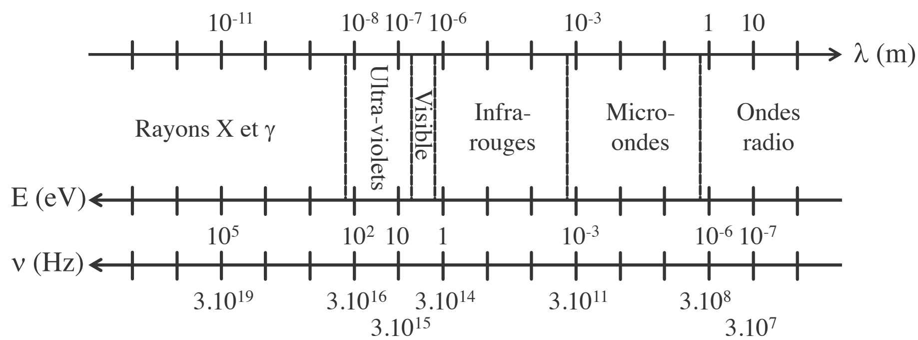
L'essentiel du cours – Chapitre 1

I. Ondes lumineuses et mécaniques

1. Ondes lumineuses

Les ondes lumineuses sont des ondes électromagnétiques correspondant à la propagation de la variation de proche en proche d'un champ électrique couplé à un champ magnétique et donc à un transport d'énergie.

Nomenclature des rayonnements électromagnétiques



vitesse d'une onde lumineuse : la propagation de la lumière dépend de l'indice de réfraction n du milieu traversé :

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

v et c en $m.s^{-1}$, n sans unité.

remarques :

1- Si l'indice de réfraction augmente, la vitesse de l'onde lumineuse diminue (ex : vitesse de la lumière dans le verre ($n = 1,5$) $= 2.10^{8}$ $m.s^{-1}$).

2- La longueur d'onde λ dépend aussi du milieu traversé, contrairement à la fréquence de l'onde qui est invariante :

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

λ en m dans un milieu d'indice n, λ_0 la longueur d'onde de la lumière dans le vide en m.

2. Ondes progressives

définition : propagation dans un milieu d'au moins une perturbation.

remarques :
1- Les ondes lumineuses sont un exemple d'ondes progressives, la perturbation du champ électromagnétique se déplace de proche en proche.
2- Une onde est dite mécanique si elle nécessite un milieu matériel pour se propager. Les ondes sonores sont donc des ondes mécaniques, elles correspondent à une variation locale de la pression d'un fluide (liquide ou gaz).
3- La propagation d'une onde peut se faire dans une direction (oscillation d'une corde), deux directions (vagues à la surface de l'eau) ou dans les trois directions de l'espace (ondes sonores et électromagnétiques).

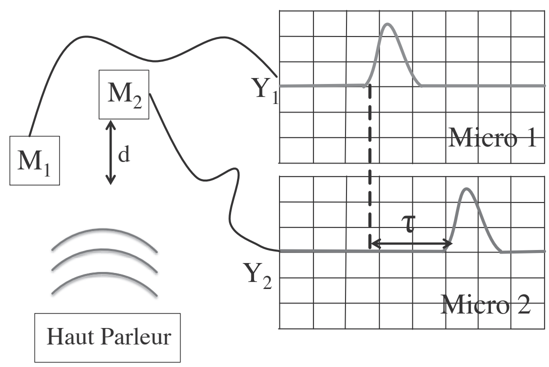
retard d'une onde progressive : on appelle retard τ la durée nécessaire pour qu'une onde parcourt une distance d :

$$\tau = \frac{d}{v}$$

τ en s, d en m, v en m.s^{-1}.

enregistrement du retard τ d'une onde sonore :

A l'aide d'un haut parleur, on génère une impulsion sonore qui est enregistrée sur deux microphones séparés d'une distance d et reliés à un oscilloscope. Le son arrive avec un retard τ sur le microphone 2 visualisable sur l'oscilloscope. En connaissant d, on peut déduire la vitesse v de l'onde sonore.



ondes progressives périodiques : quand la perturbation se reproduit identique à elle-même à un intervalle de temps T régulier, l'onde est progressive périodique. On appelle T la période de l'onde.

remarques :
1- la fréquence f (parfois notée ν) de l'onde est égale au nombre de perturbations enregistrées par unité de temps :

$$f = \frac{1}{T}$$

f en hertz (Hz), T en s.

