromatiques* en optique. Dans ce dernier cas, celles qui correspondent au spectre visible sont appelées *couleurs pures*.

Les couleurs telles que nous les voyons dépendent de trois types de récepteurs compris dans nos yeux. Dans chaque onde, chacun capte la part à laquelle il est sensible, notre cerveau réalise la synthèse. Le système RVB, utilisé en photographie, imite ce principe naturel : on ajoute du rouge, du vert et du bleu pour obtenir toutes les couleurs. On retrouve le principe de la décomposition précédente, en la limitant à trois couleurs pures. Le système CMJN, utilisé en imprimerie, est fondé sur un principe soustractif mais aboutit à un résultat identique.

Sans lumière, pas d'ombres

De même, la lumière crée l'ombre. Le photographe, le dessinateur comme le peintre jouent avec cette propriété. L'ombre accentue les formes des objets ou en crée d'étranges.

La lumière, venant de l'autre côté de l'opéra de Sydney, crée une ombre qui souligne les formes.

© *Hervé Lehning*



Les dessins d'architecture comportent des ombres portées d'un objet sur un autre, ce qui peut donner des courbes étonnantes. On peut les photographier ou les prévoir d'avance, ce qui autrefois prêtait à des constructions de géométrie descriptive intéressantes. Elles sont aujourd'hui réalisées automatiquement à travers des logiciels de géométrie.

Ombres portées sur les toits de la Charité à Marseille.

© *Hervé Lehning*



Il arrive de plus que les ombres prennent des formes étranges ne semblant plus rien à voir avec l'original, comme sur la photographie suivante qui constitue une anamorphose d'un taureau chargeant un toréador.

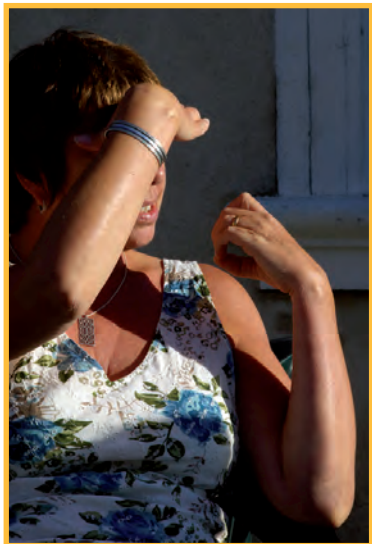


Ombres portées sur le sol d'un taureau chargeant un toréador dans les arènes d'Arles.

© Hervé Lehning

Le clair-obscur

La lumière permet enfin de mettre l'accent sur un personnage et de le modeler, comme sur la photographie suivante où il met en valeur le mouvement des bras du personnage. Certains studios sont réputés pour ce type de photographies qui sculptent les personnages.



Le mouvement des bras de la femme sur cette photographie est mis en valeur par le jeu de lumière et d'ombre.

© Hervé Lehning

Avant que cette technique ne soit exploitée en photographie, elle a été particulièrement utilisée par des peintres comme Georges de La Tour (1593 – 1652)

à l'époque classique. Dans *Le Nouveau-Né*, l'accent est mis sur celui-ci grâce au rayon de lumière envoyé par la bougie cachée par la main de la femme à gauche.

Le Nouveau-Né par
Georges de La Tour.



De même, la lumière est au centre de la révolution impressionniste. D'une manière presque mathématique quand on pense à l'analyse de Fourier, les impressionnistes n'utilisent que des couleurs primaires et c'est leur reconstitution dans l'œil, ou plutôt dans le cerveau du spectateur qui crée l'impression générale.

L'aboutissement de ce courant se trouve sans doute dans les œuvres de Vincent Van Gogh (1853–1890).

Terrasse de café le soir par
Vincent Van Gogh.



La lumière et ses reflets

C'est de même la lumière qui crée les reflets sur l'eau comme dans cette photographie prise un jour d'orage où les jeux de lumière sont visibles. On y voit également son influence sur les couleurs. La scène originale pouvait ainsi être vue de plusieurs manières.

Le grand canal du parc de Sceaux
avant l'orage.

© *Hervé Lehning*



Nous retrouvons ces effets dans nombres d'œuvres figuratives mais aussi dans les fameux noir-lumière de Pierre Soulages.



Tableau de *Pierre Soulages* (né en 1919).

Conclusion

Comme nous l'avons vu, seule la lumière donne un sens aux œuvres plastiques, que ce soit en photographie, en dessin ou en peinture. Les mathématiques ne sont bien entendu pas nécessaires pour les concevoir mais elles les structurent que ce soit dans l'analyse spectrale de la lumière ou dans ses jeux. Les logiciels de dessin utilisent d'ailleurs un grand nombre de techniques mathématiques, même si elles restent invisibles à l'utilisateur.

H. L.

Cette brochure placée sous le parrainage de
Jean-Pierre Luminet

a été réalisée par le
Comité International des Jeux Mathématiques
sous la direction de
Marie José Pestel

Imprimée grâce à
la Mairie de Paris et Sciences sur Seine,
la Région Île-de-France,
l'INRIA, Cap'Maths, le CNRS, l'UPMC
le Crédit Mutuel Enseignant et les éditions POLE

Elle réunit les signatures de

Jean-Pierre Luminet
Jean-Philippe Uzan
Pierre Lauginie
Suzanne Débarbat
Claude Fabre
Roger Ferlet
Sylvain Chaty
Bernard Maitte
Sylvain Gigan
Michel Blay
Lucile Julien
André Klarsfeld
Hélène Mugnier
Hervé Lehning

et bien d'autres encore que vous retrouverez sur le site du CIJM
sous le titre *Maths Lumière express - complément d'enquête*

**Que tous ces auteurs soient ici remerciés
pour leur enthousiasme, leur patience et leur gentillesse.
Grâce à eux, nous espérons que le lecteur prendra plaisir
à découvrir que mathématiques et lumière
sont essentielles dans l'histoire des hommes,
de leurs cultures et de leur avenir.**

Merci aussi aux relecteurs Edouard Thomas et Martine Clément.

Réalisation : Patrick Arrivetz

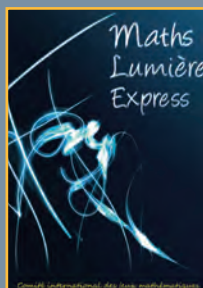
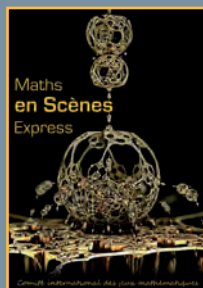
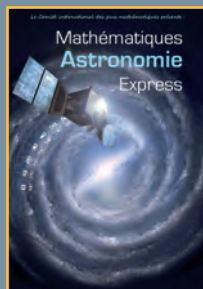
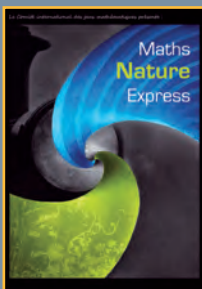
Maquette de couverture et bandeau : Elsa Godet - www.sciencegraphique.com

Brochure imprimée sur les presses de CIA GRAPHIC - 03 86 90 96 10



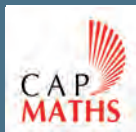
Maths express

une collection CIJM - www.cijm.org





2015
ANNÉE DE LA LUMIÈRE
EN
FRANCE



MINISTÈRE
DE L'ÉDUCATION NATIONALE
DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE



CIJM
IHP

11 rue Pierre et Marie Curie
75231 Paris Cedex 05

www.cijm.org