

Jean Audouze
Costel Subran
Michel Menu

Préface de Gérard Mourou

LUMIÈRES

Photo de couverture : Harpe de lumières (détail) – Sculpture en cristal de Christopher Ries,
<https://www.christopherries.com/artwork/crystal/gallery>

Conception graphique et mise en pages : CB Defretin, Lisieux

Imprimé en France

ISBN (papier) : 978-2-7598-2363-5 – ISBN (ebook) : 978-2-7598-2522-6

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences, 2020

Lumières

Jean Audouze
Costel Subran
Michel Menu

Préface de Gérard Mourou

Préface



La lumière est essentielle pour la vie. Elle est célébrée par tous, dans des champs différents, en poésie, en peinture, en philosophie, en politique, en biologie et en physique bien-sûr. La lumière est un support en architecture, pour l'éclairage urbain, pour l'éclairage routier et la régulation de la circulation, pour la photographie. La branche de la physique qui étudie la lumière est principalement l'optique, la lumière étant un phénomène physique qui peut produire un phénomène visuel.

La décade passée a vu l'attribution de plusieurs prix Nobel de physique dans le domaine de la lumière ce qui montre l'importance de cette discipline : pour les développements à venir, les applications multiples dans le domaine des ordinateurs et des télécommunications. C'est ainsi que l'on peut concevoir que le xx^e siècle sera le siècle de photonique, comme le xx^e siècle fut celui de l'électronique, pour les données informatisées, pour la domotique, pour les transports et la communication. Plus généralement, la lumière est universellement associée à la connaissance.

Étudier la lumière comme onde électromagnétique ou comme photon permet de comprendre l'essentiel de notre environnement physique : la réfraction de la lumière qui se propage d'un milieu à l'autre, la diffusion et la diffraction lors de ses interactions avec la matière, les interférences enfin où la notion de cohérence est apparue pour concevoir des expériences avec des conditions optimisées pour réaliser des franges d'interférence avec un contraste suffisant. Theodore Maiman est en 1960 l'inventeur du laser, source de lumière cohérente intense grâce à un processus d'amplification optique fondé sur l'émission stimulée de rayonnement. Dès lors, le laser permet de nouvelles découvertes dans les laboratoires de recherche, avec des applications fantastiques dans l'industrie : l'holographie par exemple. Le traitement des images est également un riche domaine qu'ouvre l'optique cohérente. Les lasers trouvent des applications en médecine, pour soigner la myopie, pour réparer les décollements de rétine, des applications en industrie pour la découpe des matériaux par laser, etc., les lasers de puissance permettent de penser à la gestion des déchets jusqu'à la désintégration de ceux qui se trouvent dans l'espace, de songer aussi aux traitements des déchets radioactifs, dans le domaine de la restauration de déverner et enlever des repeints intrus des œuvres fragiles d'art, voire de régénérer des couleurs disparues de certains pigments.

La connaissance précise de toutes les propriétés de la lumière à toutes les longueurs d'onde, des rayons X à l'infrarouge jusqu'aux ondes centimétriques et radio, permet d'expliquer la physique de l'univers, de découvrir de nouveaux astres, planètes, étoiles, nébuleuses, amas de galaxies, toujours en quête de la matière noire. Dans le domaine de la science du patrimoine, domaine interdisciplinaire qui vise à mieux

comprendre et préserver les œuvres du patrimoine culturel et naturel, la lumière révèle les dessous des œuvres, les témoins de leurs transformations ou les modifications au cours du temps, les restaurations qu'elles ont subies. Le livre réunit donc ces trois aspects de la lumière ; les trois auteurs, spécialistes de leur domaine, montrent en abordant les lasers, l'astrophysique et la science du patrimoine, comment la lumière peut être source de connaissance et objet de pensée.

Comment aussi, ces disciplines peuvent être reliées, si lointaines en apparence, dans une première approche, et si proches pourtant dans leurs méthodes, leur commune façon d'aborder les questions pour trouver des solutions. Aussi naturellement on célébra en 2010 le cinquantième anniversaire de la découverte des lasers au Louvre, à l'observatoire de Paris et à l'École Polytechnique de Palaiseau.

J'ai eu l'intuition que la démonstration géniale de la nature ondulatoire de la lumière par Augustin Fresnel en 1815 ouvrait des voies nouvelles de réflexion pour les artistes peintres du XIXe siècle. Une journée de conférence a été organisée au Louvre dans le grand auditorium sous la pyramide de Pei qui a réuni des physiciens, des historiens d'art, des artistes pour réfléchir à cette possible filiation. En 2015, l'année précisément inscrite par l'ONU comme année internationale de la lumière, le musée du Louvre et l'École polytechnique, deux institutions créées à un an d'intervalle, respectivement en 1793 et 1794, dans le contexte de la révolution française, s'associaient pour répondre à cette question : le savoir de la nature vibratoire de la lumière a-t-il influé sur la pratique artistique des peintres ? En 1815, Fresnel explique, à rebours de la doctrine qui attribuait depuis Newton notamment à la lumière une nature corpusculaire, qu'il fallait la considérer comme une onde. En même temps la peinture se transforme en profondeur. Grâce au physicien David Brewster (1781-1868), célèbre pour ses travaux sur la polarisation de la lumière, grâce au peintre Turner (1775-1851), les impressionnistes et les artistes des écoles suivantes ont cherché de nouvelles manières de représentation où la couleur, la vibration des couleurs et de la lumière deviennent l'objet des recherches des peintres.

Art et science ont toujours navigués de conserve au grand bénéfice de la société. De l'artiste géomètre Filippo Brunelleschi inventant la perspective au mathématicien astrophysicien Roger Penrose, nouveau Prix Nobel découvrant le triangle de Penrose, l'un se nourrit de l'autre. Les deux recherchent, l'élégance et l'éloquence.

