L'intensité sonore et l'effet Doppler

Cours

Sommaire

RÉSUMÉ

L'intensité d'une onde sonore correspond à l'énergie transportée par cette onde. En pratique, on utilise plutôt le niveau d'intensité sonore dont l'échelle de valeurs, en décibels, est plus simple. L'intensité et le niveau d'intensité sonores s'atténuent au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la source, mais aussi lorsque le son rencontre un obstacle. L'effet Doppler est la modification de la fréquence, de la période et de la longueur d'onde d'une onde. La modification de la fréquence se produit lorsque la source émettrice et le récepteur sont en mouvement relatif. L'effet Doppler permet de déterminer la vitesse relative d'un émetteur ou d'un récepteur.

I L'intensité sonore

L'intensité sonore I d'une onde sonore s'exprime comme un niveau d'intensité sonore L. L'intensité d'un son s'atténue au fur et à mesure que l'onde sonore s'éloigne de la source ou lorsque le son rencontre un obstacle.

A La relation entre l'intensité sonore et le niveau d'intensité sonore

L'intensité sonore I d'une onde sonore correspond à l'énergie transportée par cette onde, par unité de surface et par unité de temps. En pratique, on utilise plutôt le niveau d'intensité sonore L, qui s'exprime en décibels et dont l'échelle est plus simple.

DÉFINITION

L'intensité sonore, notée I, d'une onde sonore correspond à l'énergie transportée par cette onde par unité de surface et par unité de temps. Elle s'exprime en watts par mètre carré (W.m^{-2}). Il s'agit donc d'une puissance par mètre carré.

Intensité sonore

EXEMPLE

Si une surface de 1 m^2 reçoit une puissance sonore de 1 mW, l'intensité sonore correspondante est de 1 mW.m^{-2}, soit 10^{-3} W.m^{-2}.

L'oreille humaine étant sensible à une gamme d'intensité sonore très grande, on utilise la notion de niveau sonore pour comparer l'intensité de deux sons.

REMARQUE

FORMULE

Relation donnant le niveau sonore à partir de l'intensité sonore

Le niveau sonore L, qui s'exprime en décibels (dB) est lié à l'intensité sonore I par la relation suivante :

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

Avec :

- L le niveau sonore (en dB) ;
- I l'intensité acoustique de l'onde sonore (en W.m^{-2}) ;
- I_0 le seuil d'audibilité fixé à $10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$.

EXEMPLE

Le niveau sonore d'un son d'intensité sonore 10^{-7} W.m^{-2} est :

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

$$L = 10 \times \log\left(\frac{10^{-7}}{10^{-12}}\right)$$

$$L = 50 \text{ dB}$$

On peut aussi exprimer l'intensité sonore d'un son à partir de son niveau d'intensité sonore, la fonction réciproque au logarithme étant la puissance de 10 :

$$a = \log(b) \ \Leftrightarrow \ 10^a = b$$

ASTUCE

Par définition, le logarithme décimal d'un nombre a est le quotient du logarithme népérien de a par le logarithme népérien de 10 :

$$\log(a) = \frac{\ln(a)}{\ln(10)}$$

REMARQUE

FORMULE

Relation donnant l'intensité sonore à partir du niveau sonore

L'intensité sonore I d'un son peut être déterminée à partir de son niveau d'intensité sonore L à l'aide de la relation suivante :

$$I = I_0 \times 10^{\frac{L}{10}}$$

Avec :

- L le niveau sonore (en dB) ;
- I l'intensité acoustique de l'onde sonore (en W.m^{-2}) ;
- I_0 le seuil d'audibilité fixé à $10^{-12}\ \text{W.m}^{-2}$.

