

# La lumière

## I Généralités

### 1) La lumière : c'est quoi ?

La question de la nature de la lumière a longtemps été un des sujets les plus épineux de la physique. Dès le 17<sup>ème</sup> siècle, deux théories principales s'affrontent :

- Une théorie « corpusculaire » (défendue notamment par Newton) : la lumière serait constituée de particules, émises par les sources (soleil, flammes...)
- Une théorie ondulatoire (défendue notamment par Hooke et Huygens) : la lumière est une onde. Mais une onde associée à quelle grandeur physique ?

Au 19<sup>ème</sup> siècle plusieurs éléments semblent donner raison aux partisans de la théorie ondulatoire : la célèbre expérience des fentes d'Young (réalisée pour la première fois par Thomas Young en Angleterre en 1801) montre clairement que l'on peut faire interférer et diffracter la lumière, or ces deux comportements sont caractéristiques des ondes.

Quelques décennies plus tard, en 1961, James Clerk Maxwell résume tous les phénomènes électromagnétiques en quatre équations, et, surprise, ces quatre équations montrent (entre autres) qu'il peut exister des ondes du champ électromagnétique. Il n'y a de là qu'un pas pour conclure que la lumière est une onde électromagnétique.

Bien que la question semble définitivement tranchée, quelques très rares expériences n'arrivent pas à être expliquées par une théorie ondulatoire de la lumière : il s'agit des expériences du "rayonnement du corps noir" et de "l'effet photoélectrique" (Hertz). Au début du 20<sup>ème</sup> siècle, Max Planck puis Albert Einstein montrent que la seule façon d'expliquer ces deux expériences est de faire l'hypothèse que *l'énergie lumineuse est quantifiée* : elle est constituée de « morceaux » indivisibles, qu'Einstein appelle « quanta » et que Gilbert Lewis (chimiste américain à qui l'on doit, entre autres, la représentation de Lewis des molécules) appellera plus tard « photons ». C'est la naissance de la « mécanique quantique ».

De plus, Planck et Einstein montrent que l'énergie d'un photon est proportionnelle à sa fréquence :

$$E = h\nu$$

où  $\nu$  est la fréquence et où la constante de proportionnalité  $h \simeq 6,6.10^{-34} J.s$  est aujourd'hui appelée « constante de Planck ».

Conclusion : aujourd'hui, on dira donc que la lumière n'est ni vraiment une onde, ni vraiment un corpuscule : c'est un objet quantique (et donc fondamentalement bizarre, et impossible à réellement se représenter) qui, selon les expériences, peut présenter un caractère plutôt ondulatoire ou plutôt corpusculaire.

La figure 1 est une métaphore pour comprendre ce que représente la dualité onde-corpuscule : le cylindre n'est fondamentalement ni un carré, ni un disque. Mais des êtres qui ne seraient capables de voir qu'à deux dimensions diraient que le cylindre se comporte parfois comme un carré et parfois comme un disque.

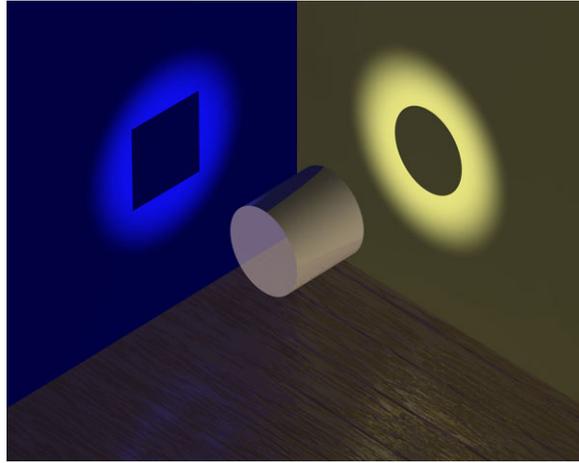


FIGURE 1 – Métaphore pour la «dualité onde-corpuscule» : le cylindre n'est ni un carré ni un disque mais il peut ressembler à chacun des deux selon comment on le regarde. De même, la lumière n'est ni seulement une onde, ni seulement des corpuscules, mais elle peut présenter les propriétés de chacun des deux selon les expériences.

