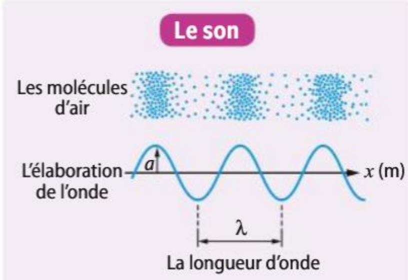
Chapitre 13 : caractériser les phénomènes ondulatoires

I) Propagation d'un son et sensation auditive

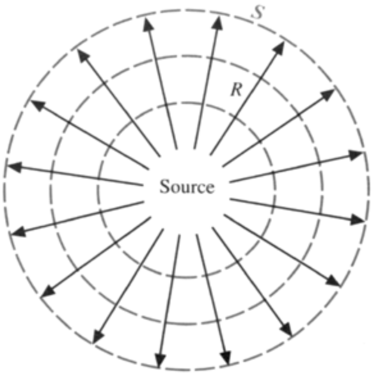


1) Définition

Un son est une onde mécanique longitudinale qui se propage en transportant de l'énergie.

2) Intensité sonore

Lorsqu'une onde sonore est émise avec une certaine « force » (appelée puissance acoustique P) par une source ponctuelle, elle se propage uniformément dans toutes les directions. À chaque instant, la surface atteinte par cette onde est une sphère d'aire S (ci-contre).



On définit **l'intensité acoustique** (ou **sonore**), notée $\mathbf{I}$, par la puissance acoustique (ou puissance sonore) reçue par unité de surface du récepteur ; elle s'exprime en **watt par mètre carré** (symbole : $W.m^{-2}$).

$$\boxed{I = \frac{P}{S}} \qquad \begin{cases} P = \text{puissance acoustique de la source (en W)} \\ S = \text{surface du récepteur (en m}^2\text{)} \\ I = \text{intensité acoustique (en W.m}^{-2}\text{)} \end{cases}$$

▶ L'intensité acoustique minimale perçue par l'oreille humaine est de l'ordre de 10^{-12} $W.m^{-2}$: c'est le **seuil d'intensité acoustique**.

▶ L'intensité acoustique maximale perçue par l'oreille humaine est de l'ordre 25 $W.m^{-2}$: c'est le **seuil de douleur**. Au-delà, il y a destruction du tympan.

⇒ L'intensité acoustique d'un son est liée à l'amplitude de l'onde sonore.

3) Niveau sonore

Le système auditif humain est d'une très grande sensibilité : il peut détecter des sons provoquant des déplacements du tympan de l'ordre de 10 nm !

La sensation auditive n'est pas proportionnelle à l'intensité acoustique I : elle est liée au niveau d'intensité acoustique.

Le **niveau d'intensité acoustique (ou sonore) L** (L comme « *level* » en anglais) est défini par :

$$\boxed{L = 10 \times \log\left(\frac{I}{I_0}\right)} \qquad \begin{cases} I = \text{intensité acoustique de la source (en W.m}^{-2}\text{)} \\ I_0 = \text{internsité acoustique de référence (en W.m}^{-2}\text{)} \\ L = \text{niveau d'intensité acoustique (en dB)} \end{cases}$$

dB = décibel

Ou encore : $\boxed{I = I_0 \times 10^{\left(\frac{L}{10}\right)}}$

($I_0 = 1 \times 10^{-12}$ $W.m^{-2}$, correspond au seuil d'audibilité à 1000 Hz)

Exemple :

Au bord d'un circuit automobile, l'intensité sonore reçue est de 2,4.10^{-3} W/m2. Le niveau d'intensité sonore est donc de L=10 log($\frac{I}{I0}$)=10 log ((2,4.10^{-3})/1,1.10^{-12})=94 dB

Remarques :

→ Quand l'intensité acoustique I est multipliée par 2, le niveau d'intensité acoustique augmente de 3 dB. (L'= 10 log($\frac{2I}{Io}$) = 10 log(2) + 10 log($\frac{I}{Io}$) = 3 + L)

→ Quand l'intensité acoustique I est multipliée par 10, le niveau d'intensité acoustique augmente de 10 dB.

→ Quand l'intensité acoustique I est multipliée par 100, le niveau d'intensité acoustique augmente de 20 dB.

→ Quand l'intensité acoustique I est multipliée par 1000, le niveau d'intensité acoustique augmente de 30 dB.

<u>Remarques :</u>

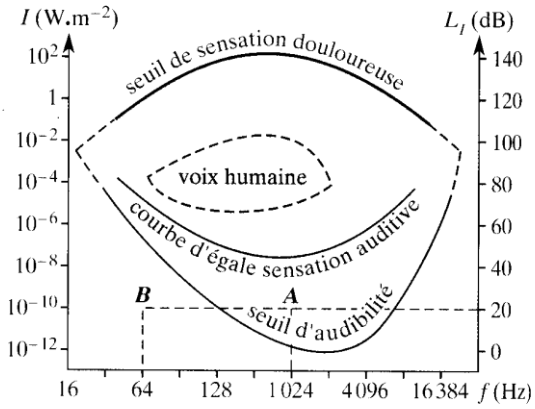
- Ce que l'on entend et que l'on mesure est le **niveau de pression acoustique (ou sonore) L_W** , qui s'exprime en décibel A (symbole : **dB[A]**) et est définit par :

$$\boxed{L_W = 10 \times \log\left(\frac{p}{p_0}\right)}$$

p = pression acoustique de la source (en Pa)
p_0 = pression acoustique de référence ($p_0 = 2,0 \times 10^{-5}$ Pa)
L_W = niveau de pression acoustique (en dB[A])

$$L = 10 \times \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \Leftrightarrow L = 10 \times \log\left(\frac{p/S}{p_0/S}\right) \Leftrightarrow L = 10 \times \log\left(\frac{p}{p_0}\right) = L_w$$

- L'oreille humaine perçoit des signaux sonores dont l'intensité varie entre une valeur minimale I_0 = 1×10^{-12} W.m^{-2}, correspond au seuil d'audibilité, et une valeur maximale I_{max} = 25 W.m^{-2}, correspondant au seuil de douleur.

