

Propagation de la lumière

I L'onde lumineuse

A Nature ondulatoire de la lumière

La nature de la lumière a été l'objet de discussions et controverses durant des siècles, opposant principalement au XVII^e NEWTON avec sa théorie corpusculaire et HOOKE puis HUYGENS avec la théorie ondulatoire. Le débat s'est clos avec les expériences d'interférences de YOUNG et FRESNEL (début XIX^e) notamment, prouvant son comportement ondulatoire (nous aurons l'occasion de les réaliser nous-mêmes), mais ce n'est qu'à la fin du XIX^e avec les théories de MAXWELL que cette onde est décrite par la propagation de grandeurs électromagnétiques (champ électrique, champ magnétique, et donc pas dans un milieu matériel).

Le XX^e vint bousculer cette vision en attestant de la dualité onde-corpuscule des particules élémentaires de l'Univers avec l'avènement de la physique quantique. Selon les conditions d'études, l'une ou l'autre des visions sera appliquée.

B Célérité de la lumière

I.B.1 Dans le vide

En tant qu'onde électromagnétique, la lumière n'est pas une onde mécanique nécessitant un milieu matériel pour se propager¹.

Définition

Nous appelons *célérité* de la lumière **dans le vide**, et la notons c , la vitesse de l'onde lumineuse.

Valeur

La valeur de c est fixée par définition^a, telle que

$$c = 2,997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

Nous utiliserons et retiendrons cependant la valeur

$$c = 3,00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

^a. elle n'est donc théoriquement plus mesurable, puisque les mesures de distances se basent sur la valeur de la célérité de la lumière

I.B.2 Dans un milieu

Elle peut cependant se propager dans certains milieux matériels transparents, comme l'air, l'eau, le verre... Dans le cadre de la physique de cette année, nous étudierons des milieux particuliers :

1. À la différence d'une vague sur l'eau ou d'une corde de guitare qui se propagent sur un milieu matériel.

Définition : milieu transparent linéaire homogène isotrope (TLHI)**Transparent** : qui laisse passer la lumière ;**Linéaire** : dont les sorties sont proportionnelles aux entrées ;**Homogène** : dont les propriétés physiques sont constantes en tout point du milieu ;**Isotrope** : dont les propriétés physiques ne dépendent pas de la direction de la lumière dans le milieu.

Lorsque la lumière passe dans un tel milieu, sa vitesse **diminue**. Nous caractérisons cette diminution *via* la définition de l'indice optique :

Définition : indice optique

Nous appelons *indice optique* la grandeur associée à milieu transparent et caractérisant la vitesse de la lumière en son sein, telle que :

$$n = \frac{c}{v}$$

Unités

En tant que rapport de deux grandeurs de même unité, l'indice optique n'a pas d'unité.

Remarque

Étant donné que la vitesse de la lumière **dans le vide** est absolue et indépassable, la vitesse de la lumière dans un milieu transparent ne peut qu'être plus petite, et donc **l'indice optique est toujours > 1** .

Implication

Par la définition de l'indice optique, nous en déduisons évidemment :

$$v = \frac{c}{n}$$

Ordre de grandeur

Milieu	n	$v[\text{m s}^{-1}]$
Vide	1	$3,00 \times 10^8$
Air	$\approx 1,00$	$3,00 \times 10^8$
Eau	1,33	$2,3 \times 10^8$
Verre	1,5	$2,0 \times 10^8$
Diamant	2,4	$1,25 \times 10^8$

I.B.3 Selon la fréquence

L'indice optique dépend de la fréquence d'une onde lumineuse, et ainsi la vitesse de la lumière dans un milieu TLHI aussi. Comme la couleur de la lumière correspond à la fréquence de l'onde la représentant, cela cause la **dispersion** de la lumière². Cet effet est cependant souvent négligé car faible par rapport à d'autres phénomènes.

C Longueur d'onde d'une onde sinusoïdale**Définition : onde sinusoïdale**

Une onde sinusoïdale est une onde **monochromatique**, ce qui signifie « une seule couleur ». Elle est donc décrite par une unique valeur de longueur d'onde ou de fréquence, et non pas comme une superposition.