## 2) La vitesse de la lumière

Du fait de sa valeur extrêmement élevée, mesurer la vitesse de la lumière n'a pas été une mince affaire. La première valeur "correcte" a été déterminée par Hippolyte Fizeau à Paris au 19<sup>ème</sup> siècle, grâce à un dispositif extrêmement ingénieux (voir, par exemple, l'article "expérience de Fizeau" sur Wikipedia pour plus de détails sur le dispositif).

Comme pour toute onde en général, la vitesse de la lumière dépend du milieu dans lequel elle se propage. Elle est la plus élevée dans le vide où  $c = 2,99792458 \cdot 10^8 m/s$  (valeur exacte), soit  $c \simeq 3,00 \cdot 10^8 m/s$  (valeur approchée communément utilisée).

Dans un milieu matériel, la célérité de la lumière aura donc une valeur  $v$  inférieure à  $c$ . On appelle  $n = \frac{c}{v}$  l'indice de réfraction du milieu. On a donc, dans un milieu d'indice  $n$  :  $v = \frac{c}{n}$ . On verra plus tard que plus la valeur de l'indice de réfraction d'un milieu est élevée, plus la lumière est déviée quand elle pénètre dans ce milieu.

Exemples d'indices de réfraction :

- air :  $n \simeq 1$
- eau :  $n \simeq 1,33$
- verres :  $n$  varie approximativement de 1,5 à 1,8 selon le type de verre
- le diamant a un des indices de réfraction les plus élevés avec une valeur proche de 2,5

En réalité les valeurs données ci-dessus ne sont que des valeurs moyennes : en effet, la vitesse d'une onde lumineuse dans un milieu dépend légèrement de sa fréquence (ou, de façon équivalente, de sa longueur d'onde), et donc l'indice de réfraction d'un milieu dépend également de la longueur d'onde. En pratique, cela se traduit par le fait que les différentes couleurs ne sont pas déviées de la même façon quand de la lumière blanche pénètre dans un milieu : on dit que le milieu est dispersif.

Plus précisément, la dépendance de l'indice avec la longueur d'onde est traduite par la loi de Cauchy :

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2}$$

où  $A$  et  $B$  sont deux constantes positives qui dépendent du milieu considéré. On voit que l'indice sera donc plus élevé dans le violet, et cette couleur sera donc toujours la plus déviée.

### 3) Longueurs d'ondes et fréquences optiques

Une onde lumineuse n'est pas forcément sinusoïdale, mais, d'après les travaux de Fourier, elle peut toujours être décomposée à partir d'ondes sinusoïdales.

Une onde lumineuse sinusoïdale (et donc composée d'une seule fréquence) est dite «monochromatique» tandis qu'une lumière dont le spectre contient plusieurs fréquences est dite «polychromatique».

Dans un oeil humain, la rétine est tapissée de cellules photosensibles : les cônes et les batonnets (ces noms leur ont été donnés à cause de leurs formes).

Comme tous capteurs, ces cellules ne sont pas sensibles à l'ensemble des ondes électromagnétiques, mais ils ne peuvent détecter que celles dont la fréquence est comprise entre environ  $4.10^{14}Hz$  (couleur rouge) et  $7,9.10^{14}Hz$  (couleur violette).

Historiquement, on préfère caractériser une onde lumineuse monochromatique par sa «longueur d'onde dans le vide» :  $\lambda = c/f$ . Dans ce cas, on dira que la gamme du visible est comprise entre  $390nm$  (violet) et  $700nm$  (rouge).

### 4) Variation de la longueur d'onde avec le milieu

De manière générale, quand une onde passe d'un milieu de propagation à un autre, sa fréquence (temporelle) ne varie pas. Par contre, comme sa célérité varie, sa longueur d'onde doit varier également (puisque  $c = \lambda f$ ).

