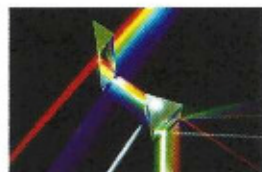




La lumière

UNE NATURE AMBIGUË



La lumière fait partie des phénomènes avec lesquels tout le monde est familier, mais qui demeurent malgré tout très mal connus, à la fois du public et des scientifiques : elle est sans doute l'un des phénomènes les plus mystérieux de la nature. En effet, même si on sait la manipuler pour en faire des spectacles de lumière, des lasers, des photocopies, des appareils photos, ou vidéos... ce n'est pas pour autant que nous pouvons dire ce qu'est la lumière. Prétendre le contraire serait très audacieux. En fait, on sait très bien la décrire... mais c'est à peu près tout. Cela fait pourtant très longtemps, depuis les penseurs grecs, que l'on cherche à appréhender sa véritable nature. Si elle nous échappe tant, c'est sans doute parce que nos sens ne nous permettent pas de la « saisir », de la voir... mais seulement de la percevoir.

HISTOIRE

Pendant très longtemps, on n'a fait que spéculer sur la nature de la lumière. C'est principalement à partir du 17^{e} siècle que l'on a commencé à étudier la lumière de manière plus systématique et rigoureuse. À partir de cette époque deux théories opposées se sont affrontées : la théorie corpusculaire et la théorie ondulatoire. La première voyait la lumière comme étant constituée de très petits grains ; la seconde l'imaginait comme une onde. Or, l'une des caractéristiques d'une onde, c'est qu'elle peut s'annuler si elle est ajoutée à une onde opposée. En effet, qui dit onde, dit vibration : deux vibrations de même amplitude en sens opposés s'annulent, bien évidemment. Mais si la lumière est

une onde, cela signifie que quelque chose vibre. Mais quoi ? Il était difficile de déterminer la nature de la vibration. L'autre question qui se posait dans la conception ondulatoire était de savoir si, en additionnant deux faisceaux lumineux, on pouvait obtenir de l'obscurité. On n'avait jamais



observé que deux lumières donnent ensemble une tache sombre. Ces deux raisons, ajoutées au fait que **Isaac Newton** (1642-1727) était

un partisan de la théorie corpusculaire, ont contribué au succès de cette théorie auprès de la majorité des physiciens. Mais en 1802, l'anglais **Thomas Young**



(1773-1829) réussit l'impensable : à l'aide d'une expérience extrêmement simple, celle dite des fentes de Young, il montre

que la lumière ajoutée à de la lumière peut bel et bien donner de l'obscurité ! C'était le premier pas vers la victoire de la théorie ondulatoire, laquelle, par la suite, a été confirmée par d'autres expériences. En 1815, Fresnel produira une théorie ondulatoire de la lumière, toujours valide de nos jours. Au 19^{e} siècle donc, la lumière est considérée comme une onde. Au cours des années 1870 et 1880, grâce notamment à l'écossais

Maxwell (1831-1879), sa nature devient claire :

il s'agit d'une onde ayant des propriétés à la fois électriques et magnétiques. C'est ce que l'on appelle depuis une onde électromagnétique telles les ondes radio ou les micro-ondes que l'on découvrira par la suite. La différence entre les diverses gammes d'ondes provient de la fréquence. Celle-ci indique combien de fois, à chaque seconde, le champ électromagnétique vibre.

Cependant, la découverte en 1887 d'un phénomène appelé effet photoélectrique vient remettre en cause cette conception ondulatoire et contraint les physiciens à admettre avec **Albert Einstein**



(1879-1955) que, dans cet effet, la lumière manifeste un caractère corpusculaire : elle est formée de grains appelés photons dont l'énergie dépend de la fréquence de la lumière (ν), selon l'expression d'Einstein-Planck $E = h\nu$, où h est la constante de Planck.

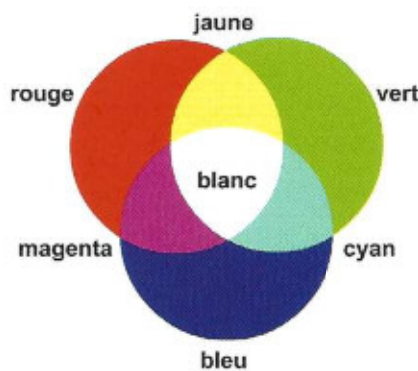
QU'EST-CE QUE LA LUMIÈRE ?