C'est en démontrant la nature ondulatoire de la lumière que Fresnel certainement influençait Turner et Constable provoquant le mouvement impressionniste. L'approfondissement de sa nature conduisait à la découverte de l'électromagnétisme. Sa nature quantique, la relativité restreinte et générale débouchaient sur l'hypothèse de l'émission stimulée, du laser et de toutes ses applications sociétales. La peinture ne restait pas derrière. Elle était influencée par la dynamique de ces progrès séminaux, provoquant une foison de styles nouveaux avec Gustave Klimt, Édouard Manet, Pablo Picasso, Georges Braque. Cet ouvrage, souligne bien ce parallèle tout en ajoutant l'immense contribution de la lumière à la société avec le l'éclairage, l'industrie, le médical, l'espace, l'environnement et l'énergie. Un grand merci aux auteurs de cette belle initiative.

Gérard Mourou

Avant-propos

Le récit biblique de la création divine du monde commence par l'apparition de la lumière. D'ailleurs la physique à notre échelle est mue par deux interactions fondamentales : la gravité, qui nous colle à la surface de la Terre et qui est l'origine de sa rotation autour du Soleil, et la lumière, qui nous permet de voir notre environnement et qui est la source d'une très grande partie de l'énergie nous permettant de vivre et d'agir. La mécanique est la branche de la physique consacrée à la gravité tandis que l'optique est concernée par la transmission de la lumière.

Compte tenu de son importance non seulement en physique mais aussi dans nos vies et dans ses manifestations techniques et artistiques, notre collègue John Dudley, professeur de physique à l'université de Besançon, réussit à convaincre d'abord l'UNESCO de faire en sorte que l'année 2015 soit déclarée « Année internationale de la Lumière ». Puis, en 2017, sous son impulsion, les Nations unies décidèrent de faire du 16 mai de chaque année le jour international de la lumière. Début 2015, un comité français de la célébration de l'année de la lumière fut créé et l'un de nous (CS) en fut le président. Sous son impulsion, le grand amphithéâtre de la Sorbonne accueillit le 8 janvier 2015, au lendemain du drame de Charlie Hebdo, un important colloque inaugural intitulé « 2015 : l'année internationale de la lumière en France ». Rappelons que le thème de la recherche sur la lumière a permis à quatre physiciens français d'obtenir le prix Nobel : Alfred Kastler en 1966 pour « la découverte et le développement de méthodes optiques servant à étudier la résonance hertzienne dans les atomes », Claude Cohen-Tannoudji en 1997 pour « le développement de méthodes servant à refroidir et à confiner des atomes à l'aide de la lumière laser », Serge Haroche en 2012 pour « les méthodes expérimentales révolutionnaires qui ont permis la mesure et la manipulation de systèmes quantiques individuels » et Gérard Mourou qui nous fait l'honneur et l'amitié de préfacer cet ouvrage en 2018 pour « ses inventions dans le domaine de la physique des lasers ». Notons que les trois premiers ont appartenu au laboratoire de physique de l'École Normale Supérieure.

Au cours de la rencontre à la Sorbonne à laquelle nous avons pris part tous les trois, les grands sujets relatifs à la lumière furent évoqués. On y traita tout aussi bien les aspects scientifiques, philosophiques, sociologiques et artistiques. Cet ouvrage a pour ambition de rassembler les informations et les réflexions relatives à trois domaines emblématiques de l'importance de la lumière dans toutes les activités humaines. En premier lieu, il est bon de rappeler que toute la lumière naturelle est d'origine astronomique, provenant soit du Soleil, le jour, soit plus faiblement de la Lune, des planètes et des étoiles, la nuit. Les lumières du ciel font l'objet du premier chapitre de ce livre. On y présente les usages qu'en font les astronomes pour déchiffrer la nature, la composition et l'évolution du cosmos. Parmi les inventions liées à la lumière, l'apparition des lasers en 1960 est certainement l'une des plus importantes non seulement pour les physiciens, comme en témoigne le nombre de prix Nobel de physique qui leur sont associés mais aussi pour toutes leurs applications dans la vie courante (chirurgie, téléphonie mobile, équipements des voitures...). Le second chapitre leur est entièrement consacré. Enfin (*last but not least !*), les artistes peintres font de la lumière un élément structurant de leurs œuvres. C'est l'objet du troisième chapitre de le démontrer au travers de très nombreux exemples.

Il est naturellement impossible d'évoquer dans un seul livre l'ensemble des concepts et des propriétés liés à la lumière sauf à rédiger une encyclopédie. Mais en regroupant sous un même titre les aspects d'universalité de la lumière, son implication dans les domaines les plus avancés de la recherche scientifique ainsi que son influence très profonde sur la production des artistes peintres, nous estimons que ce livre porte témoignage de l'importance de la lumière dans nos vies, dans notre environnement et dans nos œuvres qu'elles soient artistiques ou scientifiques.

JA, MM et CS

Les auteurs



Jean AUDOUZE est astrophysicien et a accompli toute sa carrière au CNRS. Ses spécialités de recherche sont l'astrophysique nucléaire, la cosmologie et l'évolution des galaxies. Il est actuellement directeur de recherche émérite au CNRS depuis 2007.

Il a dirigé l'Institut d'astrophysique de Paris de 1978 à 1989. Il fut conseiller technique à la Présidence de la République, chargé de la recherche, de la technologie, de l'espace et de l'environnement de 1989 à 1993. Il fut le premier président de l'Établissement public du parc et de la grande halle de la Villette de 1993 à 1996. Il dirigea le Palais de la découverte de 1998 à 2004. Il présida le comité scientifique du Salon européen de la recherche et de l'innovation de 2004 à 2009. Il fut conseiller auprès du président et du directeur général

du CNRS pour le mécénat scientifique de 2008 à 2011. Il présida la Commission nationale française pour l'UNESCO de 2010 à 2014 dont il est devenu président d'honneur en 2015.

Depuis 2017, il préside l'association « Prévenance – apprenons à vivre ensemble » et depuis 2018 il est le scientifique associé au Théâtre de la Ville.

Il enseigna l'astrophysique à l'École polytechnique de 1974 à 1989 ainsi que dans plusieurs universités américaines tout au long de sa carrière. Il anima un enseignement d'ouverture à SciencePo (Paris) consacré à la mise en culture des sciences de la nature de 1990 à 2008. Il est l'auteur ou le coauteur de 22 ouvrages de popularisation de la science et de culture générale.