Ainsi quand de la lumière passe du vide (indice  $n = 1$ ), à un milieu d'indice  $n > 1$ , sa vitesse de propagation est divisée par  $n$  mais sa fréquence est inchangée. On en déduit immédiatement que sa longueur d'onde est divisée par  $n$  également.

Prenons un exemple pour rendre cela plus concret, la lumière issue d'un LASER rouge de longueur d'onde dans l'air  $\lambda = 650nm$  et donc de fréquence  $4,6.10^{14}Hz$ . Quand cette lumière passe dans l'eau, sa fréquence reste inchangée mais sa célérité décroît de  $3.10^8m/s$  à  $2,26.10^8m/s$  et la longueur d'onde décroît donc également et vaut maintenant  $\lambda' = \lambda/n \simeq 489nm$ . L'oeil la perçoit pourtant toujours comme de la lumière rouge car il est sensible à la fréquence de la lumière et non à sa longueur d'onde.

L'exemple précédent montre que l'on devrait donc caractériser une couleur par une fréquence donnée, plutôt que par une longueur d'onde (puisque cette dernière dépend du milieu de propagation). Pourtant, historiquement, on relie plutôt la couleur à la valeur de la longueur d'onde : il faut préciser qu'il s'agit de la longueur d'onde dans le vide.

La figure 2 donne la correspondance entre les différentes couleurs et les différentes fréquences et longueurs d'ondes dans le vide.

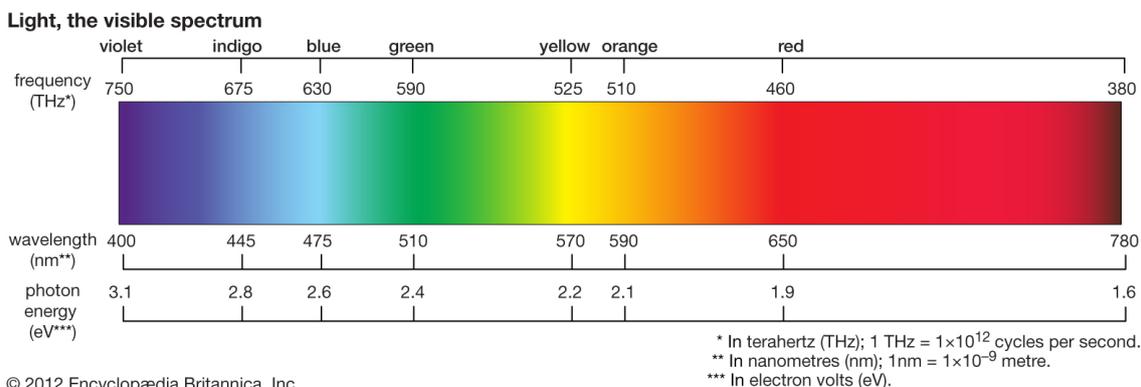


FIGURE 2 – Spectre de la lumière visible

## II Les sources de lumière

La lumière est une onde électromagnétique, or ce champ est créé par des particules chargées (électrons, noyaux atomiques...). De manière générale, on peut dire que la lumière (ainsi que les autres ondes électromagnétiques) est créée par des particules chargées qui accélèrent.

On va voir qu'il existe cependant différents modes d'émission, qui conduisent à des lumières ayant des caractéristiques différentes.

### 1) Emission thermique : soleil, feu, lampes à incandescence

Tout corps "chaud" (c'est à dire à une température différente de 0 Kelvin) émet un rayonnement électromagnétique (on peut le comprendre facilement en considérant que les atomes du corps chaud s'agitent, du fait de l'agitation thermique, et il y aura donc forcément des charges qui accélèrent).

On peut étudier ce rayonnement en faisant passer la lumière issue d'un corps chaud (par exemple le soleil) à travers un dispositif dispersif (prisme ou réseau) afin de réaliser son spectre.

On s'aperçoit immédiatement que le spectre est continu (comme à la figure 2) : toute une plage de longueurs d'ondes apparaît.