2- Les ondes progressives périodiques présentent une double périodicité temporelle (symbolisée par la période T) et spatiale (symbolisée par la longueur d'onde λ) :

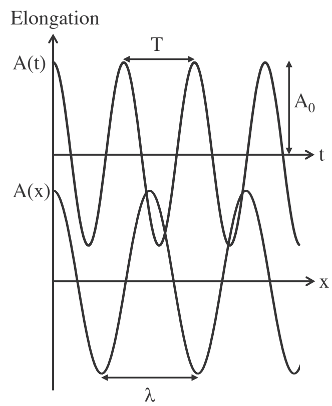
$$\lambda = vT$$

λ en m, v en m.s^{-1}, T en s.

3- Une onde est progressive périodique et sinusoïdale lorsque son élongation A(t) s'exprime par une fonction cosinus ou sinus :

$$A(t) = A_0 \sin(\omega_0 t - \varphi)$$

A_0 l'amplitude, $\omega_0 = 2\pi f$ la pulsation de l'onde en radian par seconde ($rad.s^{-1}$), φ la phase de l'onde en radian (rad).



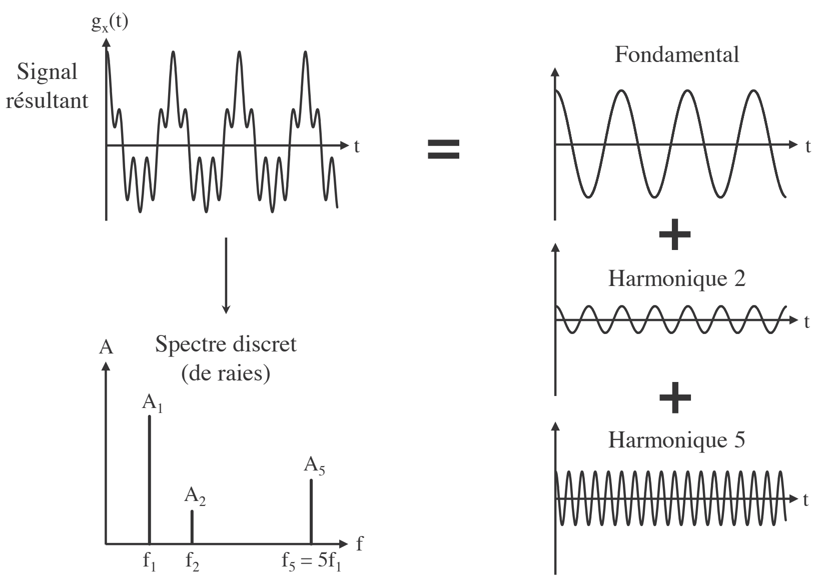
$\boxed{\lambda = vT}$

spectre d'une onde progressive complexe (ou polychromatique) : un signal périodique réel (son d'un instrument par exemple) $g_x(t)$ de fréquence f_1 se décompose en une somme de signaux sinusoïdaux de fréquences f_n, appelés harmoniques :

$$g_x(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{k} A_n \sin[(n\omega)t + \varphi_n]$$

A_0 la grandeur physique avant perturbation, A_n l'amplitude de l'harmonique n, $\sin[(n\omega)t + \varphi_n]$ l'harmonique n de fréquence $f_n = \frac{n\omega}{2\pi}$.

Le signal peut être discrétisé en un spectre de raies ou d'harmoniques (cf. figure ci-dessous).



remarques :
1- On appelle fondamental l'harmonique de plus faible fréquence f_1. Cette fréquence est une caractéristique physiologique d'un son (plus un son est aigu, plus f_1 est grande). Le fondamental correspond à la hauteur d'un son.
2- La fréquence de chaque harmonique est un multiple entier de la fréquence du fondamental :

$$f_n = nf_1$$

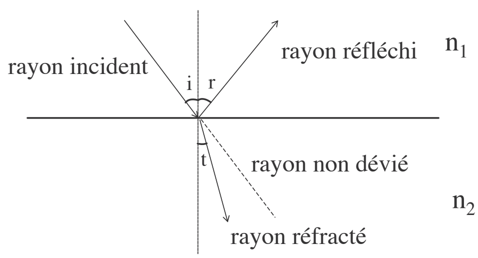
3- Le timbre d'une onde sonore est défini par le nombre et l'amplitude des harmoniques.
4- Une onde pure n'admet qu'une seule harmonique, elle est monochromatique (exemple : diapason).