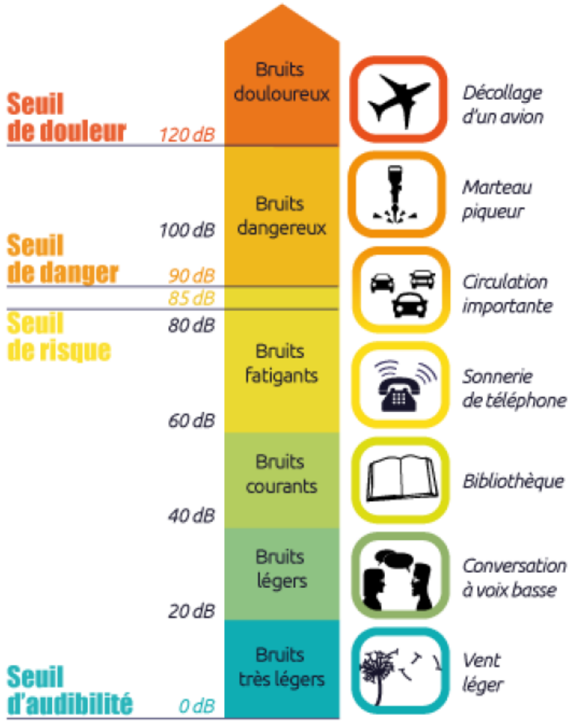


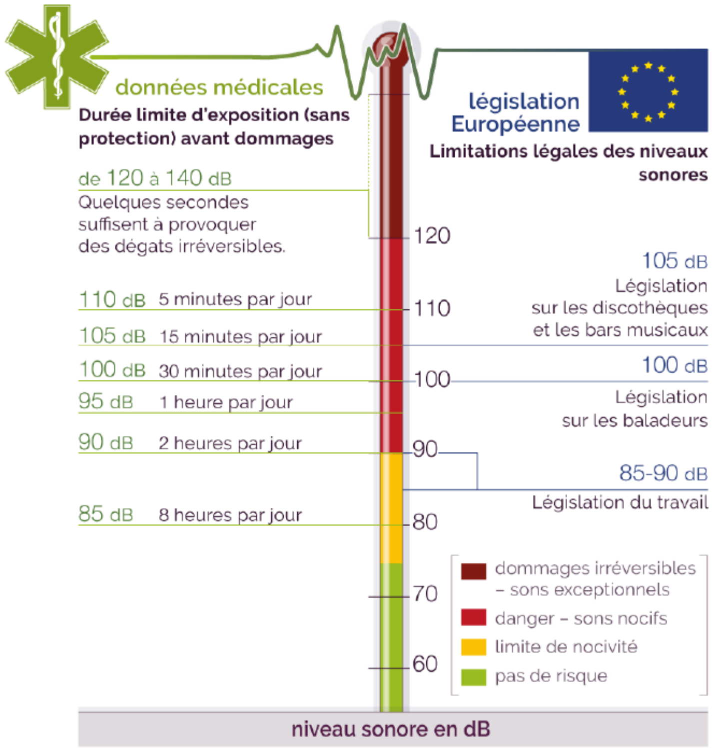
L'oreille perçoit différemment des sons de même niveau d'intensité acoustique, mais de fréquences différentes.

Le document ci-contre donne des courbes d'égale sensation auditive ainsi que les seuils d'audibilité et de douleur en fonction de la fréquence.

← <u>Exemple :</u> un son de niveau d'intensité acoustique de 20 dB est entendu lorsqu'il est émis à 1 024 Hz (point **A**) alors qu'il ne l'est pas à 64 Hz (point **B**).

Exemples :





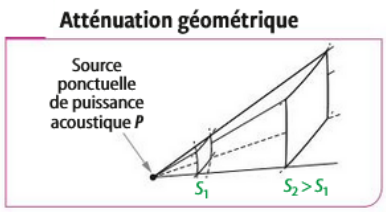
4) Atténuation

L'atténuation d'un son dont le niveau acoustique passe de L_i à L_f vaut :

$$Li - Lf = 10 \log\left(\frac{I_i}{I_f}\right)$$

Il y a deux raisons à l'atténuation :

- L'atténuation géométrique : l'intensité sonore diminue quand on s'éloigne d'une source car l'aire de la surface sur laquelle la puissance émise se répartit augmente.
  A mesure que le son se propage, la puissance acoustique P se répartie sur une surface S de plus en plus grande. Par conséquent, le niveau d'intensité sonore L diminue ; le son est atténué.



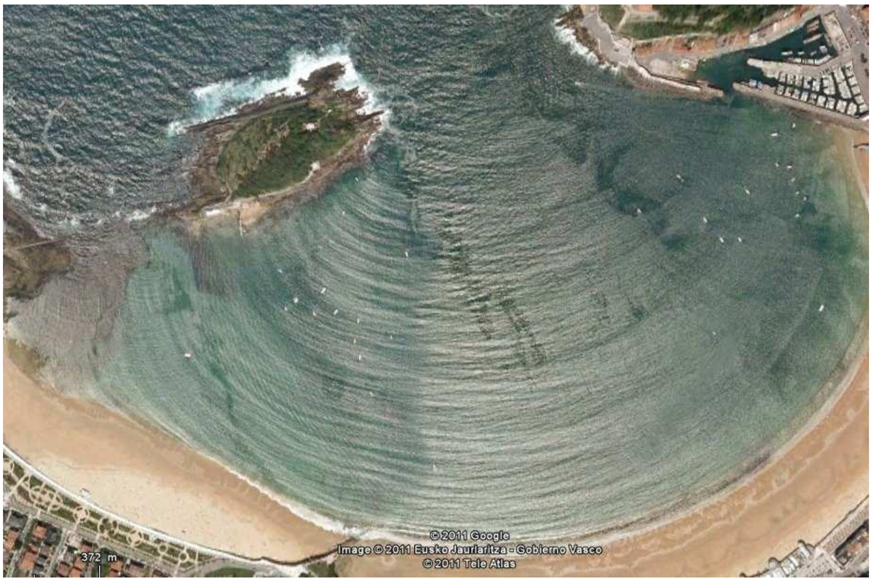
$$L = 10 \times \log\left(\frac{I}{I_0}\right) = 10 \times \log\left(\frac{\frac{P}{S}}{I_0}\right) = 10 \times \log\left(\frac{P}{S \times I_0}\right)$$

- L'atténuation par absorption : l'intensité sonore diminue quand le son traverse un milieu matériel dans lequel une partie de la puissance sonore est absorbée.

atténuation par absorption de 27dB

II) Diffraction des ondes

1) Les ondes mécaniques



Lorsqu'une onde mécanique progressive plane rencontre une ouverture de dimension voisine de celle de sa longueur d'onde, elle devient une onde mécanique progressive circulaire qui se propage dans une large partie du milieu, au-delà de l'obstacle.

← Le port de San Sébastian (pays basque espagnol), photographié à marée basse

Définition :

La **diffraction** est le phénomène qui se produit lorsqu'une onde mécanique rencontre une ouverture ou un obstacle de dimension proche de sa longueur d'onde ou inférieure : l'onde s'étale perpendiculairement à l'obstacle.

Remarques :

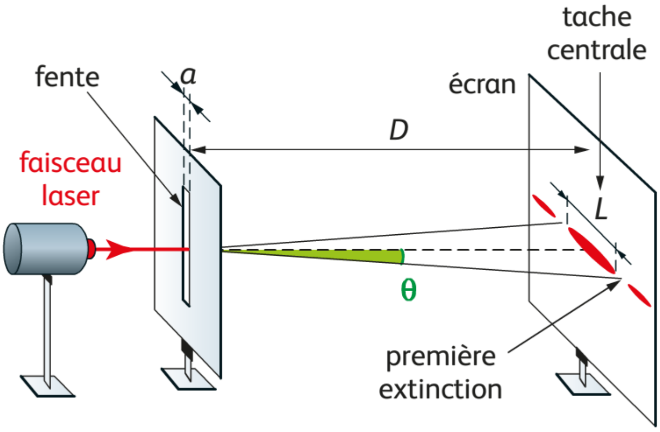
- L'onde garde la même fréquence *f* après la diffraction ;
- Si le milieu de propagation est le même avant et après l'obstacle (ou l'ouverture) alors l'onde garde la même célérité. La longueur d'onde reste donc la même.