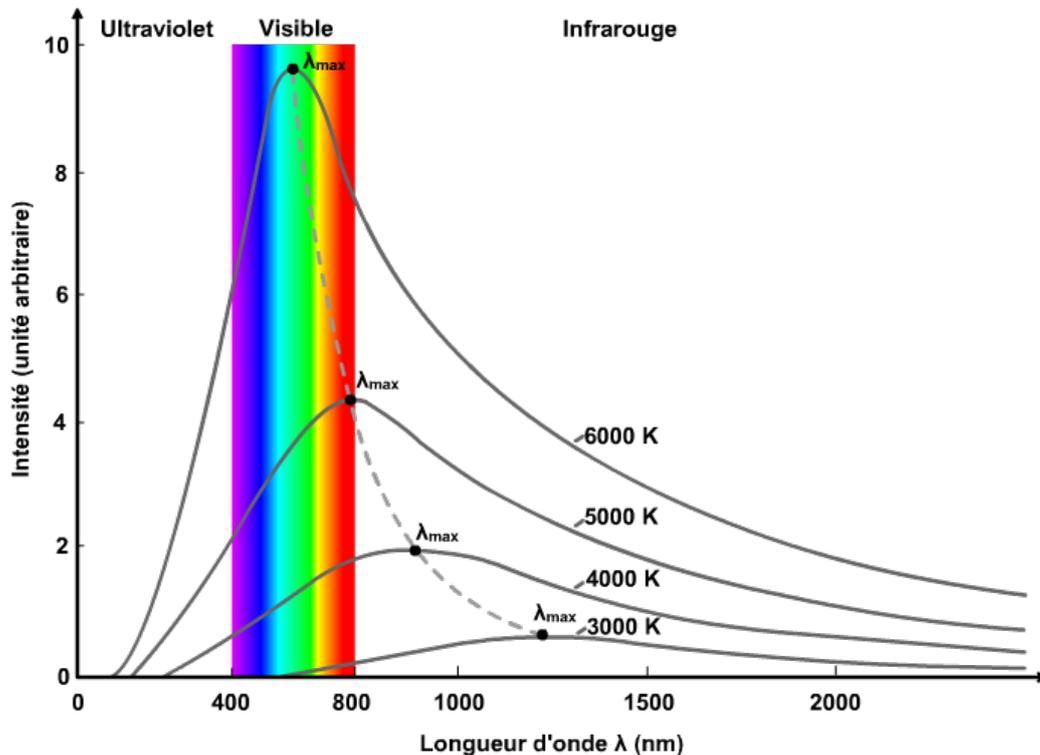


FIGURE 3 – Rayonnement thermique émis par trois corps de températures différentes

Les physiciens Planck, Wien et Stefan ont déterminé les caractéristiques précises de ce rayonnement thermique, appelé "rayonnement du corps noir" (voir figure 3) :

- Il est d'autant plus intense que le corps est chaud (plus précisément, l'intensité du rayonnement augmente comme la température à la puissance 4 : c'est la loi de Stefan)
- Le spectre est d'autant plus centré sur les courtes longueurs d'ondes que le corps est chaud. Plus précisément, la loi de Wien donne la longueur d'onde  $\lambda_{max}$  du maximum d'émission en fonction de la température  $T$  :

$$\lambda_{max} = \frac{2,987.10^{-3} K.m}{T}$$

Application : Calculer les longueurs d'ondes du maximum d'émission pour un être humain de température  $37^{\circ}C$  et pour le soleil de température de surface environ égale à  $6000K$ . À quelle domaine de longueurs d'ondes correspondent-elles ?

Les lampes à incandescence ou "lampes à filament" fonctionnent sur ce même principe d'émission thermique : une ampoule de verre contient un gaz et un filament métallique que l'on chauffe à des températures proches de  $6000K$  par effet Joule, il émet alors de la lumière visible blanche. Le problème de ces lampes est que beaucoup d'énergie est perdue sous forme de chaleur et de rayonnement IR : elles tendent à être remplacées par des tubes fluorescents ou des LEDs (diodes électro-luminescentes), plus économiques.