Costel SUBRAN est président de la F2S – Fédération française des sociétés savantes, un groupement de sociétés scientifiques et techniques françaises ; la F2S englobe la SFP – Société française de physique, la SFO – Société française d'optique, la SEE – Société de l'électricité, de l'électronique et des technologies de l'information et de la communication, la SFV – Société française du vide. En 2010 Costel Subran a été président du Comité national pour l'anniversaire de 50 ans du laser en France et président du Comité national « 2015, année internationale de la lumière en France », comité qui a coordonné tous les événements et manifestations nationales dans le cadre de la célébration proclamée par l'ONU et l'UNESCO de International Year of Light 2015.

Chercheur et professeur des universités, il est expert dans le domaine de lasers et enseigne comme professeur invité au HEC, Université Pierre et Marie Curie, École centrale ; il est auteur de nombreux articles scientifiques et techniques.

Costel Subran, docteur ès sciences, est fondateur et administrateur de plusieurs sociétés de lasers, il a été président-directeur général d'Opton Laser International.

Il est membre de l'EOS – European Optical Society, membre du Corporate Committee of OSA – Optical Society of America, membre du comité de rédaction de la revue Photoniques. Il fut vice-président du CNOP – Comité national d'optique et photonique, maintenant Photonics France, de 2001 au 2016 et vice-président de la SFO. Costel Subran est expert et reviewer en Photonique auprès de la Commission européenne.

Costel Subran est membre du club Rodin ; le club Rodin, Think Tank de la FIEEC, est un laboratoire d'idées, spécialisé dans les industries électriques, électroniques, numériques et de communication.



Michel MENU est directeur du département Recherche du Centre de recherche et de restauration des musées de France (C2RMF) depuis 2001.

Le C2RMF est un service à compétence nationale du Ministère de la Culture. Situé à Paris et à Versailles, il est l'opérateur de l'État dans le domaine de la recherche et de la restauration qui concernent les collections muséales. Le laboratoire sur le site du Carrousel au Palais du Louvre comprend une soixantaine de scientifiques, chimistes, physiciens, historiens d'art est chargé par des méthodes innovantes d'examen et d'analyse de l'expertise et de l'assistance à la restauration des œuvres des 1200 musées de France.

Ingénieur diplômé de l'École supérieure d'optique (1976) et titulaire d'une thèse de docteur-ingénieur en physique/optique de l'université Pierre et Marie Curie, aujourd'hui Sorbonne-université (1978). Habilité à diriger des thèses en physique à l'université Paris-Saclay (1992).

Il intègre le laboratoire de recherche des musées de France en 1980. Il est le responsable du projet AGLAE, système unique d'analyse des œuvres d'art avec la mise en œuvre d'un accélérateur de particules chargées, inauguré en 1989.

Son axe principal de recherche concerne l'étude de la couleur des œuvres d'art : au-delà de la caractérisation chimique des œuvres, l'étude des propriétés physico-mécaniques (couleur, apparence, nano-indentation, rhéologie...) apporte des informations cruciales pour la compréhension des œuvres en ce qui concerne leur élaboration et l'intention des artistes ainsi que pour leur conservation.

Sommaire

1. Les lumières du ciel	1	<i>L'astronomie infrarouge</i>	64
Jean AUDOUZE		<i>L'astronomie des grandes énergies</i> <i>(ultraviolet et rayonnements X et gamma)</i>	64
Introduction : la lumière, un élément fondamental de la physique de l'Univers	2	Quelques mots de conclusion	68
Ce que nous disent les intensités des lumières célestes	6	Bibliographie	69
Ce que nous disent les couleurs des lumières du ciel	22	2. Lumière des lasers	71
Ce que nous disent les couleurs associées avec les intensités des lumières du ciel ..	42	Costel SUBRAN	
<i>Le catalogage astrométrique</i> <i>des étoiles proches</i>	42	Introduction	72
<i>À propos de la détermination du taux</i> <i>d'expansion de l'Univers</i>	44	<i>Nature de la lumière</i>	72
<i>Les diagrammes « couleur-luminosité »</i> <i>des étoiles et leur évolution</i>	46	<i>Qu'est-ce qu'un laser ?</i>	76
<i>La détermination des âges des amas</i> <i>d'étoiles</i>	52	<i>Le laser est né ! Prémisses et naissance</i> <i>du laser</i>	77
Les perturbations subies par la lumière en raison de la présence de la matière ..	54	<i>Inventions et découvertes, brève</i> <i>histoire des applications laser</i>	84
Les lumières non visibles du ciel	58	Type de lasers	85
<i>Les apports de la radioastronomie</i>	60	<i>Lasers à solides</i>	85
		<i>Lasers à fibre optique silicium</i>	92
		<i>Lasers à semi-conducteurs –</i> <i>diodes laser</i>	94
		<i>Lasers à gaz</i>	96
		<i>Autres lasers</i>	98

Quelques applications	100	3. Lumière et art	159
<i>Applications industrielles</i>	100	Michel Menu	
<i>Lasers dans la science</i>	116	Introduction	159
<i>Lasers médicaux, thérapie et diagnostic.</i>	120	La lumière œuvre pour découvrir, restaurer, conserver. L'imagerie multispectrale et multi-échelle	161
<i>Industrie alimentaire</i>	126	<i>Historique, la création du Laboratoire de recherche des musées de France</i>	161
<i>Lasers et LED en agriculture</i>	126	<i>L'examen des œuvres</i>	162
<i>Métrologie laser.</i>	130	<i>Dossier d'œuvre</i>	163
<i>Nettoyage des œuvres d'art, statuares, bas-reliefs par laser</i>	136	<i>La lumière pour les sciences du patrimoine.</i>	196
<i>Lasers pour l'espace</i>	138	La lumière figurée : du clair-obscur à la couleur	199
<i>Détection des ondes gravitationnelles.</i>	144	<i>Les écrits de Léonard : le sfumato, la perspective atmosphérique.</i>	202
<i>Lasers d'extrême puissance Pétawatt et Térawatt</i>	146	<i>Le clair-obscur aux XVII^e et XVIII^e siècles</i>	208
<i>Lasers militaires</i>	146	« Quand la lumière devient couleur ».	214
Impact économique de lasers.	148	Pour conclure, la lumière présente dans les œuvres d'art contemporaines	220
<i>Composants et matériaux</i>	148	Bibliographie	222
<i>Produits photoniques</i>	148		
<i>Produits de masse intégrant la photonique</i>	148		
Conclusion	152		
Bibliographie	156		

Les lumières du ciel

Jean Audouze

« Que la lumière soit, et la lumière fût. »

Début du livre de la Genèse.

