

Propagation de la lumière

Sommaire

I L'onde lumineuse	2
I/A Nature ondulatoire de la lumière	2
I/B Célérité de la lumière	2
I/C Longueur d'onde d'une onde sinusoïdale	3
II Spectre des sources lumineuses primaires	4
II/A Les sources thermiques	4
II/B Les sources spectrales	5
II/C Le LASER	5

Capacités exigibles

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ☐ Définir une onde sinusoïdale/monochromatique. ☐ Caractériser une source lumineuse par son spectre. ☐ Relier la longueur d'onde dans le vide et la couleur. | <ul style="list-style-type: none"> ☐ Connaître la valeur numérique de la célérité de la lumière dans le vide. ☐ Définir l'indice d'un milieu transparent. ☐ Déterminer la longueur d'onde d'un rayonnement dans un milieu à partir de sa longueur d'onde dans le vide. |
|---|--|

L'essentiel

Définitions

- | | |
|---|---|
| ☐ O1.1 : Célérité de la lumière | 2 |
| ☐ O1.2 : Milieu TLHI | 2 |
| ☐ O1.3 : Indice optique | 2 |
| ☐ O1.4 : Onde sinusoïdale | 3 |
| ☐ O1.5 : Spectre d'émission et source primaire | 4 |
| ☐ O1.6 : Spectre d'un rayonnement thermique | 4 |
| ☐ O1.7 : Spectre d'un rayonnement spectral | 5 |
| ☐ O1.8 : Rayonnement LASER | 5 |

Propriétés

- | | |
|--|---|
| ☐ O1.1 : Couleur d'une onde | 3 |
|--|---|

Implications

- | | |
|---|---|
| ☐ O1.1 : Vitesse et indice | 3 |
| ☐ O1.2 : Longueurs d'onde λ et λ_0 | 3 |

Ordres de grandeur

- | | |
|--|---|
| ☐ O1.1 : Célérité de la lumière | 2 |
| ☐ O1.2 : n, v | 3 |

Applications

- | | |
|---|---|
| ☐ O1.1 : Laser rouge dans du verre | 3 |
|---|---|

Points importants

- | | |
|--|---|
| ☐ O1.1 : Couleur d'une onde lumineuse | 3 |
|--|---|

Erreurs communes

- | | |
|---|---|
| ☐ O1.1 : LASER en TP | 5 |
|---|---|

I L'onde lumineuse

I/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).

Ce n'est cependant 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).

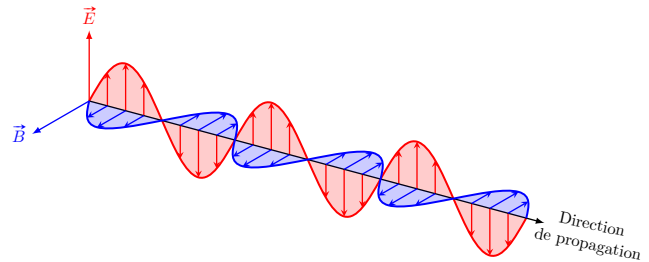


FIGURE O1.1 – Représentation des oscillations du champ électromagnétique lors de la propagation de la lumière

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.

I/B Célérité de la lumière

I/B) 1 Dans le vide

La lumière est une onde électromagnétique : ça n'est **pas** une onde mécanique nécessitant un milieu matériel pour se propager¹.

Définition O1.1 : Célérité de la lumière

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

Ordre de grandeur O1.1 : Célérité de la lumière

La valeur de c est fixée par définition², telle que

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

Nous utiliserons et retiendrons cependant la valeur

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

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 :

Définition O1.2 : 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 O1.3 : Indice optique

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

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

Unité

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

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

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

Remarque O1.1 : Valeur minimale d'indice optique

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 O1.1 : Vitesse et indice

Par la définition de l'indice optique, nous déduisons l'expression de la vitesse de la lumière dans un milieu par :

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

♥ Ordre de grandeur O1.2 : n, v

Milieu	n	v [10^8 m.s^{-1}]
Vide	1	3,00
Air	1,00	3,00
Eau	1,33	2,30
Verre	1,5	2,00
Diamant	2,4	1,25

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 lumière³. Cet effet est cependant souvent négligé car faible par rapport à d'autres phénomènes.

I/C Longueur d'onde d'une onde sinusoïdale**Définition O1.4 : 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.

Exemple O1.1 : Ondes monochromatiques ou non

- ◇ 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.

♥ Propriété O1.1 : Couleur d'une onde

Une onde lumineuse se caractérise par sa fréquence, appelée f ou ν ⁴ : **la fréquence d'une onde est indépendante du milieu traversé**, alors que sa **longueur d'onde en dépend**.