## 2) Lampes spectrales ou « lampes à décharge »

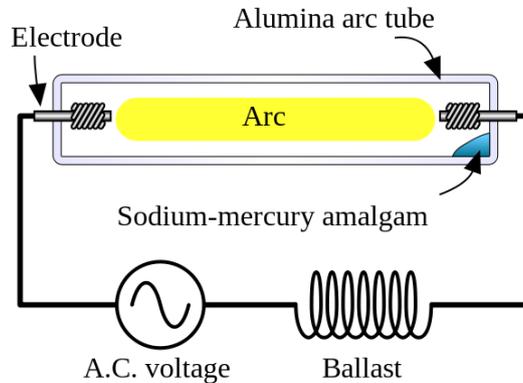


FIGURE 4 – Principe de fonctionnement d'une lampe à décharge

Une lampe spectrale ou "lampe à décharge" est constituée d'un tube de verre contenant un gaz (Néon, Mercure, Hydrogène...), aux extrémités duquel on a introduit deux électrodes métalliques. On applique une tension entre les deux électrodes, ce qui crée une décharge électrique qui excite les atomes de gaz. Ceux-ci se dés excitent alors spontanément en émettant des photons (l'énergie du photon étant exactement égale à l'énergie perdue par l'atome quand il se dés excite).

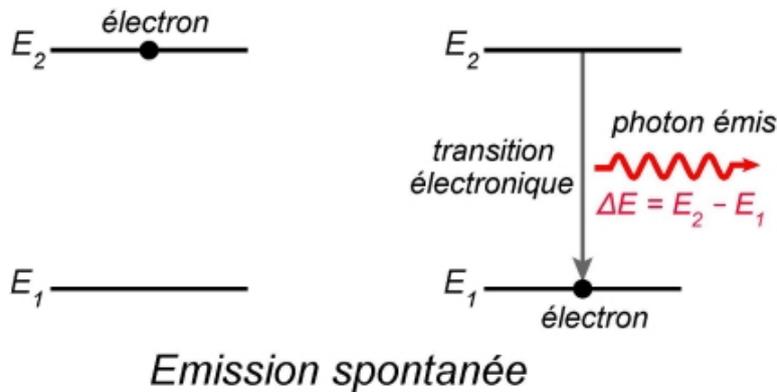


FIGURE 5 – Principe de l'émission spontanée, utilisé dans les lampes à décharges

Quand on réalise le spectre d'une telle lumière (avec un prisme), on obtient un spectre discontinu ou "spectre de raies", comme à la figure 6.

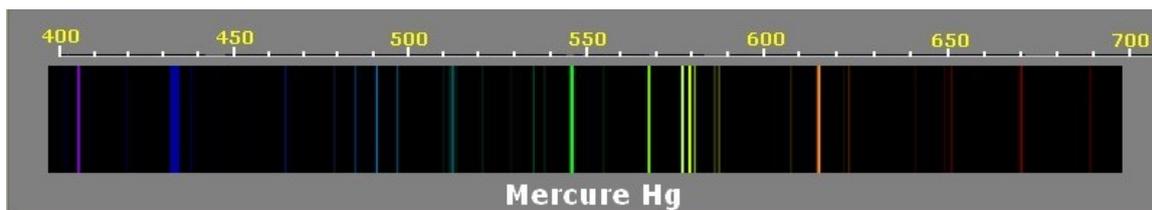


FIGURE 6 – Spectre d'une lampe à mercure

Ce spectre discontinu s'explique par le fait que *les niveaux d'énergie des atomes sont quantifiés* : l'énergie d'un atome ne peut prendre qu'un ensemble de valeurs discrètes, et on n'observera que des longueurs d'ondes correspondant à des transitions entre ces niveaux.

Application : Les niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène sont donnés par la formule :

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ eV}$$

où l'*électron-Volt* eV est une unité d'énergie telle que  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ .

