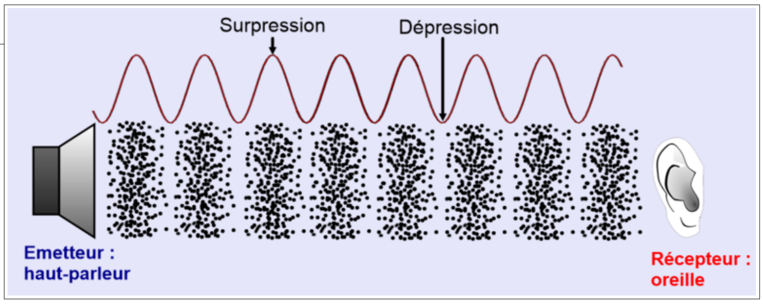
17 Sons et effet Doppler

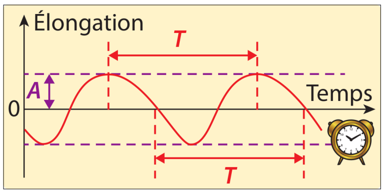
TÉ

1. Onde sonore

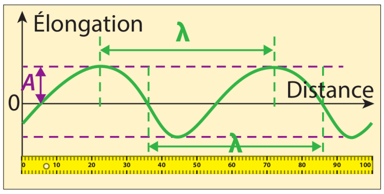


• Une onde mécanique progressive, telle une onde sonore, est la propagation d'une perturbation sans transport de matière.

↳ Dans le cas d'un son la perturbation est une alternance de compression et de dilation du milieu matériel de propagation.



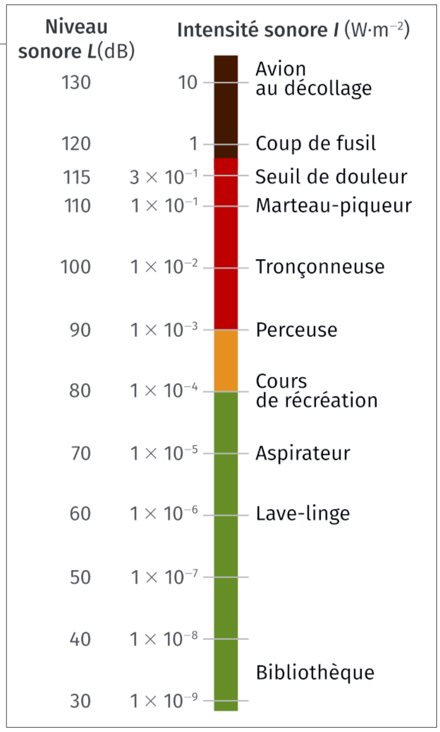
↳ Si l'onde est périodique, **en un point M du milieu de propagation**, la perturbation se reproduit à l'identique « f » fois par seconde. f est la fréquence en Hertz (Hz) et $f=\frac{1}{T}$, T étant la période en seconde (s) durée entre deux répétitions.



↳ Dans le cas d'une onde périodique, **à un instant t**, des points du milieu matériel se trouvent dans le même état vibratoire.
La longueur d'onde λ est la plus petite distance, mesurée suivant la direction de propagation, qui sépare deux de ces points.

↳ Si « c » est la célérité de propagation de l'onde : $\lambda = c \times T$.

2. Intensité sonore reçue et Niveau d'intensité sonore



• De la même manière qu'un rayonnement électromagnétique transmet une puissance lumineuse, une onde sonore transfère une puissance acoustique, entre un émetteur et un récepteur.

Lorsque une onde sonore traverse une surface S du milieu de propagation, l'intensité sonore I est définie comme la puissance reçue par unité de surface : $I=\frac{P}{S}$

avec P en Watt (W) et S en m^2, l'intensité sonore s'exprime en $W \cdot m^{-2}$.

• L'oreille humaine est sensible à des intensités sonores comprises entre 10^{-12} et 10^{+2} $W \cdot m^{-2}$, ce qui rend cette grandeur peu pratique à utiliser. Entre outre, lorsque l'intensité sonore double, un auditeur n'a pas la sensation que le son est deux fois plus « fort »

↳ C'est pourquoi on définit une autre grandeur : le niveau d'intensité sonore.

Le niveau d'intensité sonore vaut : $L=10 \times \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$.

I_0 est une intensité acoustique de référence qui vaut $I_0 = 10^{-12}\ W \cdot m^{-2}$ correspondant au seuil d'audibilité pour une fréquence voisine de 1 kHz.

Le niveau d'intensité sonore s'exprime en décibels (dB)

↳ Le niveau d'intensité sonore se mesure avec un sonomètre.