II. Propriétés ondulatoires

1. Optique géométrique

lois de Snell-Descartes : soit un rayon incident dans un milieu d'indice n_1 formant un angle i par rapport à la normale à une interface d'indice n_2. Soit r l'angle du rayon réfléchi et t l'angle du rayon réfracté.

1ère loi : les rayons incident, réfléchi et réfracté sont contenus dans le même plan.
2ème loi : l'angle du rayon incident i est égal à l'angle du rayon réfléchi r.
3ème loi : $n_1 \sin i = n_2 \sin t$.

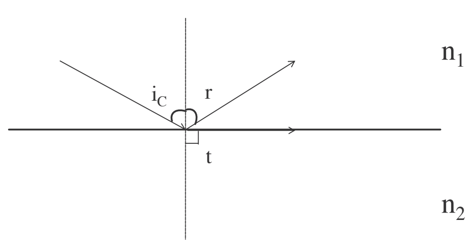


$n_1 < n_2$ (ex: air-eau)

remarque : si $n_1 < n_2$ (ex air $n_1 = 1$, eau $n_2 = 1,33$), le rayon réfracté se rapproche de la normale à l'interface. Si $n_1 > n_2$, le rayon s'écarte de la normale.

réflexion totale : si $n_1 > n_2$, il existe un angle critique i_c à partir duquel il n'existe plus de transmission.

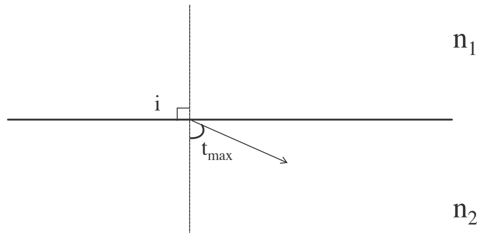
$$t = \frac{\pi}{2} \Rightarrow i_c = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$



$n_1 > n_2$ (ex: eau-air)

réfraction maximale : si $n_1 < n_2$, il existe un angle de réfraction maximale t_{max}.

$$i = \frac{\pi}{2} \Rightarrow t_{max} = \sin^{-1}\left(\frac{n_1}{n_2}\right)$$



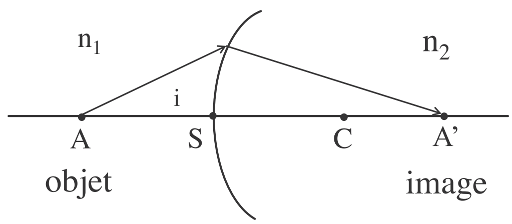
$n_1 < n_2$ (ex: air-eau)

dioptre : espace transparent d'indice de réfraction n_2 placé dans un milieu n_1.

formule de conjugaison (cas des dioptres sphériques) :

$$\frac{n_2 - n_1}{\overline{SC}} = \frac{n_2}{\overline{SA'}} - \frac{n_1}{\overline{SA}}$$

avec n_2 indice de réfraction du prisme, n_1 indice de réfraction du milieu, $\overline{SC}$ distance entre le centre de courbure et le sommet du dioptre, $\overline{SA'}$ distance entre le sommet et l'image, $\overline{SA}$ distance entre le sommet et l'objet.



remarques :

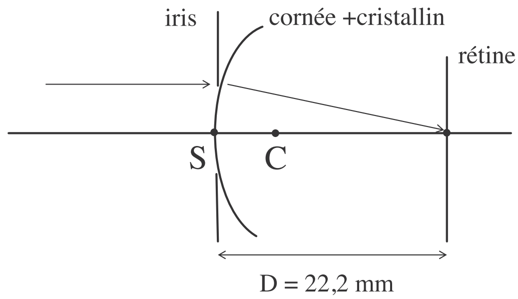
1- Dans la formule de conjugaison, $\overline{SC}$, $\overline{SA'}$ et $\overline{SA}$ sont des grandeurs algébriques comptées positivement dans le sens de la propagation de la lumière, dans le schéma ci-dessus, $\overline{SC}$ et $\overline{SA'} > 0$; $\overline{SA} < 0$.