« Cette obscure clarté qui tombe des étoiles. »

Pierre Corneille, « Le Cid ».

Introduction : la lumière, un élément fondamental de la physique de l'Univers

L'Univers observable est mû par quatre interactions fondamentales. Les deux premières agissent à très courtes portées, précisément plus petites que le rayon du noyau d'un atome, à savoir un dix mille milliardième de centimètre. La première est dite interaction nucléaire forte, elle assure la cohésion de la matière nucléaire, concentrée effectivement dans les noyaux atomiques. La seconde est dite interaction nucléaire faible, elle est à l'origine de la désintégration radioactive des noyaux atomiques instables. Les deux dernières interactions fondamentales nous sont plus familières : il s'agit de la gravitation qui s'exerce entre les masses de deux entités matérielles et de l'électromagnétisme induit par les mouvements relatifs des charges électriques. Elles ont un point commun et une différence fondamentale : ce sont toutes deux des interactions dont l'intensité décroît en fonction du carré de la distance entre les deux éléments interagissant. Mais leurs intensités relatives sont très différentes (l'électromagnétisme est environ 10^{35} à 10^{36} fois plus intense que la gravité). L'impression de leur similitude vient du fait qu'il n'existe pas d'anti-gravité¹ alors qu'il y a deux polarités différentes dans les charges électriques et magnétiques (une grande partie de cette interaction est « écrantée » par une quasi-neutralité électrique ou magnétique à grande échelle).

La gravitation a été décrite successivement par la théorie de la gravitation universelle publiée en 1687 par Isaac Newton (1642-1727), puis par Albert Einstein (1879-1955) par ses théories de la relativité restreinte en 1905 puis de la relativité générale en 1916. En ce qui concerne l'électromagnétisme, c'est James Clerk Maxwell (1831-1879) qui, influencé par ses rencontres avec Michael Faraday (1791-1867), établit sa théorie en 1861-1862. Il démontre qu'un rayonnement dit électromagnétique est produit lors des interactions entre particules chargées. La partie visible (c'est-à-dire susceptible d'être détectée par nos yeux) de ce rayonnement n'est autre que la lumière (Fig. 1).

La lumière, comme tout autre rayonnement électromagnétique, a deux caractéristiques importantes : d'une part, elle se déplace à vitesse constante² dans toutes les directions, indépendamment du mouvement de la Terre autour du Soleil ; d'autre part, elle possède la caractéristique d'être à la fois un rayonnement ondulatoire et particulaire. La longueur d'onde de la lumière visible est comprise entre 400 (lumière violette) et 800 (lumière rouge) nm³.

1. Lorsque l'on parle d'anti-matière, on devrait ajouter anti-matière par rapport à l'électromagnétisme puisqu'une anti-particule a strictement la même masse que la particule qui lui est associée mais a une charge électrique de signe opposé (l'anti-proton a une charge électrique négative, par exemple).

2. La vitesse de la lumière notée $c = 299\,792\,458$ m/s (ou approximativement 300 000 km/s) est l'une des constantes fondamentales de la physique, au même titre que le quantum d'énergie noté h ou la constante de gravité G . Tout autre rayonnement électromagnétique est doté de la même vitesse. Il est intéressant de rappeler que les premières mesures de cette vitesse de la lumière ont été accomplies par un astronome danois du nom de Ole Christensen Romer (1644-1710) à partir de ses observations de la durée des éclipses du satellite *Io* lors de son passage derrière Jupiter. Ces observations furent accomplies en 1676 à l'Observatoire de Paris.