Exemples

Une lumière rouge est monochromatique, et est décrite par une onde lumineuse de longueur d'onde $\approx 700 \text{ nm}$. Une lumière blanche ne l'est pas, c'est une superposition d'ondes sinusoïdales sur le domaine du visible.

2. Pensez par exemple au prisme de Pink Floyd.

Propriété

Une onde lumineuse se caractérise par sa fréquence, appelée f ou ν ^a. En effet, **la fréquence d'une onde est indépendante du milieu traversé**. En revanche, sa **longueur d'onde en dépend**.

a. Se lit « nu ».

Implication

Avec l'analyse dimensionnelle, on trouve directement qu'une longueur d'onde λ doit s'écrire

$$\lambda = \frac{v_{\text{onde}}}{f_{\text{onde}}}$$

Or, dans le vide $v_{\text{onde}} = c$, et dans un milieu TLHI d'indice optique n , $v_{\text{onde}} = \frac{c}{n}$; ainsi avec λ_0 dans le vide :

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \quad \text{et} \quad \lambda = \frac{c}{n \times f} = \frac{\lambda_0}{n}$$

Ainsi, quand on parle de la longueur d'onde d'une couleur, on parle en réalité de sa longueur d'onde *dans le vide*.

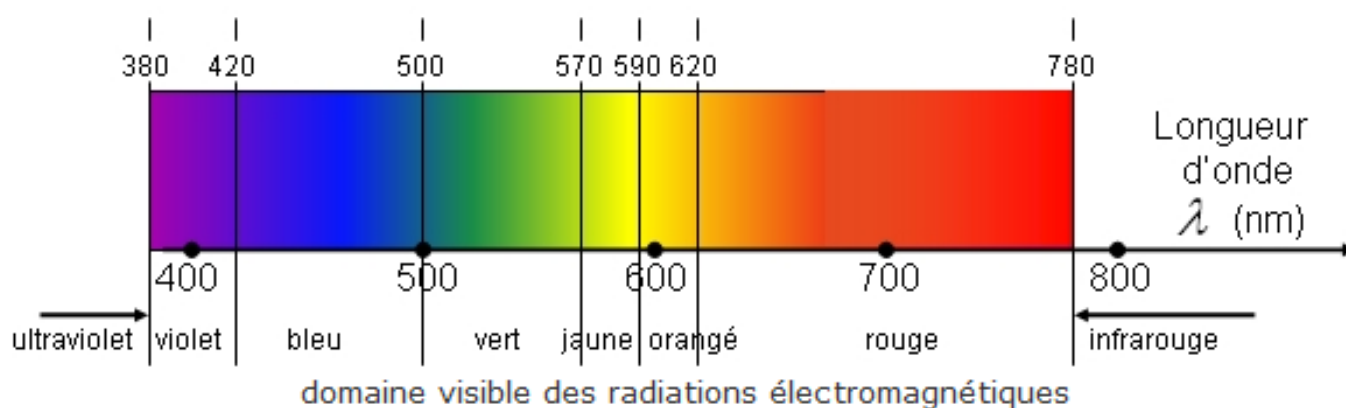


FIGURE 1.1 – Longueurs d'ondes des ondes monochromatiques dans le domaine visible et **dans le vide**.

Exercice

Un laser rouge émet un rayonnement de longueur d'onde dans le vide $\lambda_0 = 633 \text{ nm}$. Déterminer sa longueur d'onde λ dans du verre, d'indice optique $n = 1,5$. Sa couleur change-t-elle ?

II Sources lumineuses primaires

On parle de source primaire quand l'objet en question émet directement de la lumière. Les sources secondaires ne font qu'en renvoyer, par exemple la Lune, la peau, les arbres...

A Spectre d'émission

Pour caractériser un rayonnement électromagnétique, on trace son spectre d'émission, c'est-à-dire la courbe de l'intensité lumineuse en fonction de la fréquence (ou longueur d'onde dans le vide).

Les sources primaires sont classées selon leur contenu spectral qui découle du type de processus d'émission lumineuse :

Sources thermiques : agitation thermique des atomes ;

Sources spectrales : excitation électrique des atomes ;

Sources LASER : optimisation de l'émission stimulée de photons.