Application : Calculer la longueur d'onde du photon émis lors de la transition  $n = 2$  vers  $n = 1$  (c'est à dire du premier état excité vers le fondamental) puis  $n = 3$  vers  $n = 2$ . Dans chaque cas, de quel type de radiation s'agit-il ?

Remarque : Les tubes fluorescents (incorrectement appelés "néons") qui équipent la plupart des salles de classes sont des lampes à décharge, le gaz à l'intérieur est du mercure. La paroi du tube en verre est tapissée d'une poudre fluorecente qui absorbe la lumière émise par les atomes de mercure (qui contient des UV) et la réémet sous forme de lumière visible.

### 3) Diodes électro-luminescentes (LED)

Les LEDs, qui prennent une part de marché de plus en plus importante dans le domaine de l'éclairage et des écrans (de TV, ordinateurs, smartphones) ont un mode de fonctionnement similaire à celui des lampes à décharge sauf que le matériau qui émet de la lumière n'est pas un gaz mais un solide semi-conducteur (typiquement des semi-conducteurs III-V comme l'arséniure de gallium GaAs, le silicium n'ayant pas de très bonnes propriétés optiques). Ce matériau est excité par application d'une tension et émet de la lumière en se désexcitant.

Le prix Nobel de physique de 2014 a été attribué à des chercheurs japonais pour la mise au point de LEDs bleues (les LEDs rouges et vertes existant depuis plus longtemps). Cette invention a permis de faire de la lumière blanche avec des LEDs (en combinant des LEDs rouges, vertes et bleues), ce qui a ouvert la voie à l'utilisation de LEDs pour tout type d'éclairage.

### 4) LASER

Le LASER, qui a vu le jour dans les années 1960, est certainement une des inventions les plus importantes de ces dernières décennies : les LASERs sont maintenant utilisés dans énormément de domaines différents :

- la médecine, avec, entre autres, le traitement des défauts de l'oeil (myopie ou autres)
- l'industrie, pour la découpe de pièces

- la recherche fondamentale en chimie, physique et biologie
- les technologies de la vie courante, comme les lecteurs optique (lecteur CD, DVD, blu-ray), les lecteurs de code barre...

Le sigle LASER signifie "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation". En effet, le principe de fonctionnement du LASER est celui de "l'émission stimulée" (dont Einstein avait établi les principes théoriques dès 1916) : un photon incident peut inciter un atome à se désexciter (voir figure 7) : il en résulte deux photons complètement identiques.

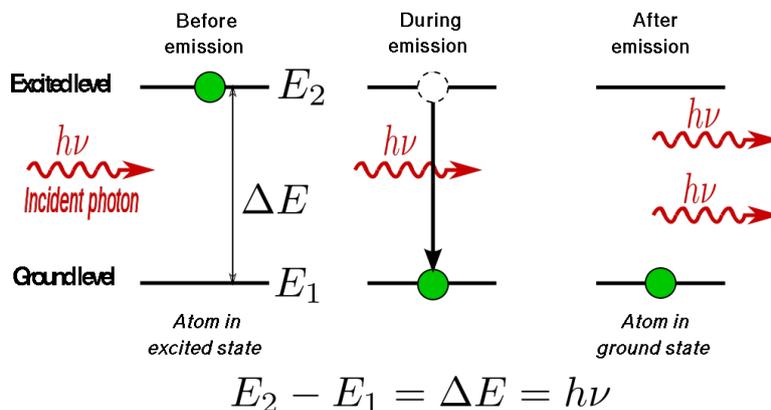


FIGURE 7 – Principe de l'émission stimulée

Un LASER peut être à gaz (comme une lampe spectrale) ou à semi-conducteur (comme une LED, on parle d'ailleurs de "diode LASER").

La lumière LASER est caractérisée par sa grande monochromaticité, sa grande cohérence (vous verrez en deuxième année de quoi il s'agit) et la très faible ouverture du faisceau (contrairement aux autres sources qui émettent dans toutes les directions), ce qui permet d'obtenir des puissances surfaciques énormes (et rendent les LASERs très dangereux si la faisceau rentre dans l'oeil, avec un risque de brûlure irréversible de la rétine).

