

Les ondes électromagnétiques et l'optique géométrique

I Les ondes électromagnétiques

Les ondes électromagnétiques sont des phénomènes périodiques qui, contrairement au son, se propagent aussi bien dans le vide que dans l'air. Dans le vide, leur vitesse est la plus grande qui puisse exister dans l'Univers. On parle de la célérité ou de la vitesse de la lumière et elle est représentée par le symbole c . Sa valeur est connue avec une très grande précision : $c = 299\,792,458\text{ km/s}$; la coutume, dans les applications numériques, est de considérer sa valeur approchée par excès, $c = 3 \times 10^8\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Le 10 octobre 1983, la vitesse de la lumière est devenue une constante fondamentale de la physique. Dans les milieux matériels isotropes, les ondes électromagnétiques se propagent à une vitesse plus lente notée v . Si n est l'indice du milieu traversé, on peut écrire $v = c/n$.

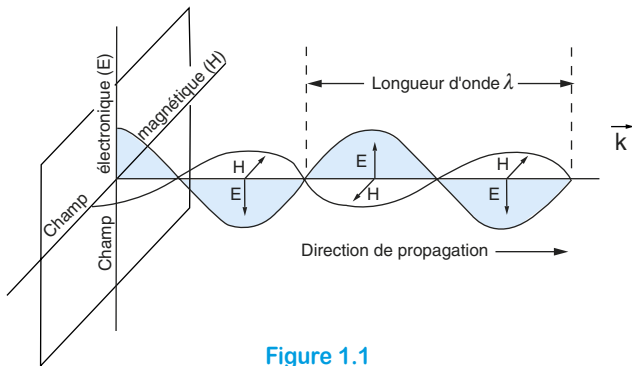


Figure 1.1

Les ondes électromagnétiques sont constituées d'un vecteur champ électrique \vec{E} et d'un vecteur champ magnétique \vec{H} , perpendiculaires entre eux (Figure 1.1). Ils sont situés dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde repérée par le vecteur d'onde \vec{k} . Dans un milieu isotrope, le vecteur \vec{k} est confondu avec le vecteur de Poynting $\vec{\Pi}$ qui repère la direction de propagation de l'énergie.

L'optique des milieux isotropes non magnétiques s'intéresse uniquement au champ électrique \vec{E} qui oscille périodiquement en fonction du temps avec une pulsation ω (unité : rad/s (radian/seconde)), une fréquence ν (unité : Hz (hertz)) et une période T (unité : s (seconde)). Ces trois dernières quantités sont reliées et l'on a :

$$\begin{aligned} \nu &= 1/T \\ \omega &= 2\pi \times \nu = 2\pi/T \end{aligned}$$

- **La longueur d'onde λ**

La distance parcourue par le champ électrique \vec{E} pendant sa période d'oscillation T représente la longueur d'onde λ (unité : m (mètre)) (Figure 1.1). Les ondes électromagnétiques sont généralement classées selon la valeur de leur fréquence ν . On peut aussi utiliser, pour ce classement, la longueur d'onde λ . Pour cela, il faut considérer la relation qui relie la fréquence ν à la longueur d'onde λ . Cette relation dépend du milieu dans lequel l'onde se propage : dans le vide, $\lambda \times \nu = c$ et dans la matière d'indice n , $\lambda \times \nu = v = c/n$. La valeur de la longueur d'onde λ dépend donc du milieu que l'onde électromagnétique traverse.

- **Les ondes monochromatiques et polychromatiques**

Lorsque l'onde électromagnétique est caractérisée par une seule fréquence ν (ou de manière équivalente une seule longueur d'onde λ), elle est dite monochromatique. Dans le cas contraire, elle est dite polychromatique.

- **Le spectre des ondes électromagnétiques**

Les ondes électromagnétiques, classées en fonction de la fréquence, constituent un spectre très vaste qui va des ondes radio, dont la fréquence est voisine de 100 kHz, jusqu'aux rayons gamma, de fréquence 10^{20} Hz provenant de l'espace interstellaire ou du soleil. Ce spectre est donné tableau 1.1.

- **La lumière que nous voyons : le visible**

La lumière que nous voyons, la lumière visible, n'est qu'une petite partie du vaste spectre des ondes électromagnétiques. Le champ électrique de la lumière visible a une fréquence d'oscillation comprise entre 385×10^{12} Hz et 750×10^{12} Hz.

Dans le vide, les longueurs d'onde λ du visible sont comprises entre $0,4 \mu\text{m}$ et $0,8 \mu\text{m}$ (où $1 \mu\text{m}$ vaut 10^{-6} m).

Tableau 1.1

Gamme	Nom	Fréquence
VLF	radio (GO)	3 kHz à 30 kHz
LF	radio (GO)	30 kHz à 300 kHz
MF	radio (OM)	300 kHz à 3 MHz
HF	radio (OC), radiotéléphone, CB	3 MHz à 30 MHz
VHF	TV, FM	30 MHz à 300 MHz
UHF	TV, radar & micro-ondes (bandes L, S)	300 MHz à 3 GHz
SHF	radar & micro-ondes (bandes C, X, K)	3 GHz à 30 GHz
EHF	radar & micro-ondes	30 GHz à 300 GHz
	infrarouge	300 GHz à 385 000 GHz
	lumière visible	385 000 GHz à 750 000 GHz
	ultraviolet	750 000 GHz à 6 millions de GHz
	rayons X	6 millions de GHz à 300 milliards de GHz
	rayons gamma	Au-delà de 300 milliards de GHz

II La propagation des ondes électromagnétiques

- **Les rayons**

Dans le vide, une onde électromagnétique se propage en ligne droite à la vitesse c . Il en est de même dans un milieu transparent et isotrope, où la propagation se fait à une vitesse v . Dans tous les cas, pour matérialiser la propagation d'une onde électromagnétique, on représente des rayons sous forme de vecteurs issus de la source ; le sens de la flèche donne le sens de déplacement de l'onde.