2) Les ondes électromagnétiques

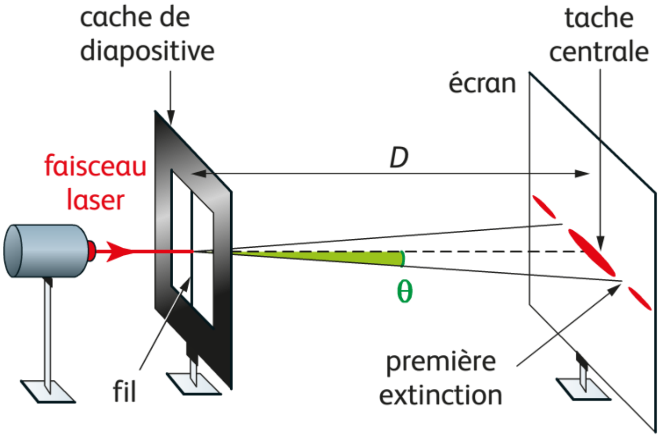
i. Lumière monochromatique

Le phénomène de diffraction peut également se produire avec les ondes électromagnétiques : en plaçant une fente (ou un fil) sur la trajectoire d'un faisceau de lumière (monochromatique), on observe le phénomène de diffraction qui provoque un étalement du faisceau dans une direction perpendiculaire à la fente (ou au fil).

Dispositifs expérimentaux :

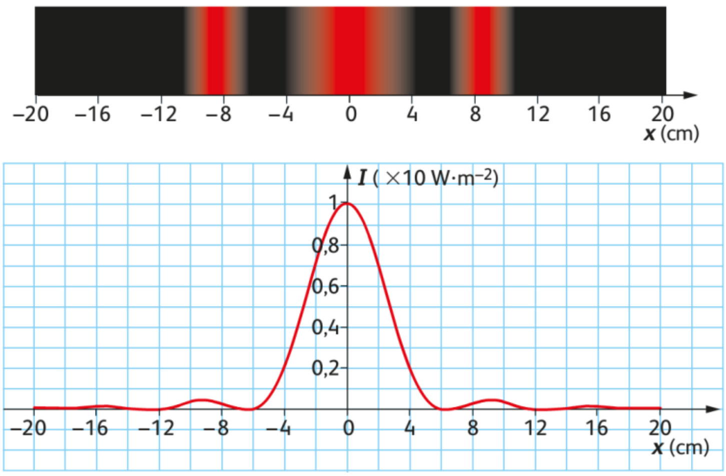


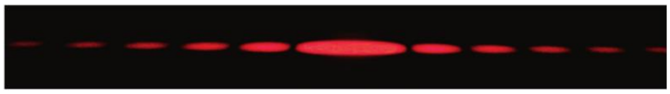
Dispositif expérimental de la diffraction par une fente



Dispositif expérimental de la diffraction par un fil

Figure de diffraction obtenue :





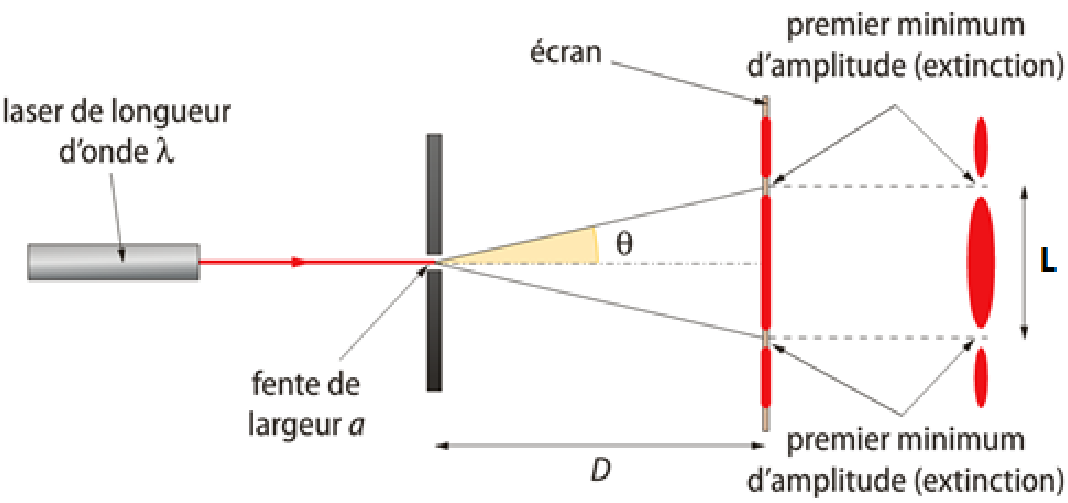
← Figure de diffraction et intensité lumineuse

A RETENIR :

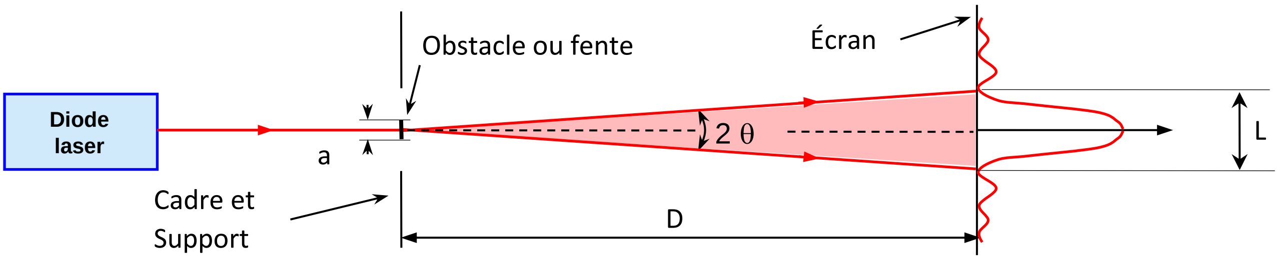
- On observe un phénomène de diffraction lorsqu'une onde traverse une ouverture ou rencontre un obstacle **dont la dimension est voisine de la longueur d'onde de l'onde qui diffracte** ;
- L'onde diffractée présente des **maximas** et des **minimas** d'amplitude ;
- Plus la dimension de l'ouverture de la fente (ou la taille de l'obstacle) diminue et plus le phénomène de diffraction est important (la largeur de la tache centrale de la figure de diffraction augmente).

Écart angulaire :

L'importance du phénomène de diffraction d'une onde est mesuré par le demi-angle délimitant les premiers minima d'amplitude :



Autre vue :



Définition :

L'écart angulaire de diffraction représente l'angle entre la direction de propagation de l'onde en l'absence de diffraction et la direction définie par le milieu de la première extinction. On le note **θ** et il s'exprime en radian (symbole : *rad*).