3. Le nanomètre, noté nm, est égal à 1 milliardième de m ou 1 millième de micron.

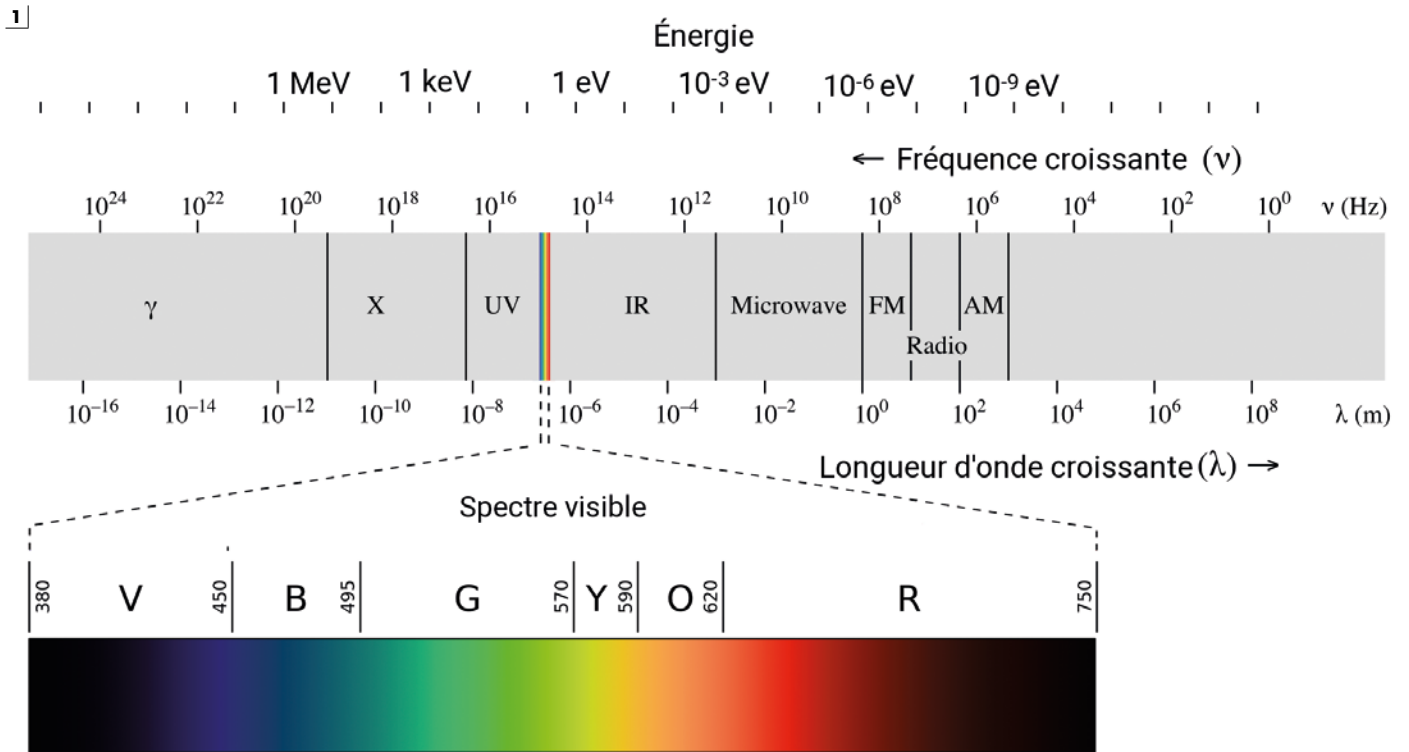


Figure 1 : L'ensemble du spectre électromagnétique : la lumière se situe au milieu de ce spectre, à gauche, les rayonnements plus énergétiques que la lumière (rayonnements gamma, X et ultraviolet), à droite, les rayonnements moins énergétiques (infrarouge, ondes micrométriques et radio), les énergies sont notées en électron-volt (eV) : 1 keV = 1000 eV et 1 MeV = 1 million d'eV, voir note 43.

Les particules qui transportent la lumière portent le nom de photons. Ce sont des particules sans masse qui obéissent à la statistique de Bose-Einstein⁴, c'est-à-dire qui peuvent exister en nombre indéterminé au même lieu et dans le même état d'énergie. Par contraste, les particules de matière (protons, neutrons, électrons et neutrinos) sont soumises au principe d'exclusion de Pauli⁵ et sont régies par la statistique de Fermi-Dirac⁶ qui stipule qu'au plus deux particules de même nature peuvent se trouver au même lieu et dans le même état énergétique. Les photons sont dits être des bosons tandis que les particules de matière (à l'exception des noyaux d'hélium 4, appelées particules alpha) sont appelées fermions.

La discipline scientifique consacrée à l'émission, l'absorption, la réflexion, la réfraction et la polarisation⁷ de la lumière porte le nom d'optique et de nombreux physiciens du XVII^e siècle à nos jours ont apporté leurs contributions à la connaissance de ce rayonnement si important, non seulement en science mais on peut dire aussi dans la vie de tous les jours de tout un chacun. En effet, la vue constitue l'un de nos cinq sens et la lumière du Soleil constitue une grande partie de l'énergie qui est à notre disposition soit sous forme fossilisée, puisque les trois énergies non renouvelables que sont le pétrole, le gaz naturel et la houille sont effectivement issues de la fossilisation des végétaux de l'ère primaire, soit d'utilisation immédiate comme l'énergie photovoltaïque, l'énergie éolienne ou l'énergie hydroélectrique.

De fait, la lumière du Soleil constitue l'élément essentiel au maintien et au développement de la vie sur Terre, et ce, de deux manières :

1) Les végétaux et une partie des bactéries tirent leur subsistance de l'assimilation de l'énergie solaire par leur chlorophylle, ils sont dits « autotrophes » ; alors que les animaux et les champignons se nourrissent directement ou indirectement des végétaux, ils sont dits « hétérotrophes ». La **figure 2** n'est autre qu'une photo du Soleil, une « boule de feu » de 700 000 km de rayon, soit 100 fois celui de la Terre⁸, dont la masse est 2×10^{27} tonnes et la température de surface de 5 750 K. Il est situé à 150 millions de km de nous et à 28 000 années-lumière du centre de la galaxie. Il effectue un tour dans la Voie lactée en 226 000 ans. Signalons que 90 % des étoiles de la Voie lactée sont les « sœurs jumelles » du Soleil et que celui-ci brille avec la même luminosité depuis 4,5 milliards d'années.

Figure 2 : Une photographie du Soleil qui montre l'activité de sa surface, telle que le montre le sursaut de matière en haut et à droite du cliché.