♥ Implication O1.2 : Longueurs d'onde λ et λ_0

Soit λ_0 la longueur d'onde d'une onde lumineuse dans le vide λ sa valeur dans un milieu d'indice n ; et $c = v_{\text{vide}}$ sa célérité dans le vide et $v = c/n$ dans le milieu. Par analyse dimensionnelle et f **étant constante**, on trouve

$$c = \lambda_0 f \Leftrightarrow f = \frac{c}{\lambda_0} = \frac{v}{\lambda} = \frac{c}{n\lambda} \quad \text{donc} \quad \lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

Important O1.1 : Couleur d'une onde lumineuse

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

♥ Application O1.1 : Laser rouge dans du verre

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 ?

3. Pensez par exemple au prisme de Pink Floyd.

4. Se lit « nu ».

D'après ce qui précède, on a

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \lambda_0 = 633 \text{ nm} \\ n = 1,5 \end{cases}$$

A.N. : $\lambda = 422 \text{ nm}$

Cependant, **sa couleur ne change pas** puis qu'une onde est caractérisée par sa fréquence, qui ne change pas.

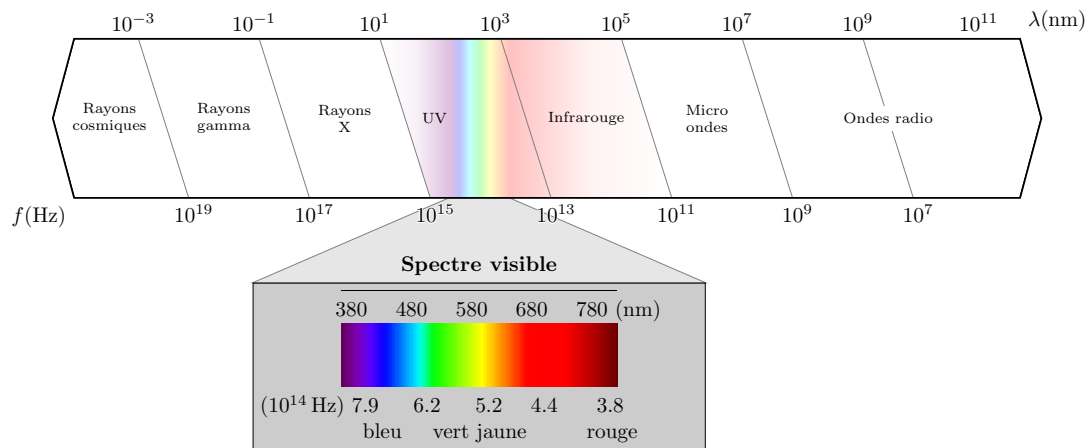


FIGURE O1.2 – Longueurs d'ondes des ondes monochromatiques dans le vide.

II Spectre des sources lumineuses primaires

Définition O1.5 : Spectre d'émission et source primaire

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

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

II/A 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).

Définition O1.6 : Spectre d'un rayonnement thermique

Le spectre d'émission d'une source thermique est une courbe **continue**, étalée autour d'une longueur d'onde d'émission maximale $\lambda_{\max}$. 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.

Exemple O1.2 : Rayonnements de corps chauds

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

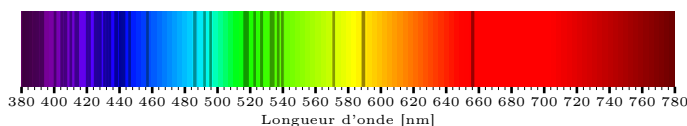


FIGURE O1.3 – Spectre lumineux reçu du Soleil.

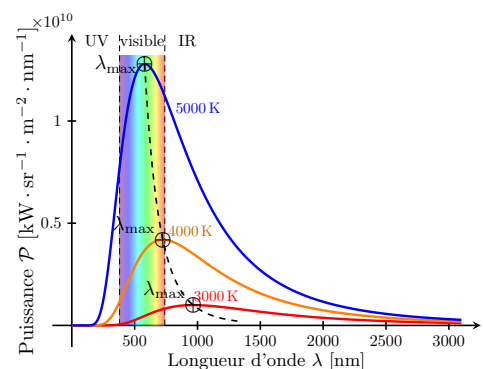


FIGURE O1.4 – Spectre d'émission d'un corps chaud.

II/B 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).

Définition O1.7 : Spectre d'un 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.

Exemple O1.3 : Sources spectrales

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.

Spectre d'émission de Hg :



FIGURE O1.5 – Spectre d'émission d'une lampe à mercure.

II/C 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.

Définition O1.8 : 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 O1.4 : Spectre d'un LASER

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

Spectre d'émission d'un laser He-Ne

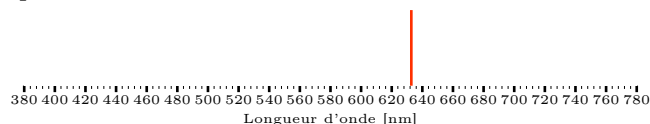


FIGURE O1.6 – Spectre d'émission d'un laser hélium-néon.

Attention O1.1 : LASER en TP

Si la puissance totale du faisceau est communément assez faible ($\mathcal{P} \approx 1 \text{ mW}$), 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. . .).