Dans le cas d'une fente (ou d'un fil) rectiligne, l'écart angulaire θ (en rad) entre le milieu de la tache centrale et la première extinction du faisceau diffracté est donné par :

$$\boxed{\theta = \frac{\lambda}{a}} \qquad \begin{cases} \lambda = \text{longueur d'onde de l'onde incidente (en m)} \\ a = \text{largeur de la fente ou du fil (en m)} \\ \theta = \text{écart angulaire (en rad)} \end{cases}$$

A RETENIR :

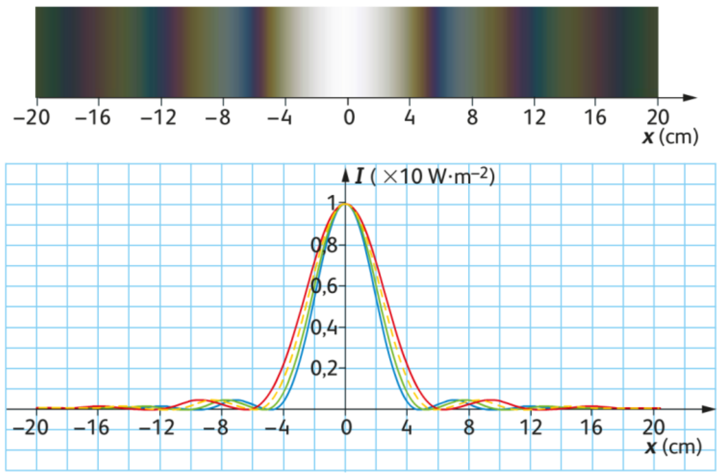
- L'écart angulaire **augmente** lorsque la longueur d'onde λ de l'onde **augmente** ;
- L'écart angulaire **augmente** lorsque la dimension de la fente ou de l'obstacle **diminue** ;
- L'écart angulaire dépend de la largeur de la tache centrale L et de la distance écran-fente (ou obstacle) D :

D'après la figure ci-dessus, on peut écrire : $\tan\theta = \dfrac{L/2}{D} = \dfrac{L}{2D}$.

Dans l'approximation des petits angles ($\tan\theta \approx \theta$), on obtient : $\theta = \dfrac{L}{2D}$

$$\Rightarrow \frac{\lambda}{a} = \frac{L}{2D} \Leftrightarrow \boxed{L = \frac{2\lambda D}{a}}$$

ii. Lumière blanche

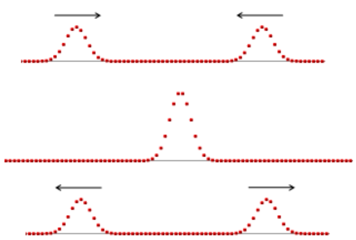


Dans le cas d'une source de lumière blanche, la figure de diffraction obtenue présente une irisation des franges (taches) de part et d'autre de la frange centrale qui elle, est blanche : les radiations de longueur d'onde différente sont diffractées différemment et les figures de diffraction, pour chaque couleur, se superposent.

← Figure de diffraction et intensité lumineuse

III) Interférences de deux ondes

1) Superposition de deux ondes mécaniques



Soit un point M se trouvant simultanément sur le passage de deux ondes : la perturbation résultante en ce point correspond à la « somme » des deux perturbations.

Après le croisement, les deux perturbations continuent sans être modifiée.

Exemples :

Port de San Sébastien à marée haute

Port de Saint-Jean de Luz

Définition :

Lorsque deux ondes mécaniques de même nature (même fréquence) se superposent, l'amplitude de l'onde résultante varie dans l'espace : c'est le phénomène **d'interférences**. On observe alors sur la figure d'interférences, des franges d'interférences.

A RETENIR :

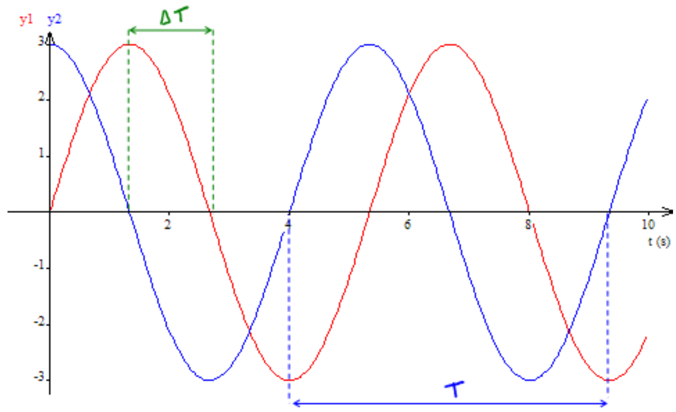
Pour que l'on puisse observer un phénomène d'interférences en un point M d'un milieu, il faut que les deux sources d'ondes soient **synchrones** (⇔ qu'elles aient même fréquence donc même longueur d'onde) et **cohérentes** (⇔ que le déphasage entre elles soit constant au cours du temps).

2) Sources cohérentes

Définition :

Deux sources sont cohérentes lorsqu'elles émettent des ondes sinusoïdales de même fréquence et si le retard de l'une par rapport à l'autre ne varie pas au cours du temps. : elles gardent alors un déphasage constant.

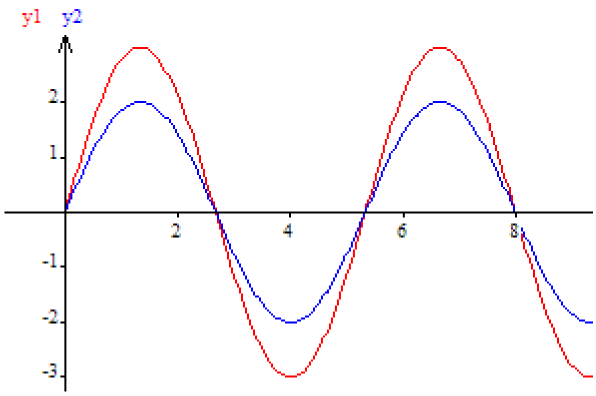
Exemple :



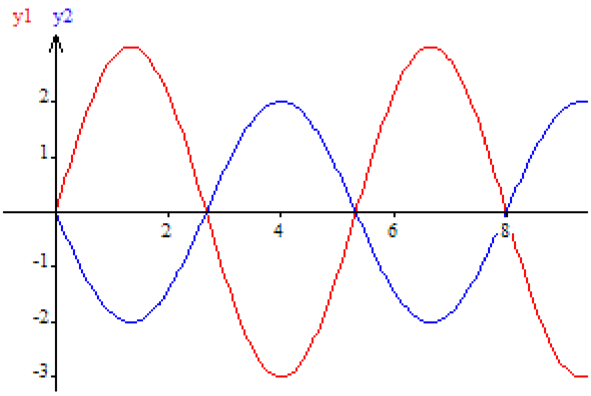
→ Le déphasage entre l'élongation $y_1(t)$ produite par une source ❶ et l'élongation $y_2(t)$ produite par une source ❷ est constant au cours du temps et égale à ΔT.

Remarques :

- Si le **décalage est nul** ou multiple de la période, les deux courbes sont superposées : elles sont **en phase** ;
- Si le maximum de l'une coïncide avec le minimum de l'autre, les deux courbes sont en **opposition de phase**.