2- La puissance d'un dioptre est donnée par $\overline{\pi} = \frac{n_2 - n_1}{\overline{SC}}$ en dioptries (δ).

Si $\overline{\pi} < 0$: dioptre divergent, si $\overline{\pi} > 0$ dioptre convergent.

3- Dans les approximations de Gauss, on considère que l'image est stigmate : l'image d'un point est un point ; et aplanétique : l'image d'un objet perpendiculaire à l'axe optique reste perpendiculaire.

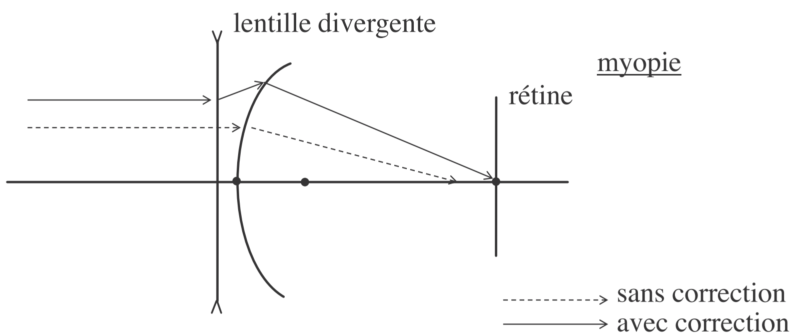
modélisation de l'œil : dioptre unique de 60 δ pour un objet à l'infini et de rayon de courbure $\overline{SC}$ = 5,6 mm séparant l'air (n_1=1) et l'humeur aqueuse (n_2 = 1,34). L'iris se comporte comme un diaphragme et la rétine joue le rôle d'écran pour la formation de l'image.

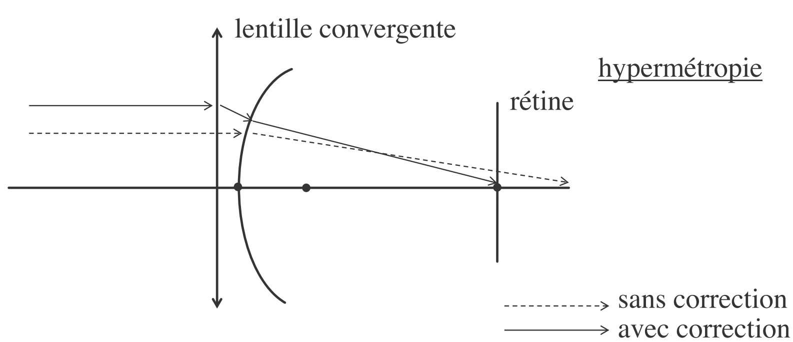


remarque : un œil est au repos si l'objet est supposé à l'infini, c'est-à-dire pour une distance supérieure à environ 5 m. Pour des objets proches l'œil accommode grâce au cristallin. Dans ce cas la vergence de l'œil augmente.

corrections amétropies visuelles :

- myopie : l'image se forme devant la rétine. On utilise un dioptre divergent pour que l'image soit formée sur la rétine.
- hypermétropie : l'image se forme derrière la rétine. On utilise un dioptre convergent pour que l'image soit formée sur la rétine.