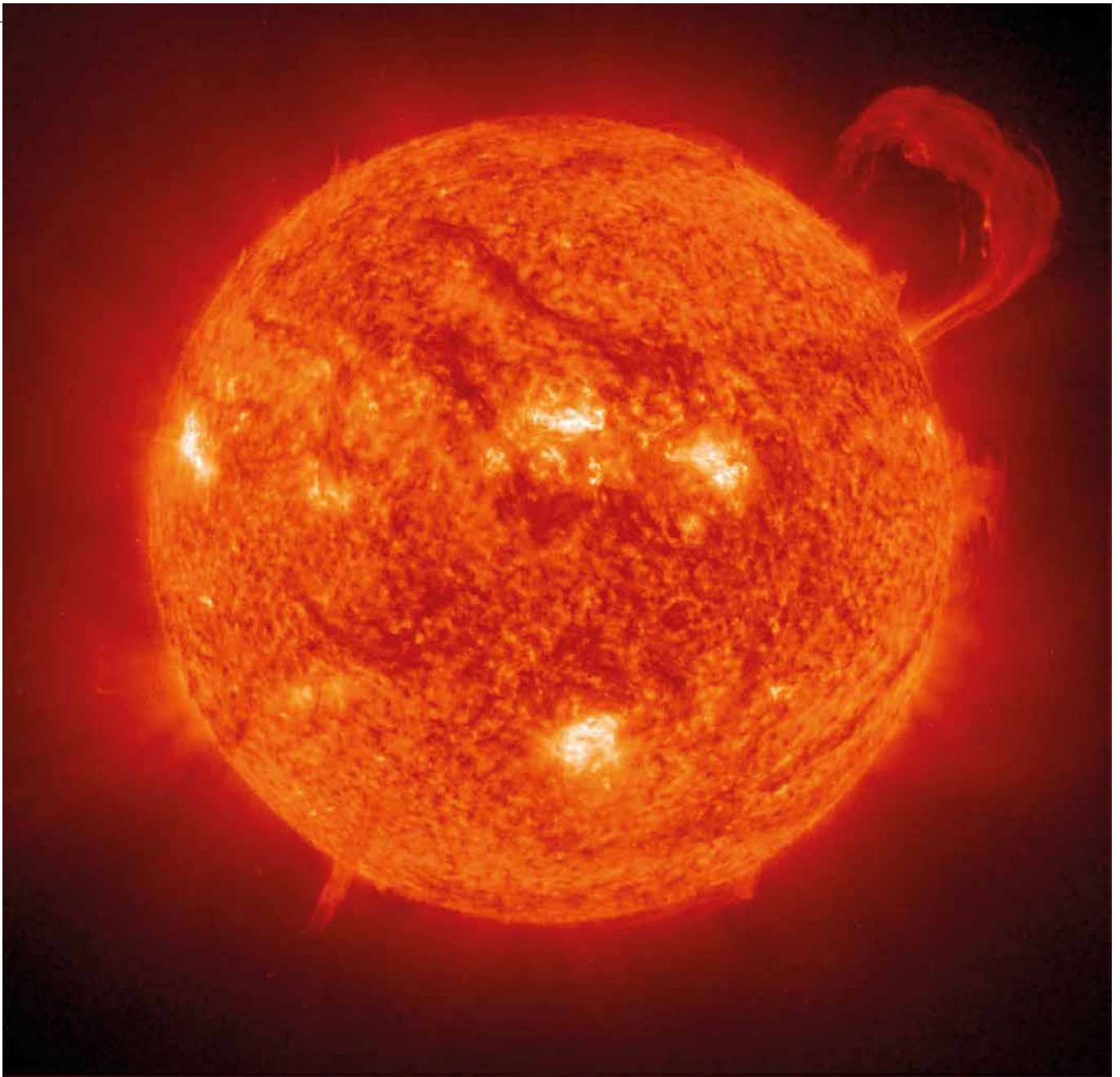
4. Cette statistique qui s'applique aux particules ayant un spin entier telles que les photons ou les noyaux d'hélium 4 a été établie par le physicien indien Satyendranath Bose (1894-1974) puis par Albert Einstein (1879-1955).

5. Ce principe qui s'applique aux particules de matière (protons, neutrons, électrons et neutrinos) a été énoncé par le physicien autrichien Wolfgang Pauli (1900-1958).

6. Du nom du physicien italien Enrico Fermi (1901-1954) et de celui du physicien britannique Paul Dirac (1902-1984).

7. La lumière est donc un phénomène ondulatoire qui peut osciller dans plusieurs directions. La polarisation de la lumière l'oblige à osciller dans une direction bien précise.

8. On pourrait, en principe, mettre un million de Terres à l'intérieur du Soleil.



2) La succession des jours et des nuits rythme nos vies et celle de l'ensemble du monde vivant. Il n'est pas exagéré de dire que l'astronomie, même de nos jours, est essentiellement⁹ une science des lumières du ciel, qu'elles viennent du Soleil, des planètes et des comètes, des autres étoiles que le Soleil, de leurs amas ou encore des galaxies telles que notre Voie lactée, par exemple. Comme on va le voir ici, l'astronome ne se contente pas de suivre les mouvements des astres. Il aspire à comprendre comment l'Univers et son contenu fonctionnent et évoluent.

Notre propos ici est donc d'exposer comment on met à profit les observations des lumières célestes pour atteindre ces objectifs. Comme n'importe quelle autre lumière, celles du ciel se caractérisent de deux manières, à savoir leurs intensités et leurs couleurs. Nous allons donc présenter tout ce que l'on peut apprendre à partir de l'intensité des lumières célestes, de leurs couleurs, et de leurs intensités et de leurs couleurs considérées ensemble. On s'intéressera aussi naturellement à la captation et l'enregistrement de ces lumières. Nous savons que ces lumières font partie d'un vaste ensemble de rayonnements électromagnétiques depuis les ondes radio, les moins énergétiques, en passant par l'infrarouge, l'ultraviolet jusqu'aux rayons X et gamma, particulièrement énergiques. Chacun de ces domaines est en mesure de nous apprendre des caractéristiques, soit différentes, soit complémentaires des régions du ciel ainsi observées : ce chapitre se terminera donc par une brève évocation de ces lumières, invisibles à l'œil mais devenues si importantes dans l'astronomie de nos jours.

Les lumières du ciel se caractérisent de deux manières, à savoir leurs intensités et leurs couleurs. Le propos de ce chapitre est de présenter tout ce que l'on peut apprendre à partir : 1) de l'intensité des lumières célestes ; 2) de leurs couleurs ; 3) de leurs intensités et de leurs couleurs considérées ensemble.

Ce que nous disent les intensités des lumières célestes

Dès l'Antiquité, les astronomes ont classé les étoiles visibles dans le ciel d'abord en six grandeurs, les étoiles de première grandeur étant les plus lumineuses et celles de sixième grandeur étant à peine perceptibles à l'œil nu. On trouve ce classement dans le catalogue d'Hipparque puis dans l'*Almageste* de Ptolémée. Mais c'est en 1856 que l'astronome anglais Norman Robert Pogson (1829-1891) remarque que les étoiles de première grandeur brillent cent fois plus que celles de sixième grandeur. À partir de cette constatation, il invente le concept de magnitude qui dérive directement de celui de grandeur, à savoir que le passage d'une magnitude n à une magnitude $n + 1$ correspond à un amoindrissement de l'intensité lumineuse par un facteur 2,5 qui n'est rien d'autre que la racine cinquième de 100. De fait, un astre est caractérisé par deux magnitudes : sa magnitude apparente que l'on mesure directement et qui dépend donc de sa luminosité intrinsèque et de sa distance par

⁹ D'autres astronomies que celle de la lumière visible sont apparues depuis le début du xx^e siècle. Elles seront évoquées brièvement à la fin de ce chapitre.

rapport à nous (comme on le sait, l'intensité lumineuse d'un objet décroît avec le carré de sa distance qui le sépare de l'observateur), et sa magnitude absolue qui ne dépend que de sa luminosité propre puisque, par définition, c'est la magnitude qu'il aurait s'il était à une distance de 10 parsecs¹⁰ de nous. Donc si l'on connaît les magnitudes apparente (m) et absolue (M) d'un astre, on peut en déduire sa distance d exprimée en parsecs selon la formule simple : $m - M = 5 \times \log_{10}(d) - 5$ (pc).