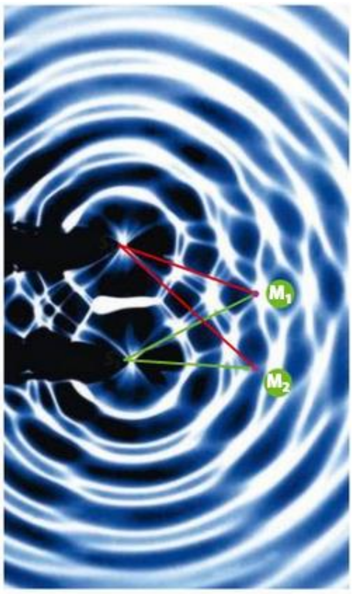
Courbes en phase



Courbes en opposition de phase

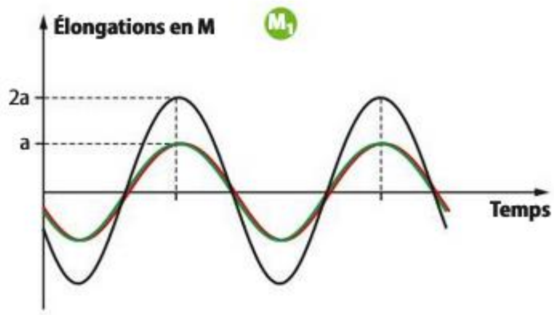
3) Interférences de deux ondes mécaniques

Soient deux ondes issues de deux sources cohérentes S_1 et S_2 qui interfèrent en un point M.

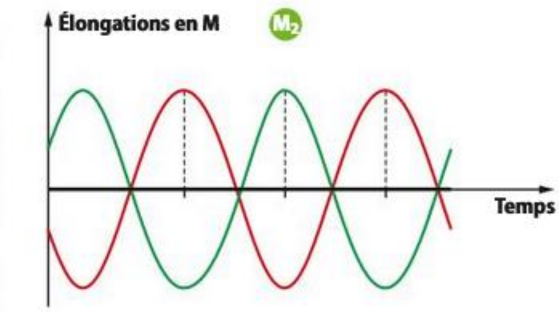


- Soit y_1 (t) est l'élongation au point M due à la source S_1, fonctionnant seule.
- Soit y_2 (t) est l'élongation au point M due à la source S_2, fonctionnant seule.

→ Lorsque les sources fonctionnent ensemble, l'amplitude au point M s'écrit $y(t)= y_1(t)+ y_2(t)$.



Lorsque les deux ondes arrivent en M en phase, l'amplitude de l'onde résultante est alors maximale en M : on dit qu'il y a **interférence constructive**.



Lorsque les deux ondes arrivent en M en opposition de phase, l'amplitude de l'onde résultante est alors minimale ou nulle en M : on dit qu'il y a **interférence destructive**.

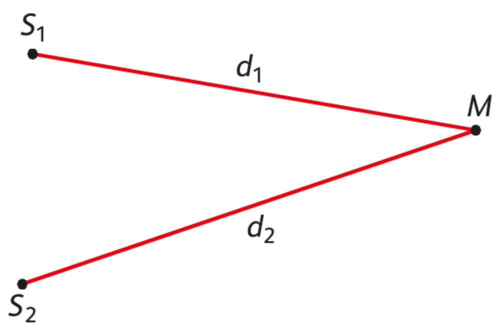
A RETENIR :

Les interférences de deux ondes monochromatiques de même longueur d'onde (cohérentes) en un point sont dites :

- ❖ **Constructives** si les ondes sont en phase : l'amplitude de l'onde résultante est maximale ;
- ❖ **Destructive** si les deux ondes sont en opposition de phase : l'amplitude de l'onde résultante et minimale ou nulle.

i. Relation entre retard et période

Soient deux ondes issues de deux sources cohérentes S_1 et S_2 de même période T qui interfèrent en un point M.



- ❖ Si S_1 vibrait seule, la perturbation arriverait en un point M avec un retard :

$$\tau_1 = \frac{d_1}{v} \text{ (avec v = célérité de l'onde)}$$

- ❖ Si S_2 vibrait seule, la perturbation arriverait en un point M avec un retard :

$$\tau_2 = \frac{d_2}{v} \text{ (avec v = célérité de l'onde)}$$

$\Rightarrow$ **Si $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1 = kT$** ($k \in \mathbb{Z}$) alors les deux ondes arrivent en M en phase : les interférences sont **constructives** ;

$\Rightarrow$ **Si $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1 = (2k + 1)\ T/2$** ($k \in \mathbb{Z}$) alors les deux ondes arrivent en M en opposition de phase : les interférences sont **destructives**.

A RETENIR :

Les interférences de deux ondes monochromatiques de même longueur d'onde (cohérentes) en un point sont :

- ❖ **Constructives** si $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1 = kT$ (avec $k \in \mathbb{Z}$) ;
- ❖ **Destructive** si $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1 = (2k + 1)\frac{T}{2}$ ($k \in \mathbb{Z}$).

ii. Différence de marche

Définition :

On appelle **différence de marche** δ en un point M la différence entre les deux distances d_1 et d_2 distances entre chacune des deux sources et le point M :

$$\boxed{\delta = d_2 - d_1 = S_2M - S_1M}$$

Si v est la célérité des ondes dans le milieu de propagation alors :

$$\delta = d_2 - d_1 = v \times \tau_2 - v \times \tau_1 = v \times (\tau_2 - \tau_1)$$

$\lambda = v \times T$

Ainsi :

Type d'interférences	Retard	Différence de marche	Remarque
Constructive	$\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1 = kT$	$\delta = v \times k \times T = k\lambda$ δ est un nombre entier de la longueur d'onde	$k \in \mathbb{Z}$
Destructives	$\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1 = (2k+1)\dfrac{T}{2}$	$\delta = v \times (2k+1) \times \dfrac{T}{2} = (2k+1)\dfrac{\lambda}{2}$ δ est un nombre impair de la demi-longueur d'onde	$k \in \mathbb{Z}$

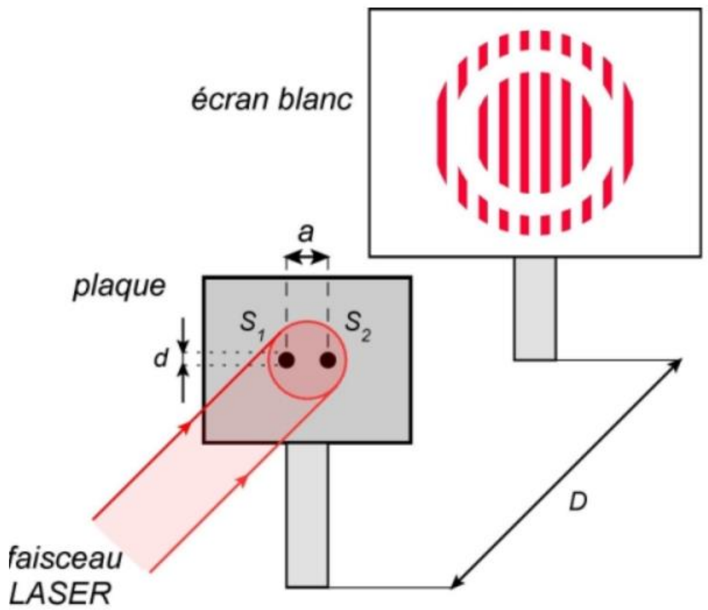
A RETENIR :