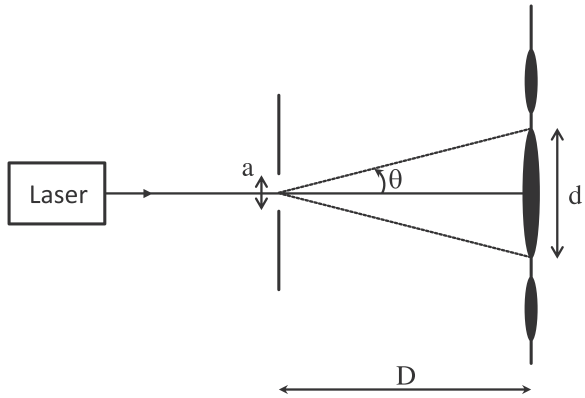




2. Diffraction

principe : en éclairant une fente rectangulaire à l'aide d'un laser monochromatique, la propagation de l'onde est modifiée, caractérisée par l'alternance de zones lumineuses et de zones sombres sur un écran (figure de diffraction).

schéma expérimental :



écart angulaire (angle de demi-diffraction θ) : l'angle formé par le faisceau lumineux par rapport à la tache centrale est égal à :

$$\theta = \frac{\lambda}{a}$$

avec θ en radian (rad), λ la longeur d'onde en m, a la largeur de la fente en m.

En pratique D >> d, grâce à l'approximation aux petits angles $\tan\theta \approx \theta$, on obtient :

$$\theta = \frac{d}{2D} \Leftrightarrow d = \frac{2D\lambda}{a}$$

avec θ en radian (rad), d, D, λ et a en m.

remarques :

1- La diffraction permet de mesurer la taille a de très petits objets (structures moléculaires, découverte de l'hélicité de l'ADN grâce à la diffraction).

2- Si a >> λ, la largeur de la tache centrale d est nulle. On considère que le phénomène de diffraction intervient seulement si $\lambda \leq a$.

3- La largeur de la tache centrale est proportionnelle à la longeur d'onde λ. Le phénomène de diffraction est atténué si la longeur d'onde λ du faisceau diminue.
application : stockage optique.

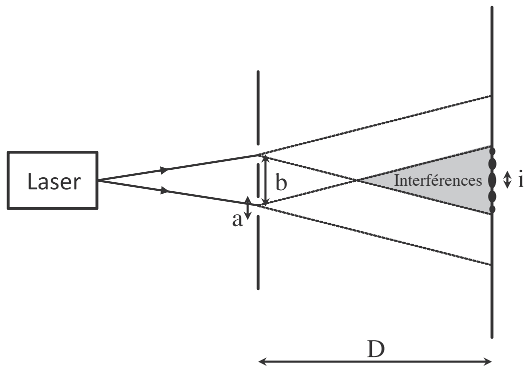
4- Dans le cas d'une fente circulaire :

$$\theta = 1{,}22\frac{\lambda}{b}$$

θ en radian (rad), b le diamètre de la fente et l en m.

3. Interférences

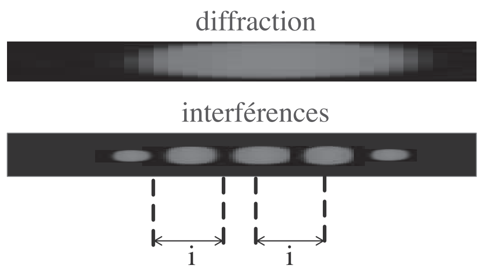
principe : on éclaire grâce à un laser monochromatique deux fentes parallèles de largeurs a et séparées d'une distance b (fentes de Young). Sur un écran situé à une distance D, on observe une alternance de franges brillantes et sombres.



remarque : la distance séparant le centre de deux franges brillantes ou sombres est appelée l' interfrange i :

$$i = \frac{\lambda D}{b}$$

i, λ, D et b en m.



interférences constructives et destructives : le phénomène d'interférence est dû à l'addition d'ondes cohérentes (même longueur d'onde λ, déphasage $\Delta\varphi$ constant). Soit δ la différence de chemin optique (ou différence de marche) qui est égal à la différence des trajets parcourus par la lumière multiplié par l'indice de réfraction du milieu de propagation. Soit $\delta = n'S_2M - nS_1M$.

- Si $\delta = k\lambda$ ($k \in \mathbb{Z}$), interférence constructive : les ondes arrivant en phase ($\Delta\varphi = 0 + 2k\pi$) ajoutent leurs intensités, observation d'une frange brillante.
- Si $\delta = \left(k + \frac{1}{2}\right)\lambda$ ($k \in \mathbb{Z}$), interférence destructive : les ondes arrivant en opposition de phase ($\Delta\varphi = \pi + 2k\pi$) annulent leurs intensités, observation d'une frange sombre.