B Les sources thermiques

L'agitation thermique des atomes émet un rayonnement électromagnétique dépendant de sa température : c'est le type de rayonnement du Soleil ou des ampoules à incandescence (chauffage d'un métal qui brille).

Caractéristiques du rayonnement d'un corps chaud

Le spectre d'émission d'une source thermique est une courbe **continue**, étalée autour d'une longueur d'onde d'émission maximale λ_{\max} . Plus la température augmente, plus le spectre se déplace vers une fréquence élevée (ou longueur d'onde faible) : une étoile bleue est bien plus chaude qu'une étoile rouge.

Exemples

- À température ambiante ($T \approx 300$ K), un corps émet dans l'infrarouge (c'est le principe d'une caméra infrarouge) ;
- Pour une lampe, le filament est à $T \approx 2800$ K. Son maximum est dans l'infrarouge mais son spectre s'étale sur le domaine visible ;
- La température de surface du Soleil est de $T \approx 5700$ K. Son maximum d'émission est dans le domaine visible.

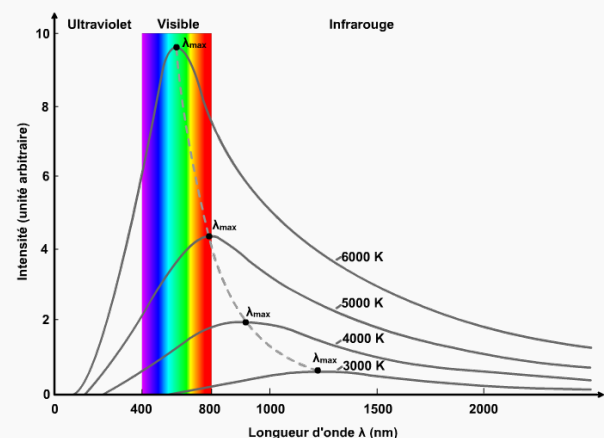


FIGURE 1.2 – Spectre d'émission d'un corps chaud selon quelques températures.

C Les sources spectrales

Une lampe spectrale contient un élément chimique sous forme de gaz, et deux électrodes de part et d'autre du contenant génère des décharges électriques qui excitent les atomes. C'est un état instable. En revenant dans leur état fondamental, ils émettent des photons à une énergie précise correspondant à la différence des niveaux d'énergie quantiques de l'élément ($f = \frac{\Delta E}{h}$; voir chapitre introduction à la physique quantique).

Caractéristiques du rayonnement spectral

Le spectre d'émission d'un rayonnement spectral est composé de pics d'intensités faiblement élargis. Les longueurs d'onde de ces pics sont caractéristiques de l'élément excité ; c'est de cette manière qu'on peut déterminer la composition atmosphérique des exoplanètes ou caractériser les étoiles.

Exemples

On trouve des lampes au néon, de couleur rouge ; des lampes au mercure, de couleur bleue ; des lampes à sodium, dans l'orange. . . On utilisera principalement ces deux dernières en laboratoire.

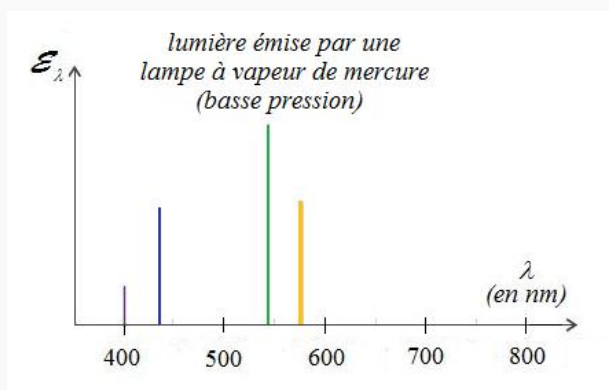


FIGURE 1.3 – Spectre d'émission d'une lampe à vapeur de mercure.

D Le LASER

LASER est l'acronyme de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiations*, c'est-à-dire « amplification de la lumière par émission stimulée de radiations ». Il est composé d'une cavité remplie d'un milieu recevant de l'énergie, excité par une source extérieure, et fermée par deux miroirs. Celui de la face de sortie est légèrement transparent.