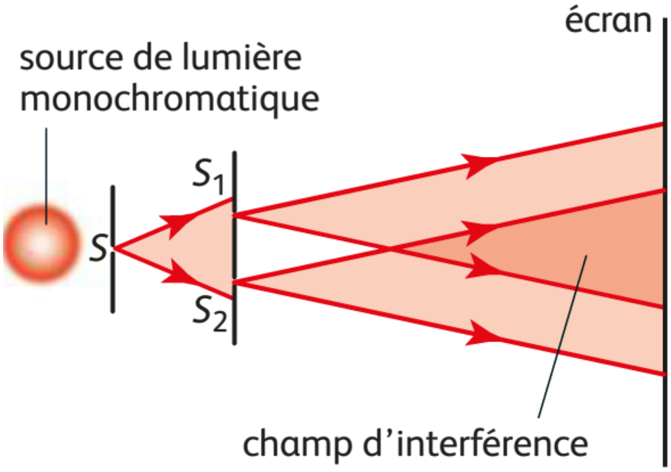
Les interférences de deux ondes monochromatiques de même longueur d'onde (cohérentes) en un point sont :

- **Constructives** en tout point où $\boldsymbol{\delta = k\lambda}$ (avec $k \in \mathbb{Z}$) ;
- **Destructives** en tout point où $\boldsymbol{\delta = (2k+1)\dfrac{\lambda}{2}}$ (avec $k \in \mathbb{Z}$).

4) Expérience des trous de Young

Dans le cas de la lumière, on peut obtenir des interférences en utilisant une même source que l'on « divise » puis que l'on « recombine » on obtient ainsi deux sources lumineuses cohérentes :





Dispositif des trous d'Young

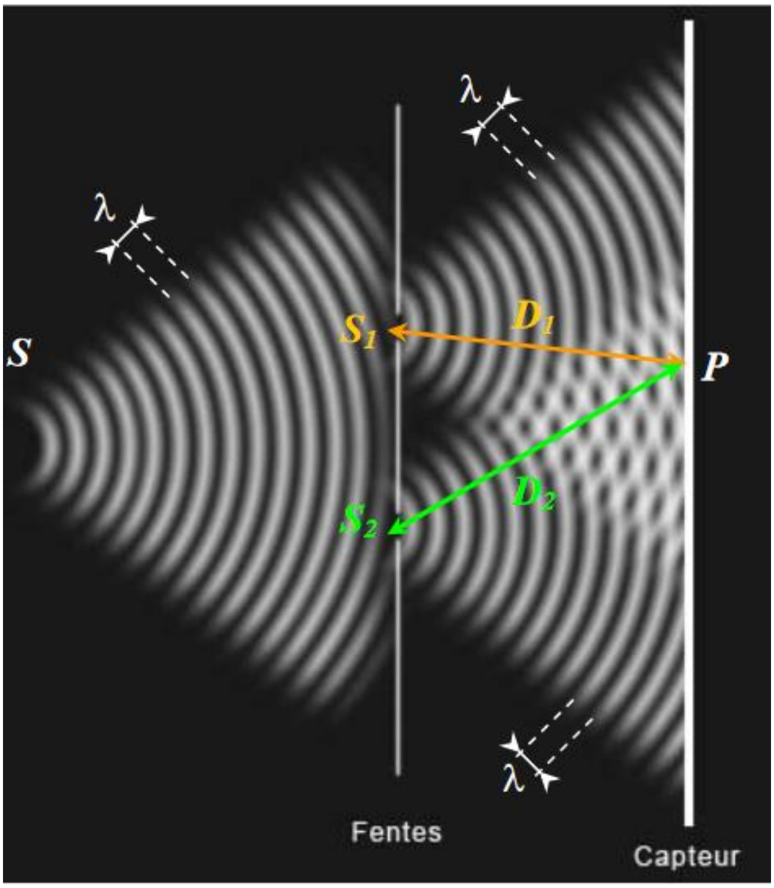
Figure d'interférences obtenue

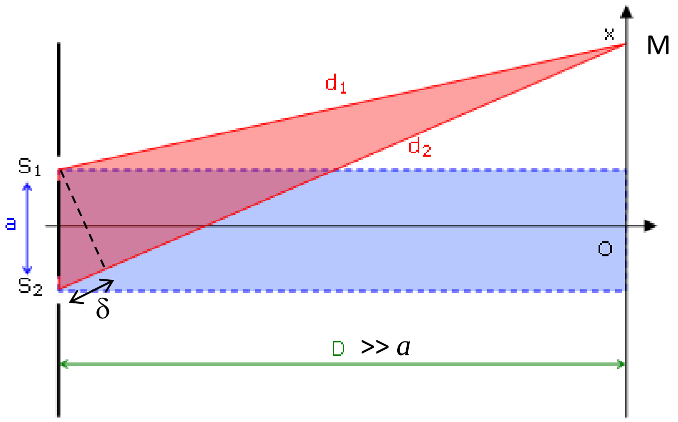
→ Les deux fentes se comportent comme deux sources S_1 et S_2 cohérentes, en phase, si la fente source est sur l'axe de symétrie du dispositif les faisceaux, diffractés par les deux trous, interfèrent dans leur partie commune.

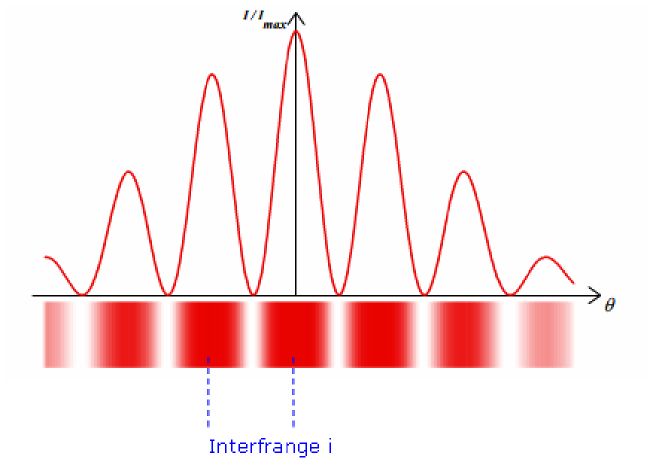
La présence de bandes verticales est due au phénomène d'interférences alors que les anneaux concentriques proviennent de la diffraction des odes par les trous.

i. Franges d'interférences

Définition :
On appelle **interfrange** i la distance séparant les milieux de deux franges brillantes (ou deux franges sombres) consécutives. Elle se note ***i*** et s'exprime en m (symbole : ***m***).