Finalement, on en est venu à dire que la lumière est un phénomène d'une nouvelle espèce qui n'est ni onde, ni corpuscule, mais qui présente selon l'expérience un caractère ondulatoire ou un caractère corpusculaire.

LUMIÈRE SUR LE NOIR

Par définition, la lumière est une onde électromagnétique visible. Dans l'approche ondulatoire on dit que la lumière est une onde électromagnétique dont la fréquence est comprise entre $3,8.10^{14}$ Hertz (rouge) et $7,5.10^{14}$ Hertz (violet), dans l'approche corpusculaire on dit qu'elle est constituée de photons dont l'énergie est située entre $2,5.10^{-18}$ Joules (rouge) et 5.10^{-19} Joules (violet). Les ondes électromagnétiques comme les ondes hertziennes, les micro-ondes, l'infrarouge, l'ultraviolet, les rayons X ou gamma n'étant pas visibles, ne sont pas considérées comme de la lumière, même si parfois on parle à tort de « lumière infrarouge » ou « lumière ultraviolette ». En tombant sur la rétine, la lumière nous donne une sensation de couleur. On a la sensation de noir lorsque la rétine ou une zone de celle-ci n'est pas éclairée. Le noir est par conséquent une absence de lumière, si bien que d'un point de vue physique, le noir n'est pas une couleur.

Synthèse additive



COULEURS DE LA LUMIÈRE, SYNTHÈSE ADDITIVE

Il faut bien avoir à l'esprit qu'une couleur est une sensation que nous procure notre cerveau lorsque la rétine est éclairée par une lumière. Chacune des fréquences dans le visible nous donne une sensation bien particulière : par exemple à $5,1.10^{14}$ Hertz, ou avec un photon de $3,4.10^{-19}$ joules, nous avons la sensation du jaune ; à $5,5.10^{14}$ Hertz, ou avec un photon de $3,7.10^{-19}$ joules, nous avons la sensation du vert etc. Cependant aucune fréquence ne peut nous donner la sensation de la couleur rose ou magenta. Pour avoir cette sensation, il faut au moins deux fréquences, deux photons d'énergies différentes : il nous faut du bleu et du rouge. Aussi, la couleur rose n'est pas une couleur pure, monochromatique, mais composée. Or, comme chacun le sait, un **prisme**



décompose la lumière et sépare les fréquences les unes des autres lorsqu'il est éclairé par une lumière composée de plus d'une fréquence. Cela signifie que si l'on fait tomber un faisceau rose sur un prisme, on verra émerger de celui-ci deux couleurs : le bleu et le rouge. Et si l'on fait tomber sur un prisme un faisceau blanc issu d'une lampe à incandescence, on verra émerger une infinité de couleurs que l'on désigne souvent par des « nuances », car on peut y distinguer en fait quatre, cinq, voire six couleurs différentes. En effet, comme le magenta, le blanc est une lumière composée. Les gouttes d'eau d'un arc-en-ciel agissant comme des prismes, on comprend pourquoi il n'y a pas de rose ou de magenta dans l'arc en ciel. Il est donc faux de dire que toutes les couleurs sont présentes dans l'arc-

en-ciel ! Une infinité de fréquences nous donne la sensation du blanc.



Mais avec deux couleurs seulement, on peut également avoir cette sensation : par exemple avec du bleu et du jaune, ou du rouge et du cyan, ou du vert et du magenta. Dans chacun des couples cités, nous avons deux couleurs dites « complémentaires ». Comme c'est la somme de lumières colorées tombant sur notre rétine qui nous donne une nouvelle sensation, on parle de « synthèse additive ». Ainsi, en synthèse additive, à la lumière verte, il faut ajouter une lumière magenta pour voir blanc. Or, dans ce couple, le magenta est lui-même composé de bleu et rouge. Donc, l'association des lumières bleu, rouge et verte donne du blanc. C'est de cette manière que l'on obtient le blanc sur un **écran** d'ordinateur ou



de télévision. Ce blanc n'est composé que des trois fréquences ou photons correspondant aux trois couleurs dites « primaires » en synthèse additive : rouge, vert, bleu. Le blanc d'une lampe à incandescence en revanche contient une infinité de fréquences, une infinité de photons de couleurs différentes. La sensation est la même, mais physiquement, il ne s'agit pas de la même chose.