### III La notion de «rayon lumineux» et ses limites

#### 1) Notion de rayon lumineux

L'optique géométrique s'occupe exclusivement de "rayons lumineux", mais qu'est-ce qu'un rayon lumineux exactement ?

Un rayon lumineux une courbe indiquant, en tout point, la direction de propagation de l'énergie lumineuse. On peut préciser cette notion selon si on considère une interprétation ondulatoire ou corpusculaire de la lumière :

- Dans une interprétation corpusculaire, les rayons lumineux correspondent aux trajectoires des photons
- Dans une interprétation ondulatoire, les rayons lumineux sont les courbes en tout point orthogonales aux surfaces d'ondes

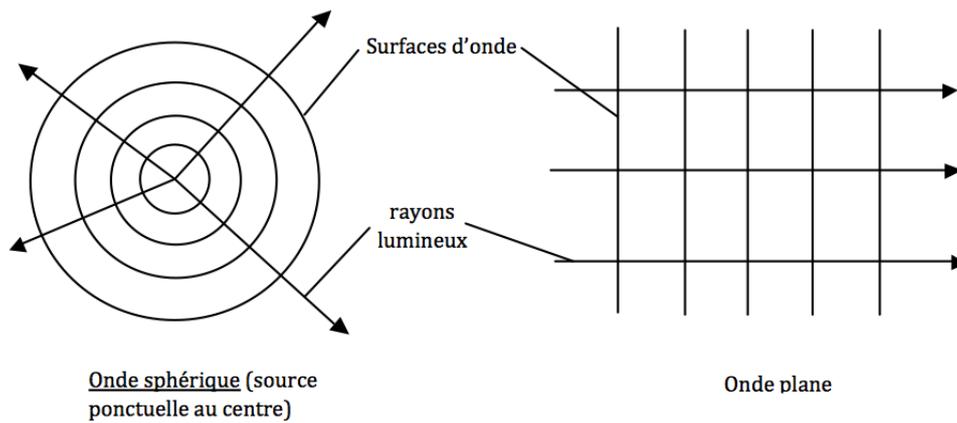


FIGURE 8 – Rayons lumineux et surfaces d'onde

Un faisceau LASER, que l'on mettrait en évidence avec de la poussière par exemple, peut donner une première idée de ce qu'est un rayon lumineux. Cependant le faisceau LASER est en réalité un ensemble de rayons lumineux de directions très proches.

On pourrait se poser la question suivante : "peut-on isoler un rayon lumineux, ou du moins, réduire autant que l'on veut la taille du faisceau" ?

La réponse est non, à cause du phénomène de diffraction que l'on va voir au paragraphe suivant. Ainsi, on ne peut pas isoler de rayon lumineux, et le rayon lumineux notion n'a donc pas vraiment de réalité physique : il s'agit plutôt d'un modèle mathématique extrêmement pratique.

## 2) Les limites de l'optique géométrique : phénomène de diffraction

Le phénomène de diffraction a été décrit précisément en 1660 par le prêtre et physicien italien Francesco Grimaldi, à qui l'on doit également le mot "diffraction".

On constate que lorsqu'une onde passe par une ouverture de taille comparable à sa longueur d'onde, l'onde "s'étale" (il faut entendre "comparable" au sens large ici : la taille de l'ouverture peut être plus de 100 fois supérieure à la longueur d'onde et pourtant la diffraction être encore visible).

Ce phénomène affecte toutes les ondes : vagues à la surface de la mer (voir figures 9 et 10), ondes sonores, ondes radio et bien sûr ondes lumineuses.