Démonstration : hors programme seul le résultat est à savoir utiliser
D'après la figure précédente, on peut écrire :

$$d_1^2 = [S_1M]^2 = D^2 + \left(x - \frac{a}{2}\right)^2 \qquad d_2^2 = [S_2M]^2 = D^2 + \left(x + \frac{a}{2}\right)^2$$

$$\Leftrightarrow d_2^2 - d_1^2 = \left(x + \frac{a}{2}\right)^2 - \left(x - \frac{a}{2}\right)^2 = 2 \times x \times a$$

$(a + b)(a - b) = a^2 - b^2$

Or $d_2^2 - d_1^2 = (d_2 - d_1) \times (d_2 + d_1) = 2D\delta$ car $d_2 + d_1 \approx 2D$

$$\Rightarrow 2D\delta = 2xa \Leftrightarrow \delta = \frac{xa}{D}$$

→ Le point M se trouve au milieu d'une frange brillante (interférences constructives)

ssi $\delta = k\lambda = \dfrac{xa}{D} \Leftrightarrow \boxed{x = \dfrac{k\lambda D}{a}}$

La distance entre deux franges brillante (interfrange) sera donc :

$$i = (k+1)\frac{\lambda D}{a} - k\frac{\lambda D}{a} \Leftrightarrow \boxed{i = \frac{\lambda D}{a}}$$

A RETENIR :

La distance qui sépare les milieux de deux franges d'interférences consécutives de même nature (brillantes ou sombres) est appelée **interfrange** i et s'exprime par :

$$\boxed{i = \frac{\lambda \times D}{a}} \qquad \begin{cases} D = \text{distance entre les fentes et l'écran (en m)} \\ a = \text{distance entre les fentes (en m)} \\ \lambda = \text{longueur d'onde des sources lumineuses monochromatiques (en m)} \end{cases}$$

Remarques :

- Dans un milieu d'indice $n \neq 1$, l'expression devient :

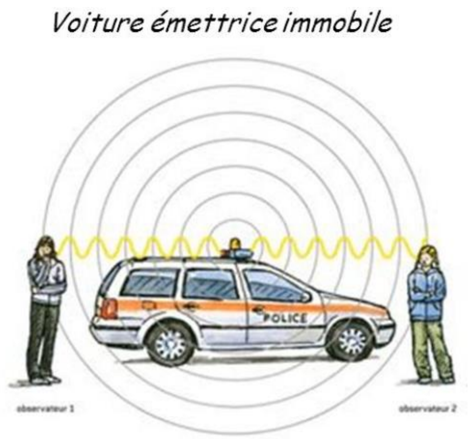
$$i = \frac{\lambda \times D}{n.a}$$

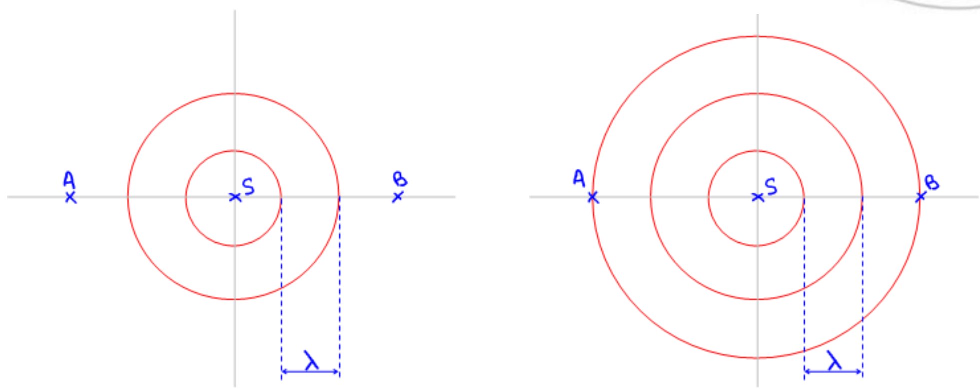
- En lumière blanche, la figure d'interférences à l'allure suivante :

IV) L'effet Doppler

1) Source immobile

Soit une source sonore S située à égale distance de deux observateurs A et B. La source émet une onde sonore de fréquence *f* (et de période T) qui se propage dans l'air avec la célérité c.



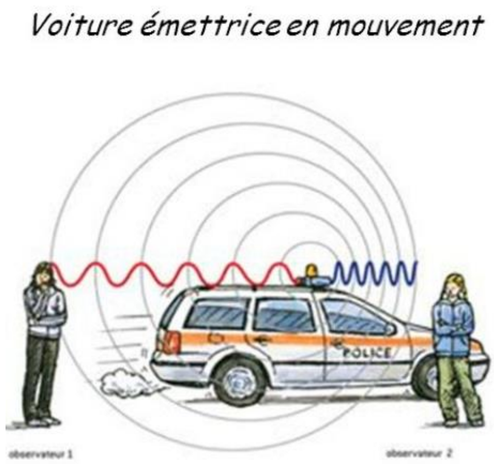


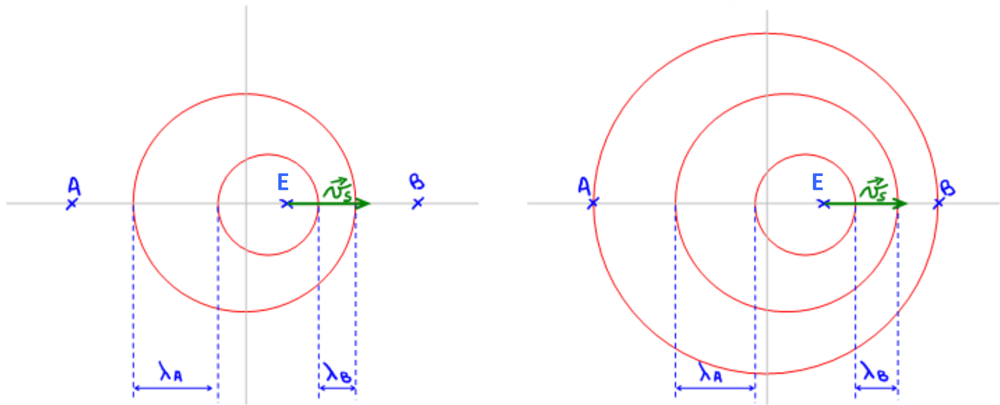
À l'instant t = 2T À l'instant t = 3T

Les deux observateurs reçoivent l'onde au même instant : ils perçoivent tous les deux une onde sonore de fréquence *f* et de longueur d'onde λ.

2) Source en mouvement

La source se déplace maintenant avec une vitesse v_S en direction de l'observateur B. Elle s'éloigne donc de l'observateur A.





À l'instant t = 2T À l'instant t = 3T

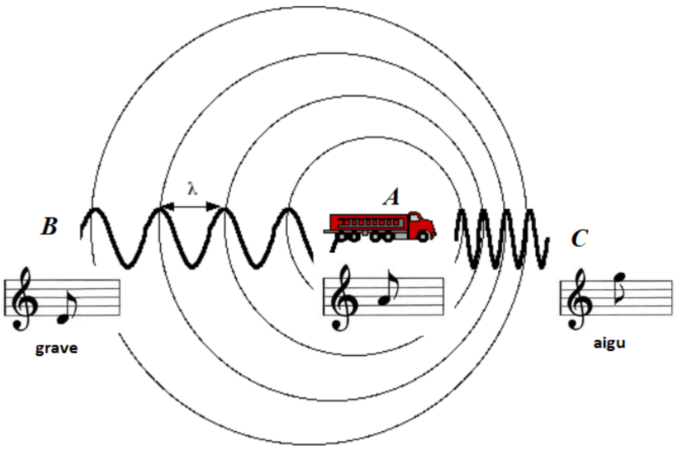
→ L'observateur A reçoit une onde de longueur d'onde λ_A et de période plus grande que celle de l'onde émise par l'émetteur ($\lambda_A > \lambda_S$).