COULEURS DES OBITS, SYNTHÈSE SOUSTRACTIVE

Si une **tomate** nous paraît rouge en plein jour, alors qu'elle n'est pas visible si elle n'est pas éclairée, c'est

chiffres lumineux

299 792,458
Vitesse de la lumière dans le vide en km/s

Quelques mètres par seconde

Vitesse à laquelle les scientifiques ont réussi à ralentir la lumière

8 min 20 s



Temps nécessaire à la lumière solaire pour nous parvenir

10 000 milliards de km

Valeur approchée d'une année lumière

30 milliards de milliards



Nombre de photons émis par une lampe à incandescence de 100 W toutes les secondes

le rouge

$3,8.10^{14}$ Hertz

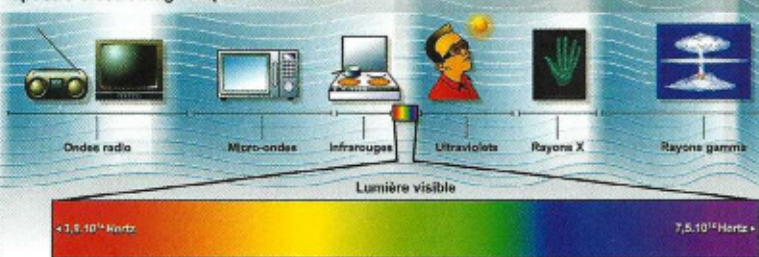
Fréquence visible la plus basse

le violet

$7,5.10^{14}$ Hertz

Fréquence visible la plus haute

Spectre électromagnétique de la lumière



qu'elle-même, elle n'est pas une source de lumière : elle ne fait que renvoyer une lumière incidente. Manifestement, puisqu'on la voit rouge, c'est qu'elle renvoie du rouge...



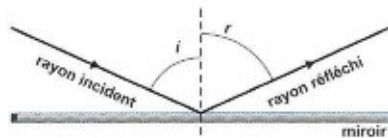
Mais où sont alors les autres couleurs qui ensemble forment la lumière blanche et qui tombent toutes sur la tomate ? Réponse : elles ont été absorbées par la tomate ! L'énergie de la lumière absorbée élève la température de la tomate. Toutes les fréquences, tous les photons, participent à cet échauffement, hormis le rouge bien évidemment qui, lui, est renvoyé. Cela signifie que si l'on éclaire la tomate avec une lumière dans laquelle toutes les fréquences sont présentes sauf le rouge (une lumière cyan), par exemple en employant un filtre cyan, la tomate ne fera que s'échauffer et ne pourra rien renvoyer : elle apparaîtra donc noire. La couleur d'un objet qui n'est pas lui-même lumineux dépend donc de ce qu'il est capable de renvoyer. De même, un filtre qui absorbe toutes les fréquences mais ne laisse passer que le bleu et le vert, sera un filtre cyan. Ici, le cyan apparaît donc en soustrayant des lumières au blanc. Un filtre magenta ne laissera passer que le rouge et le bleu. Et si l'on a un filtre qui ne laisse passer que du vert et du rouge, on verra du jaune au travers. Avec ces trois filtres on peut alors obtenir toutes les couleurs à partir d'une source de lumière blanche contenant toutes les fréquences : c'est la « synthèse soustractive » dont les trois couleurs de base sont le jaune, le cyan, et le magenta. Pour avoir du bleu en synthèse soustractive, il suffit de superposer le filtre magenta, qui ne laisse passer que le rouge et le bleu, avec le filtre cyan qui ne laisse passer que le bleu et le vert : seule la lumière bleue parviendra à franchir les deux filtres : on verra donc bleu.