Les distances des étoiles, vraiment très proches de nous comme l'étoile Proxima du Centaure, peuvent se mesurer par la méthode dite des parallaxes (Fig. 3), à savoir la différence angulaire entre les directions de l'étoile observées à six mois d'intervalle. C'est ainsi que la parallaxe de Proxima du Centaure est égale à 0,772 seconde d'arc, donc sa distance est égale à 4,2 années-lumière de nous.

3

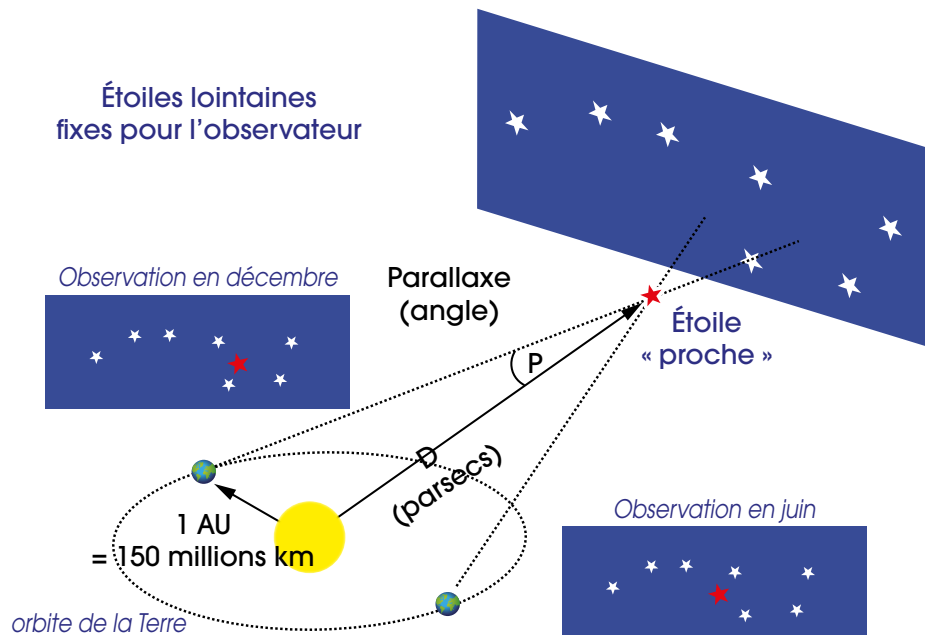


Figure 3 : La méthode dite de la parallaxe pour mesurer la distance d'une étoile proche : la parallaxe d'un objet proche est le demi-angle entre les lignes de visée de cet objet prises à six mois d'intervalle. Cette méthode a été utilisée sous une forme très précise par les satellites *Hipparcos* et *Gaia* (Fig. 38 et 40) pour dresser la carte des étoiles les plus proches du Soleil.

10. Le parsec (pc) est la distance d'un astre dont la ligne de visée se décale d'une seconde d'arc à six mois de distance. Dit autrement, c'est la distance à laquelle une unité astronomique (la distance moyenne Soleil-Terre, soit 150 millions de km) est vue sous un angle de 1 seconde d'arc. Le parsec est égal à 3,26 années-lumière ; comme la lumière parcourt 9 461 milliards de km en un an, le parsec est équivalent à 30 857 milliards de km.

Pour déterminer toutes les distances en astronomie, il faut disposer de « chandelles standards », c'est-à-dire d'astres dont la magnitude absolue est connue avec précision. Il en existe de deux catégories :

1) Une classe d'étoiles variables dites des céphéides¹¹. Il s'agit d'étoiles variables dont l'éclat varie de façon périodique de 0,1 à 2 magnitudes, les cycles durant de 1 à 135 jours. L'astronome américaine Henrietta S. Leavitt (1868-1921) démontra qu'il y avait une corrélation entre la période de ces céphéides et leur magnitude absolue, les cycles les plus longs concernant les céphéides dont l'éclat varie de la façon la plus importante. C'est grâce à cette corrélation entre la magnitude absolue de ces étoiles et leur périodicité qu'Edwin P. Hubble (1889-1953) a pu déterminer la distance des galaxies proches comme la galaxie d'Andromède.

2) Les supernovas de type I (Fig. 4). Il existe effectivement deux types de supernovas, c'est-à-dire d'étoiles qui explosent à la fin de leur évolution en émettant brutalement un jet de lumière dont la luminosité est comparable à celle d'une galaxie tout entière : les types I ont une courbe de décroissance de la lumière régulière et l'hydrogène est absent dans les couches de matière éjectées par l'explosion. Les types II au contraire ont des courbes de lumière irrégulières et les couches de matière éjectées sont riches en hydrogène. Les astrophysiciens se sont aperçus que la luminosité intrinsèque des supernovas de type I¹² est toujours la même puisque leur luminosité correspond à l'énergie libérée par la désintégration de 0,7 masse solaire de nickel 56 en fer 56. Du fait de leur grande luminosité intrinsèque, les supernovas de type I sont des « chandelles standards » qui permettent la mesure de distances très lointaines comme celles qui existent entre nous et la plupart des galaxies. D'ailleurs c'est en utilisant les observations de ces supernovas effectuées avec le télescope spatial *Hubble* dont on reparlera dans la suite que les Américains Saul Perlmutter (1959-), Adam G. Riess (1969-) et Brian Schmidt (1967-) annoncèrent en 1998 que l'expansion de l'Univers s'accélérait au lieu de se ralentir et obtinrent le prix Nobel de Physique 2011 pour cette découverte.