- **L'indice de réfraction n**

Tous les milieux matériels sont caractérisés par un indice de réfraction noté n ; cette quantité est toujours supérieure à 1 (on considère que pour le vide $n = 1$). L'indice de réfraction d'un milieu matériel est une grandeur sans dimension et n'a donc pas d'unité. Il dépend de la longueur d'onde de l'onde électromagnétique qui traverse le milieu. Il dépend aussi des conditions thermodynamiques locales du milieu comme sa densité, sa pression ou sa température.

• L'optique géométrique

L'optique géométrique se préoccupe essentiellement de la trajectoire de rayons issus de sources ponctuelles, ce qui est toujours le cas si elles sont situées à une très grande distance de l'observateur. Le formalisme de l'optique géométrique est particulièrement adapté quand les dimensions des milieux étudiés sont très grandes devant la longueur d'onde λ de l'onde électromagnétique qui les traverse.

Voyez vous cette onde !

1) Une onde électromagnétique de fréquence ν égale à 500 000 GHz se propage dans le vide.

Quelles sont sa vitesse de propagation et sa longueur d'onde ? A quelle partie du spectre des ondes électromagnétiques appartient-elle et a-t-elle une couleur ?

2) L'onde pénètre maintenant dans un milieu d'indice de réfraction $n = 2,5$. Quelles sont sa nouvelle vitesse, sa fréquence et sa longueur d'onde ? Peut-on encore lui attribuer une couleur ?

Solution

1) La vitesse de propagation dans le vide est $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. La longueur d'onde dans le vide est donnée par $\lambda = c/\nu = 0,6 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 0,6 \text{ } \mu\text{m}$. Cette onde appartient au spectre visible et est de couleur rouge.

2) Dans un milieu d'indice $n = 2,5$, la vitesse de propagation devient : $v = c/n = 1,2 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Cependant sa fréquence ν et donc sa couleur sont inchangées dans le milieu. Par contre, sa longueur d'onde est égale à $\lambda' = \frac{v}{\nu} = \frac{c}{\nu n} = \lambda/n = 0,24 \text{ } \mu\text{m}$.

Quelle est la hauteur de cet immeuble ?

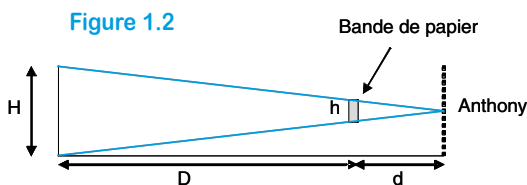
Anthony rentre du lycée en comptant soigneusement ses pas entre son immeuble et celui qui se trouve en face de chez lui. Il en déduit que les deux édifices sont séparés de $D = 100 \text{ m}$. Il monte alors en courant dans son appartement et se précipite devant la fenêtre de sa chambre pour coller sur la vitre une bande de papier rectangulaire de $h = 20 \text{ cm}$ de haut dont la largeur cache seulement celle de l'immeuble d'en face. Quand Anthony s'écarte d'une distance $d = 80 \text{ cm}$ de la bande de papier, cet immeuble disparaît de sa vue.

Montrer comment il va pouvoir épater ses copains en déduisant la hauteur de l'immeuble situé à 100 m du sien ?

Solution

Une application du théorème de Thalès donne (Figure 1.2) :

$$\frac{H}{D+d} = \frac{h}{d}, \text{ soit } H = 25,2 \text{ m.}$$



Dispersion de l'indice de réfraction

La fiche technique d'une plaque de verre isotrope et transparente indique que son indice de réfraction dépend de la longueur d'onde selon la loi suivante :

$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2}$, où λ est la longueur d'onde, exprimée en microns ; A et B sont des constantes : $A = 1,3452$ et $B = 3315,53 * 10^{-6} \mu\text{m}^2$.

Quel est l'écart relatif sur la valeur de l'indice de réfraction de la plaque de verre selon qu'elle est traversée par de la lumière verte de longueur d'onde $\lambda_{\text{verte}} = 0,558 \mu\text{m}$ ou de la lumière bleue de longueur d'onde $\lambda_{\text{bleue}} = 0,400 \mu\text{m}$?

Solution

Une application numérique simple donne $n(\lambda_{\text{verte}}) = 1,3558$ et $n(\lambda_{\text{bleue}}) = 1,3659$, soit un écart relatif entre les valeurs de l'indice de $\frac{n(\lambda_{\text{bleue}}) - n(\lambda_{\text{verte}})}{n(\lambda_{\text{verte}})} = \Delta n/n(\lambda_{\text{verte}}) \approx \Delta n/n(\lambda_{\text{bleue}}) = 7,4 \cdot 10^{-3}$.