PROPRIÉTÉS DE LA LUMIÈRE

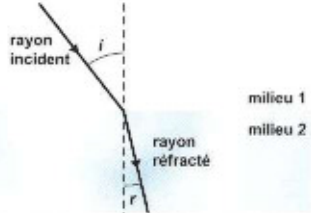
VITESSE DE LA LUMIÈRE, RÉFRACTION

Dans le vide, toutes les fréquences lumineuses, tous les photons du visible (quelle que soit leur énergie) vont à la même vitesse : 299 792 458 km/s. Dans les autres milieux transparents cela n'est pas vrai. Chaque fréquence possède alors sa vitesse propre et celle-ci croît à mesure que l'on va des hautes

Réflexion



Réfraction



fréquences et des hautes énergies vers les basses : du violet lent, au rouge rapide. Le rapport de la vitesse d'une fréquence donnée dans un certain milieu sur la vitesse de la lumière dans le vide (299 792 458 km/s) est appelé indice de réfraction du milieu. Plus cet indice est grand, plus la vitesse est faible dans le milieu. En passant d'un milieu transparent à un autre, un faisceau de lumière dévie d'un certain angle de sa trajectoire initiale si elle ne tombe pas perpendiculairement sur la surface de séparation. C'est ce que l'on appelle la réfraction. L'angle de réfraction dépend du rapport des vitesses dans les deux milieux. Dans le vide, toutes les fréquences se propagent à la même vitesse. Dans les milieux tels que le verre ou l'eau, la vitesse de propagation dépend de la fréquence. Lors du passage du vide (ou de l'air) à un milieu (ou d'un milieu vers le vide ou l'air), les rayons lumineux sont déviés d'un angle de réfraction qui dépend donc de la fréquence. C'est cet effet qui explique la décomposition de la lumière blanche et l'apparition d'un spectre coloré.

VITESSE ET LONGUEUR D'ONDE

La longueur d'onde est la distance que parcourt l'onde lumineuse pendant la durée d'une vibration. Si on prend l'exemple du bleu de fréquence $7,5 \cdot 10^{14}$ Hertz, une oscillation dure $1,3 \cdot 10^{-19}$ seconde. Pendant cette durée, la lumière parcourt 0,4 micromètre dans le vide, 0,3 micromètre dans l'eau et 0,25 micromètre dans le verre. Ce sont les longueurs d'onde du bleu dans ces différents milieux. Lorsqu'on ne précise pas le milieu, cela sous-entend qu'il s'agit du vide.

INTERFÉRENCES, DIFFRACTION

L'expérience de Young en 1802 met en évidence une figure formée de franges

claires et sombres. C'est une figure dite « d'interférences » : la lumière interagit avec elle-même pour se renforcer à certains endroits et se détruire à d'autres pour donner les franges. Le phénomène d'interférences n'est pas rare : tout le monde a déjà constaté des couleurs sur les flaque d'huiles dans les rues, ou sur les bulles de savon.



Bien sûr, l'huile elle-même n'est pas colorée. Lorsque la pellicule de savon a une certaine épaisseur, les interférences entre les deux lumières renvoyées par les deux faces sont telles que l'une des fréquences (parmi toutes celles qui composent la lumière incidente) est détruite : si c'est la bleue qui est détruite, et si la lumière incidente était blanche, la pellicule apparaîtra jaune (blanc - bleu) à cette endroit. La diffraction est un phénomène similaire : les couleurs qui apparaissent sur un CD sont dues à ce



phénomène. Interférences et diffraction s'expliquent très bien dans le cadre de la théorie ondulatoire électromagnétique. Si l'on veut rendre compte de ce phénomène dans le cadre de la théorie corpusculaire, avec les photons, il faut obligatoirement passer par la physique quantique où la notion de corpuscule ne conserve pas son sens habituel, classique.

DIFFUSION, RÉFLEXION

Tout le monde connaît le phénomène de réflexion : un miroir réfléchit la lumière. La loi qui régit la réflexion est simple : l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence. La différence entre la lumière renvoyée par un miroir (réflexion) et celle renvoyée par une feuille blanche réside dans le fait qu'en tombant sur la feuille, la lumière repart dans toutes les directions : c'est la

diffusion. De même, un miroir dont la surface serait fortement dépolie, diffuserait davantage qu'il ne réfléchirait la lumière. La diffusion peut également avoir lieu dans un gaz. Dans ce cas, toutes les fréquences ne sont pas diffusées de manière égale : les hautes fréquences (bleu) sont beaucoup plus diffusées que les basses (rouge) : c'est ce qui explique la couleur bleue du ciel. Au contraire le soleil couchant est rouge, car avant de parvenir à nos yeux, la lumière solaire a perdu toutes ses composantes de haute fréquence : ne restent donc que les basses...