• Si l'on place côte à côte deux sources sonores de même intensité sonore I, l'intensité sonore totale émise est la somme des intensités sonores de chaque source : I' = 2 × I. En revanche, le niveau d'intensité sonore vaut :

$$L' = 10 \times \log\left(\frac{2I}{I_0}\right)$$

$$L' = 10 \times \log\left(\frac{I}{I_0}\right) + 10 \times \log(2)$$

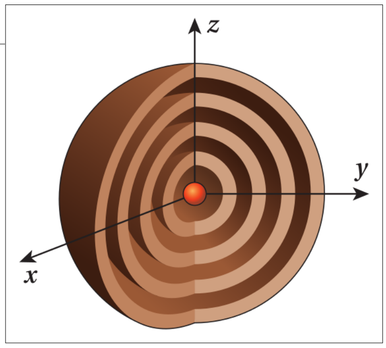
$$L' = L + 3$$

Lorsque l'intensité sonore double, le niveau d'intensité sonore augmente de 3 dB.

Les intensités sonores s'ajoutent ; les niveaux d'intensité sonore ne s'additionnent pas.

• La fonction log(x) avec x > 0, est la fonction inverse de 10^x. Ainsi : $L = 10 \times \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \Leftrightarrow I = I_0 \times 10^{\left(\frac{L}{10}\right)}$

3.1. Atténuation géométrique

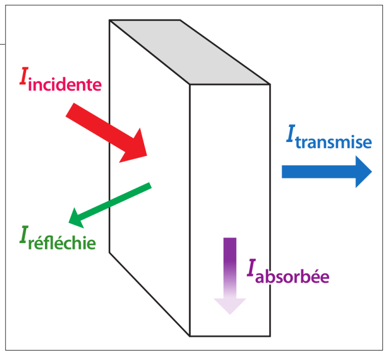


• Lorsque une onde sonore est émise dans toutes les directions de l'espace, la puissance émise se répartit sur des surfaces de plus en plus grandes au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la source.

↳ En conséquence, l'intensité sonore $I = \frac{P}{S}$ diminue : c'est l'atténuation géométrique.

↳ L'atténuation A en dB vaut alors : $A = L_{proche} - L_{éloigné}$.

3.2. Atténuation par absorption



• Lorsqu'une onde sonore rencontre une paroi, l'intensité incidente n'est que partiellement transmise. $I_{incidente} = I_{réfléchie} + I_{absorbée} + I_{transmise}$.

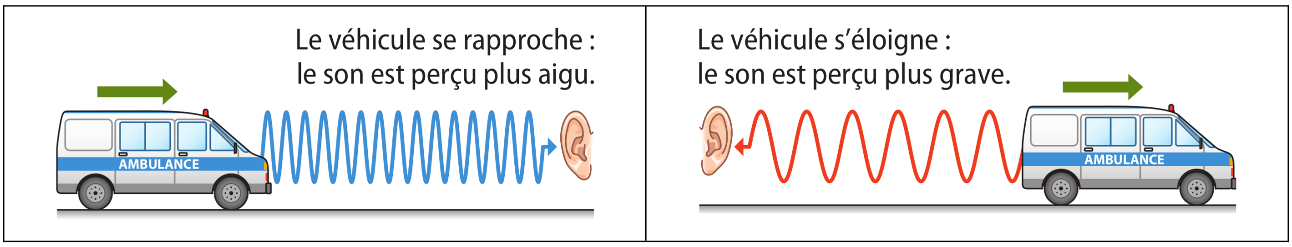
↳ En conséquence, l'intensité sonore transmise est inférieure à l'intensité incidente, $I_{incidente} < I_{transmise}$: c'est l'atténuation par absorption.

↳ L'atténuation A en dB vaut alors : $A = L_{incidente} - L_{transmise}$.

4.1. Effet Doppler

• Si on écoute la sirène d'une ambulance qui se déplace dans une rue où l'on est immobile, on perçoit un son plus aigu quand l'ambulance s'approche et plus grave quand elle s'éloigne.
Ce phénomène est observable pour toute onde mécanique ou électromagnétique.