La lumière passe au travers du milieu qui réémet de la lumière sans atténuer la première, et grâce au miroir le tout est réfléchi pour permettre de nombreux aller-retours, amplifiant l'intensité lumineuse à chaque passage.

Caractéristiques du rayonnement LASER

Le spectre du laser ne contient qu'une seule raie extrêmement fine, bien plus fine que celle des sources spectrales. C'est l'exemple le plus proche d'une réelle source monochromatique.

Exemple

Un laser hélium-néon donne un faisceau rouge de longueur d'onde dans le vide $\lambda_0 = 632,8 \text{ nm}$.

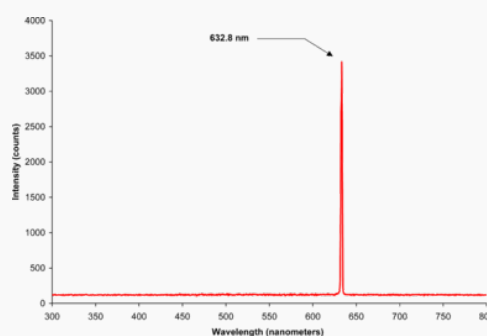


FIGURE 1.4 – Spectre d'émission d'un laser hélium-néon.

Attention

Si la puissance totale du faisceau est communément assez faible ($P \approx 1 \text{ mW}$), sa surface l'est également ($S \approx 1 \text{ mm}^2$). La puissance *surfactive* est donc en réalité très grande, et particulièrement dangereuse pour l'œil. On veillera donc à ne jamais le diriger vers un œil, mais aussi à éviter toute réflexion involontaire (notamment sur tout métal : bijou, tige de support. . .).

III Diffraction de la lumière

A Principe

La nature ondulatoire de la lumière apparaît clairement lors des expériences de diffraction : dans certains cas, la restriction d'un faisceau lumineux (par exemple un laser) par une fente, donne sur un écran placé loin derrière, un étalement de la lumière **plus large** que la largeur de la fente.

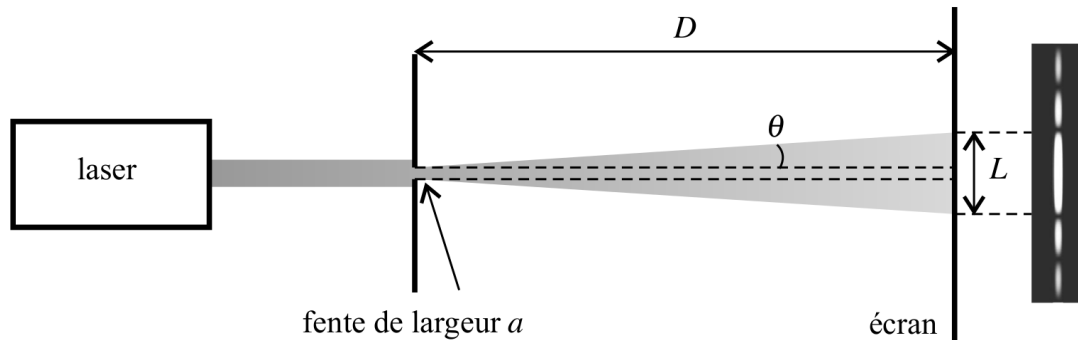


FIGURE 1.5 – Diffraction de FRAUNHOFER d'un faisceau laser par une fente fine.

Ce phénomène survient quand l'extension spatiale d'une onde est limitée ; cela arrive également avec les vagues dans l'eau. En effet, pour des valeurs de largeur de fente $a \gg \lambda$, il n'y a bien qu'une coupure du faisceau. En revanche, quand $a \approx \lambda$, ce phénomène survient. On observe même que plus a est petit, plus la lumière s'étale sur l'écran.

B Loi de la diffraction

Loi 1.1 : diffraction par une fente simple

Un faisceau monochromatique de longueur d'onde λ dans le vide, limité spatialement par une fente de largeur $a \approx \lambda$, forme à grande distance sur un écran des tâches lumineuses dont le demi angle d'ouverture θ de la tâche centrale vérifie

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