POLARISATION

Si l'on fait vibrer à la main une corde de haut en bas, ou de gauche à droite, ou dans une direction quelconque, mais toujours la même, les ondes se propageront le long de la corde en ayant toujours la même direction de vibration (haut-bas, gauche-droite...) : on dira que l'onde est polarisée. Si en revanche, d'un instant à l'autre on change la direction dans laquelle notre main effectue les va-et-vient, l'onde ne sera pas polarisée. De même, dans le cas de la lumière, celle-ci est polarisée si la direction d'oscillation du champ électromagnétique ne change pas au cours du temps. On peut obtenir cela avec un filtre polarisant. La lumière ne peut pas franchir deux tels filtres si leurs directions de polarisation sont croisées à angle droit.

LES SOURCES DE LUMIÈRE

La lumière provient de la matière, laquelle peut rayonner de l'énergie sous cette forme. Le spectre de ce rayonnement peut être continu et dans ce cas une infinité de fréquences est présente. Il peut aussi être discontinu : on voit alors un nombre limité de fréquences. Une lampe à incandescence ordinaire émet un spectre continu. De même une plaque chauffante de cuisinière chauffée au rouge. En revanche, la couleur rouge des tubes au néon des enseignes publicitaires est un spectre discret. Il en est de même, des lampes jaunes qui éclairent les autoroutes en France. L'émission de lumière responsable des deux spectres, plaque chauffante et tube au néon, met en jeu deux phénomènes très différents. Dans le premier cas, c'est un phénomène thermique ; dans le second, l'émission est due à l'énergie que les atomes de néon sont capables d'emmagasiner avant restitution sous forme d'une fréquence correspondant au rouge.

Spectre thermique

Tout corps, quelle que soit sa température, sauf au zéro absolu (-273,15°C), émet en raison de sa température des ondes électromagnétiques. Ce spectre est continu. Ainsi, tous les objets qui se trouvent dans une pièce non éclairée émettent un spectre continu de rayonnement. Cependant, si on ne voit pas ces objets s'ils ne sont pas éclairés, c'est en raison du spectre émis, lequel ne couvre pas bien le visible : à la température ambiante, une bonne partie de cette émission se fait dans l'infrarouge, invisible pour nous (mais visible pour les crotales par exemple). Lorsque la température s'élève à des

centaines de degrés, le spectre émis couvre bien le visible dans sa partie basse fréquence et faible énergie, rouge : c'est le cas de la plaque



chauffante qui devient alors visible. Si la température s'élève à 2000°C, l'émission couvre bien toutes les fréquences du visible : le

filament d'une lampe est blanc.

Spectre discret

Chaque atome est capable d'emmagasiner de l'énergie. Mais cela ne peut se faire que de manière discrète : l'atome peut ainsi être dans un certain nombre d'états d'énergie bien déterminés. Les états d'énergie intermédiaires ne sont pas possibles. Le niveau d'énergie le plus bas est appelé état fondamental, les autres sont des états excités. Un atome excité retourne spontanément vers son état fondamental et ce faisant émet un photon qui emporte avec lui l'excédent d'énergie. C'est de cette manière que la lumière est produite dans un tube au néon : excité par le courant électrique,



le gaz néon émet des « photons rouges » ; le sodium, lui, émet des « photons jaunes ». On obtient ainsi une lumière monochromatique. En fait, cette lumière n'est pas parfaitement constituée d'une seule fréquence, mais elle est tout de même beaucoup plus pure que celle qui résulte d'une émission thermique.

LA LUMIÈRE LASER

Ce qui différencie une lumière laser d'une lumière ordinaire n'est pas le fait que le faisceau laser soit parallèle, ni



qu'il soit monochromatique. La différence fondamentale réside dans le fait que dans le laser les ondes vibrent toutes ensemble, ou en phase comme le disent les physiciens. Dans le tube au néon évoqué plus haut, les atomes de néon émettent leur énergie électromagnétique de manière indépendante, si bien qu'il existe une certaine forme de désordre que l'on peut comparer à un auditoire qui applaudit un spectacle : même si tous les spectateurs claquent des mains à la même fréquence, s'ils le font de manière indépendante les uns des autres, on entendra un applaudissement désordonné. Si en revanche ils se calent tous ensemble, on aura obtenu de l'ordre, comme des soldats qui marchent au pas au cours d'un défilé. L'ordre dans une lumière laser est de ce genre, et c'est ce qui la distingue de la lumière ordinaire.

Synthèse soustractive