Une onde émise avec une fréquence f est perçue avec une fréquence f_R différente si l'émetteur et le récepteur sont en mouvement relatif.
↳ S'ils s'approchent l'un de l'autre, la fréquence perçue est supérieure à la fréquence émise : $f_R > f$
↳ S'ils s'éloignent l'un de l'autre, la fréquence perçue est inférieure à la fréquence émise : $f_R < f$



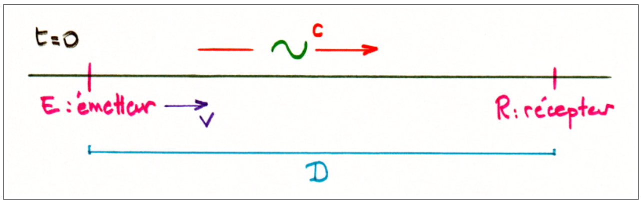
4.2. Expression du décalage Doppler : L'émetteur se rapproche du récepteur

• Un émetteur sonore E se rapproche d'un récepteur sonore R.

↳ L'émetteur émet un son de fréquence $f_{Émise}$: il émet une nouvelle vibration tous les $T_{Émise}=\frac{1}{f_{Émise}}$.

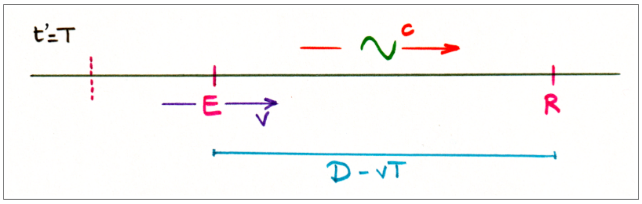
↳ La célérité de propagation de l'onde sonore est notée c.
↳ L'émetteur se déplace à la vitesse v en direction du récepteur. À t = 0, ils sont séparés d'une distance D.

• À t = 0, l'émetteur émet une vibration.



↳ Cette vibration atteint le récepteur à la date de son émission, à laquelle s'ajoute la durée de parcours de l'onde entre E et R : $t_{Réception}=0+\frac{D}{c}$.

• À t' = T, l'émetteur émet une nouvelle vibration.



↳ Du fait de son déplacement, l'émetteur s'est rapproché du récepteur d'une distance v × T.

↳ La nouvelle vibration atteint le récepteur à la date de son émission, à laquelle s'ajoute la durée de parcours de l'onde entre la position rapprochée de E et R : $t'_{Réception}=T_{Émise}+\frac{D-v\times T_{Émise}}{c}$.

↳ La période perçue par le récepteur est l'intervalle de temps qui s'écoule entre la réception de deux vibrations consécutives :
$T_{Reçue} = t'_{Réception} - t_{Réception}$
$T_{Reçue}=T_{Émise}+\frac{D-v\times T_{Émise}}{c}-\frac{D}{c}$ et finalement $T_{Reçue}=T_{Émise}\times(1-\frac{v}{c})$. La période perçue est plus faible que la période émise.

↳ Passage aux fréquences :
Avec $T_{Émise}=\frac{1}{f_{Émise}}$ et $T_{Reçue}=\frac{1}{f_{Reçue}}$, il vient : $\frac{1}{f_{Reçue}}=\frac{1}{f_{Émise}}\times(1-\frac{v}{c})$, soit après réarrangement : $f_{Reçue}=\frac{f_{Émise}}{1-\frac{v}{c}}$.

• Le décalage Doppler est la différence entre la fréquence perçue et la fréquence émise, il est noté Δf ou δf et vaut : $\Delta f = f_{Reçue} - f_{Émise}$. Voir le TP17-02 pour la détermination de la vitesse à l'aide du décalage Doppler.

4.3. Expression du décalage Doppler : L'émetteur s'éloigne du récepteur

• À titre d'exercice, et à l'aide d'un raisonnement similaire, le lecteur pourra montrer les résultats suivants dans le cas de l'éloignement : $T_{Reçue}=T_{Émise}\times(1+\frac{v}{c})$ et $f_{Reçue}=\frac{f_{Émise}}{1+\frac{v}{c}}$.

4.3. Applications de l'effet Doppler

• La comparaison de fréquences émises et reçues permet de déterminer les vitesses relatives de déplacement entre un émetteur et le récepteur d'une onde.

↳ Cinémomètre : les radars routiers émettent une onde électromagnétique qui est réfléchie par l'avant du véhicule. La mesure de la fréquence de l'onde réfléchie permet de calculer la vitesse du véhicule.

↳ Flux sanguins : La mesure du décalage Doppler d'ondes ultrasonores donne accès à la vitesse du sang.

↳ Effet Doppler-Fizeau : Les raies visibles dans le spectre de la lumière venant d'une galaxie sont souvent décalées par rapport à celles mesurées pour une source immobile sur Terre. L'éloignement de la galaxie donne une fréquence perçue $f_{Reçue}$ inférieure à $f_{Émise}$. La mesure du décalage Doppler permet de connaître la vitesse d'éloignement de la galaxie. On a ainsi établi que notre univers est en expansion.