Pour observer le ciel dans les meilleures conditions possibles, les astronomes ont conçu au cours des 300 dernières années des « loupes » très perfectionnées qui portent le nom de lunettes astronomiques et de télescopes. De même, pour remplacer l'œil de l'observateur dans sa capacité de détection de la lumière, on inventa des photomètres de plus en plus sensibles. Par ailleurs, les travaux entrepris de 1816 à 1827 par Nicéphore Niépce (1765-1833) le conduisirent à l'invention de la photographie qui

Figure 4 : La supernova de type I, du nom de Tycho dans la constellation de Cassiopée, puisqu'elle fut décrite pour la première fois par Tycho Brahe qui observa son explosion en 1572.

11. L'archétype de cette classe d'étoiles est Delta Cephei, à savoir la quatrième étoile la plus lumineuse dans la constellation de Céphée.

12. La figure 4 reproduit la photo du reste de la supernova de 1572 qui appartient à ce type I et qui fut observée par l'astronome danois Tycho Brahe (1546-1601), le dernier grand astronome ayant observé le ciel avant l'avènement de la lunette astronomique.

- [30] Pline l'Ancien, *Histoire naturelle*, XXXV, texte établi et traduit par Jean-Michel Croisille, Ed. Les Belles Lettres, Paris.
- [31] Michael Baxandall, *Ombres et lumières*, 1995, trad. fr. P.-E. Dauzat, 1999, Ed. Gallimard, Paris.
- [32] Leon Baptista Alberti, *De la peinture (De pictura)*, 1435, trad. fr., préface et notes Jean-Louis Scheffer, 1999, Ed. Macula Paris.
- [33] Léonard de Vinci, *La Peinture*, Ed. André Chastel, 1964, Hermann, Paris.
- [34] Jean Rudel, « Le métier du peintre, Connaissance de Léonard de Vinci », 1953, *L'Amour de l'Art*, 67-68-69.
- [35] Jean- Pierre Mohen, Michel Menu, Bruno Mottin, *Au Cœur de La Joconde*, 2006, Ed. Gallimard, Paris.
- [36] Michel Menu (éd.), *Leonardo da Vinci's technical practice, paintings, drawings and influence*, 2014, Ed. Hermann, Paris.
- [37] Alain Chiron, Michel Menu, « La couleur des œuvres d'art (caractérisation spectrocolorimétrique de l'œuvre d'art : objectifs, contraintes, perspectives) », *Techne*, 9-10, 1999: 161-171.
- [38] Leonardo da Vinci, *Traité de la peinture, de Léonard de Vinci, donné au public et traduit d'italien en français par RFSDC*, trad. par Roland Fréart de Chambray, Paris, Jacques Langlois, 1651.
- [39] Léonard de Vinci, *Traité du paysage (Codex Vaticanus)*, trad. Peladan, 1910, Librairie Ch. Delagrave, Paris.
- [40] Jean-Christophe Bailly, *L'Instant et son ombre*, 2008, Ed. Le Seuil, Paris.
- [41] Roger de Piles, *Cours de peinture par principes*, 1708, préface J. Thuillier, 1989, Ed. Gallimard, Paris.
- [42] Roger de Piles, *De l'art de peinture de Charles Alphonse Dufresnoy*, 1668, Nicolas Langlois, Paris.
- [43] Philip Steadman, *Vermeer's camera*, 2002, Oxford University Press.
- [44] Jan Blanc, *Peindre et penser la peinture au xviii siècle : la théorie de l'art de Samuel Van Hoogstraten*, 2008, Ed. Peter Lang, Berne.
- [45] Alain Jaubert, *Le Lorrain-Port de mer au soleil couchant - Théâtres du soleil*, 1989, *Palettes*, film documentaire, 26 min.
- [46] Egon Schiele, *Je peins la lumière qui vient de tous les corps* (lettres et poèmes radieux issus des plus sombres tourments du peintre viennois), trad. H. Christophe, 2016, Ed. Agone, Marseille.
- [47] Georges Roque, *Quand la lumière devient couleur*, 2018, Ed. Gallimard, Paris.
- [48] Pierre Bonnard, *Observations sur la peinture*, 2015, Ed. L'Atelier contemporain.
- [49] Gérard Mourou, Michel Menu, Monica Preti-Hamard (Edit.), *L'impressionnisme entre art et science : La lumière au prisme d'Augustin Fresnel (1790-1900)*, 2018, Ed. Hermann, Paris.

- [50] Gerald Finley, *Turner's Colour and Optics: A new route in 1822*, in *Edinburgh Encyclopedia*, D. Brewster, 1823.
- [51] Stéphane Mallarmé, « The Impressionists and Edouard Manet », *Art Monthly review*, sept. 1876, Mallarmé, *Œuvres complètes*, Pléiade, 2003, trad. p. 444-470.
- [52] Paul Cézanne, lettre à Émile Bernard du 2 octobre 1904.
- [53] André Lhote, *Peinture d'abord*, 1942, Ed. Denoël, Paris.
- [54] Pierre Michon, *La Lumière dans les arts européens, 1800-1900*, 2011, Ed. Hazan, Paris.
- [55] Novalis, *Hymnes à la nuit et Cantiques spirituels*, trad. Raymond Voyat, 1990, Ed. Orphée/La différence, Paris.
- [56] Yves Bonnefoy, *L'Arrière pays*, 1972, Ed. Albert Skira, Genève, coll. Les sentiers de la création, p. 67.
- [57] François Morellet, « Les cheminements de π », Catherine Francblin, François Morellet, *François Morellet dans l'atelier du musée Zadkine*, 1999, Paris : Paris-musées, (coll. L'atelier du sculpteur).
- [58] Ann Veronica Janssens, 2018, Ed. Museum of Contemporary Art Kiasma, Helsinki, Institut d'art contemporain, Villeurbanne, Le SHED, centre d'art contemporain de Normandie, Les Presses du Réel.
- [59] Éric Michel, *Couleur-lumière et perception dans l'art et l'architecture*, 2020, Actes du Colloque *La couleur en question*, Abbaye de Royaumont, juil. 2018, à paraître Ed. Hermann, Paris.