→ L'observateur B reçoit une onde de longueur d'onde λ_B et de période plus petite que celle de l'onde émise par l'émetteur ($\lambda_B < \lambda_S$).

L'**effet Doppler** se traduit par un décalage de fréquences $\Delta f = f_R - f_E$ non nul entre la fréquence f_R de l'onde reçue par un récepteur R et la fréquence f_E de l'onde émise par l'émetteur, lorsqu'ils sont en mouvement l'un par rapport à l'autre.
Plus la vitesse relative est grande, plus le décalage en fréquence est important.

A RETENIR :

- Si l'émetteur E et le récepteur R se rapprochent alors $f_R > f_E$ (un son est perçu plus aigu) ;
- Si l'émetteur E et le récepteur R s'éloignent alors $f_R < f_E$ (un son sera perçu plus grave).



Variation de fréquence et vitesses :

On montre (voir démonstration) que lorsque le récepteur est immobile, la fréquence de l'onde reçue est telle que :

- **Si l'émetteur se rapproche du récepteur**, la fréquence (en Hz) de l'onde reçue par le récepteur est :

$$f_R = \frac{c}{c - v_E} \times f_E \quad \Leftrightarrow \quad v_E = c \times \frac{f_R - f_E}{f_R}$$ (avec c = célérité de l'onde)

- **Si l'émetteur s'éloigne du récepteur**, la fréquence (en Hz) de l'onde reçue par le récepteur est :

$$f_R = \frac{c}{c + v_E} \times f_E \quad \Leftrightarrow \quad v_E = c \times \frac{f_E - f_R}{f_R}$$ (avec c = célérité de l'onde)

⇒ **La variation de fréquence entre l'onde reçue et l'onde émise dépend de la vitesse de l'émetteur par rapport au récepteur**.

Démonstration :

Soit une ambulance (émetteur) qui se déplace à la vitesse v_E (vitesse de l'ambulance) en direction d'un récepteur fixe (pingouin).

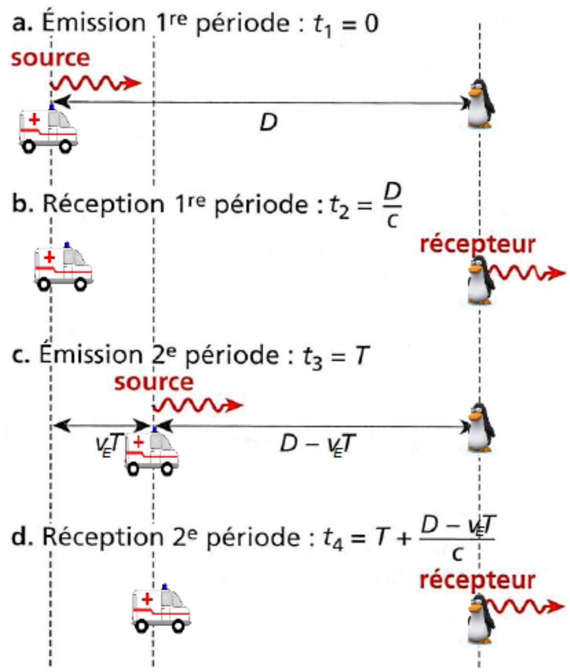
Elle émet des ondes périodiques, de période T_E, se propageant dans le milieu à la célérité c (vitesse du son dans l'air).

⇒ **La première période de l'onde est émise à la date $t_1 = 0$:** L'ambulance est à la distance D du récepteur (figure a).
Cette onde parcourt cette distance à la vitesse c, le récepteur la reçoit à la date : $t_2 = \frac{D}{c}$ (figure b).

⇒ **La deuxième période de l'onde est émise à la date $t_3 = T_E$:** L'ambulance ayant parcouru la distance $v_E.T_E$ depuis la date t = 0, elle se trouve à $D - v_E.T_E$ du récepteur (figure c).

L'onde parcourt cette distance pendant la durée : $\frac{D - v_E.T_E}{c}$

donc le récepteur la reçoit à la date : $t_4 = T_E + \frac{D - v_E T_E}{c}$



⇒ **Pour le récepteur, la période est alors :**

$$T_R = t_4 - t_2 = T_E + \frac{D - v_E.T_E}{c} - \frac{D}{c} = T_E - \frac{v_E.T_E}{c} = T_E\left(1 - \frac{v_E}{c}\right)$$

⇒ **L'onde perçue par le récepteur peut aussi être caractérisée par sa fréquence f_R :**

$$f_R = \frac{1}{T_R} = \frac{1}{T_E} \frac{1}{\left(1 - \frac{v_E}{c}\right)} = f_E \frac{1}{\left(1 - \frac{v_E}{c}\right)} = f_E \frac{c}{c - v_E}$$

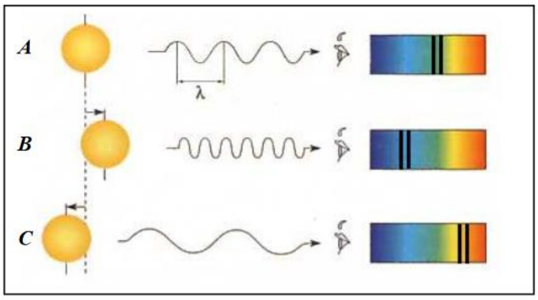
⇒ **Si la source s'éloigne du récepteur fixe, le raisonnement est identique**, il suffit de remplacer dans les expressions précédentes v_E par $- v_E$ puisqu'il y a éloignement.

3) Applications

- **Astrophysique :** la mesure du décalage des raies d'absorption d'un élément chimique sur le spectre d'une étoile permet de déterminer si celle-ci s'éloigne ou se rapproche de la Terre, ainsi que sa vitesse de déplacement ;

En appliquant les travaux de Christian DOPPLER à la lumière, Hippolyte FIZEAU a postulé que :

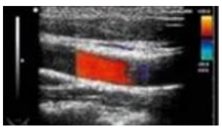
- si une **étoile s'approche** d'un observateur, les raies d'absorption de son spectre doivent apparaître décalées vers les **hautes fréquences** (blueshift).
- Inversement si **l'étoile s'éloigne** de l'observateur, les raies d'absorption de son spectre doivent apparaître décalées vers les **basses fréquences** (redshift).
- **Plus la vitesse de l'étoile est grande par rapport à la Terre, plus le décalage observé est important.**



Effet Doppler – Fizeau

A : Etoile immobile par rapport à l'observateur
B : Etoile qui s'approche de l'observateur
C : Etoile qui s'éloigne de l'observateur

- **Médecine** : l'examen Doppler par échographie permet, par exemple, de mesurer la vitesse d'écoulement du sang. On détecte ainsi les anomalies d'écoulement.



- **Sécurité routière** : les radars (***cinémomètres***) autoroutiers utilisent l'effet Doppler avec des ondes électromagnétique pour mesurer la vitesse des véhicules (radar).