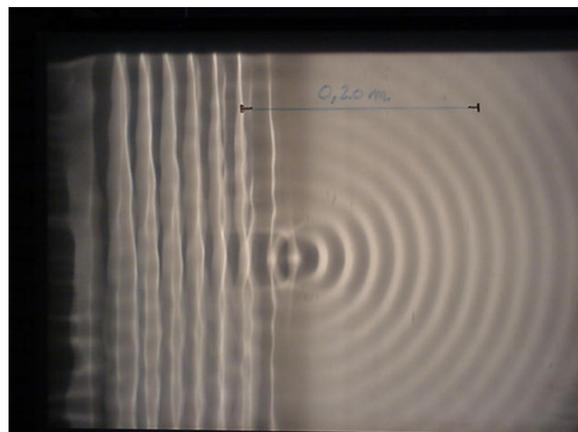


FIGURE 9 – Diffraction de vaguelettes dans une cuve à ondes

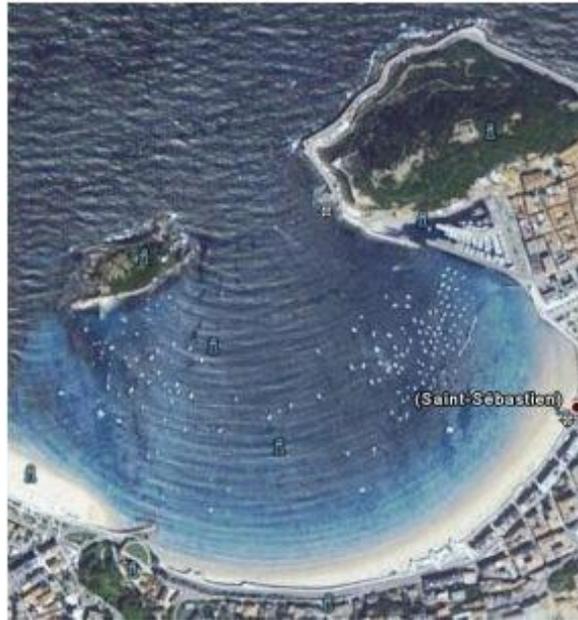


FIGURE 10 – Diffraction des vagues dans la baie de San Sebastian

Le phénomène de diffraction s'accompagne toujours d'interférences. Ainsi, quand on fait diffracter de la lumière visible en la faisant passer par une fente de taille inférieure au mm, on obtient une "figure de diffraction" comme sur la figure 11



FIGURE 11 – Diffraction d'un faisceau LASER rouge par une fente

On constate que la figure est caractérisée par une tâche centrale très lumineuse et des tâches périphériques moins lumineuses.

La largeur de la tâche centrale est caractérisée par la formule :

$$\sin(\theta) = \frac{\lambda}{a}$$

où  $a$  est la largeur de la fente diffractante et  $\theta$  le demi-angle correspondant à la tache centrale (vue depuis la fente).

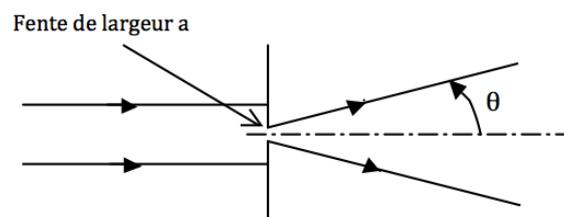


FIGURE 12 – Détermination de la taille angulaire de la tâche centrale de diffraction

Application : On fait passer la lumière d'un LASER vert de longueur d'onde  $\lambda = 530nm$  à travers une fente d'épaisseur  $a = 0,1mm$  et on observe la figure de diffraction sur un écran situé à une distance  $D = 1,5m$  de la fente. Quelle est la largeur  $L$  de la tâche centrale sur l'écran.

Nous étudierons cette année les trajectoires des rayons lumineux quand le phénomène de diffraction peut-être négligé : on dit alors que l'on est dans le domaine de l'optique géométrique (par opposition à l'optique ondulatoire qui tient compte de la diffraction).

Le phénomène de diffraction explique (entre autres) que l'on ne peut pas observer, avec un microscope optique, des objets de taille inférieure à la centaine de nanomètres (la longueur d'onde moyenne de la lumière visible étant de l'ordre de 500 nm). Pour observer des objets plus petits, il faut utiliser des techniques n'utilisant pas la lumière visible : diffraction de rayons X, microscopie électronique, microscopie à effet tunnel...