EXEMPLE

L'intensité sonore d'un de niveau sonore $60\ \text{dB}$ est :

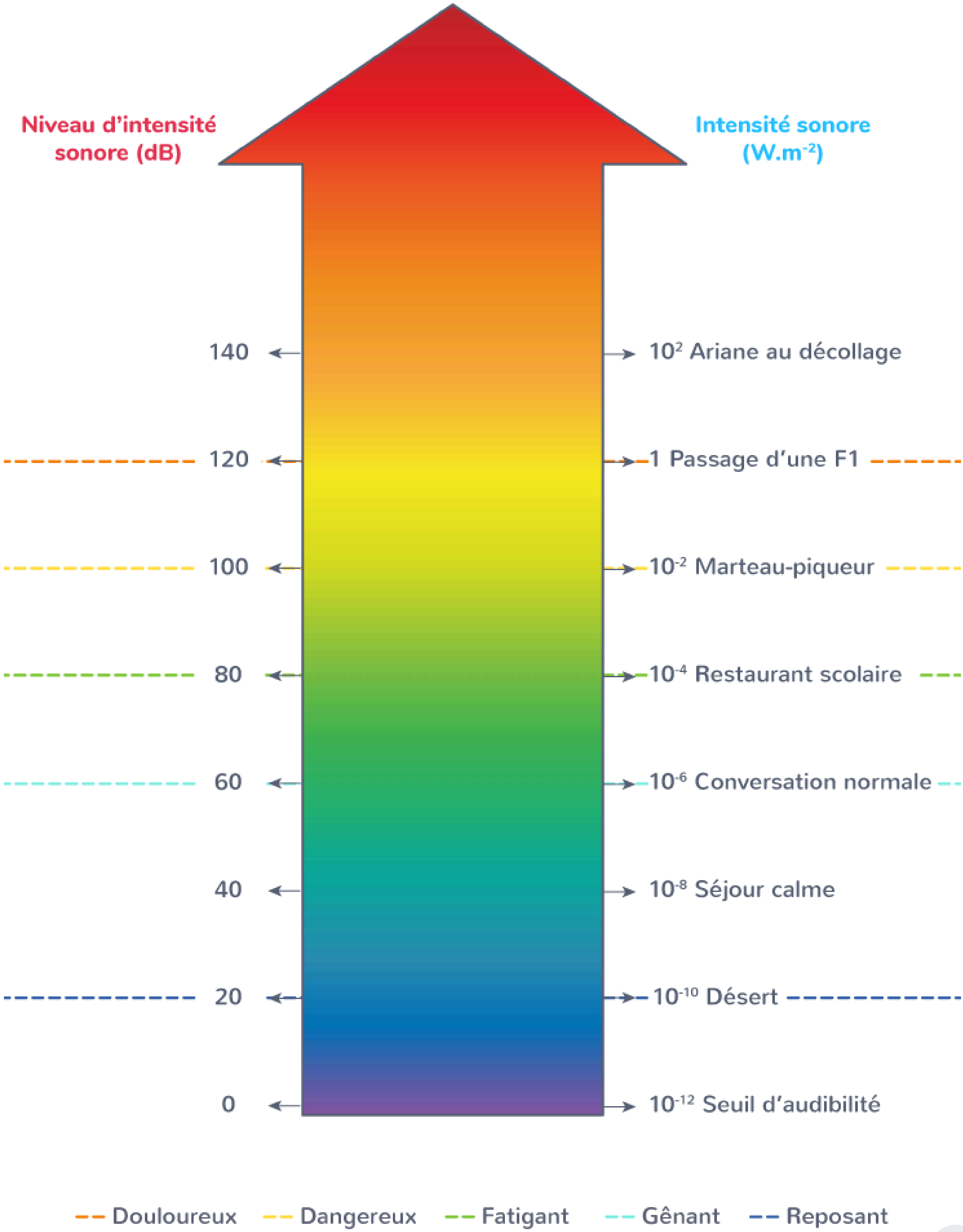
$I = I_0 \times 10^{\frac{L}{10}}$

$I = 10^{-12} \times 10^{\frac{60}{10}}$

$I = 10^{-6}\ \text{W.m}^{-2}$

PROPRIÉTÉ

L'exposition à des ondes sonores peut comporter des risques pour notre santé : elle peut provoquer une perte d'audition temporaire ou durable. Ces risques augmentent avec l'intensité sonore et la durée d'exposition.



Dangerosité des sons

EXEMPLE

L'utilisation prolongée d'écouteurs est risquée. Les normes européennes limitent leur niveau sonore à 100 dB et obligent une validation par l'utilisateur dès lors qu'il dépasse 85 dB.

B L'atténuation d'un son

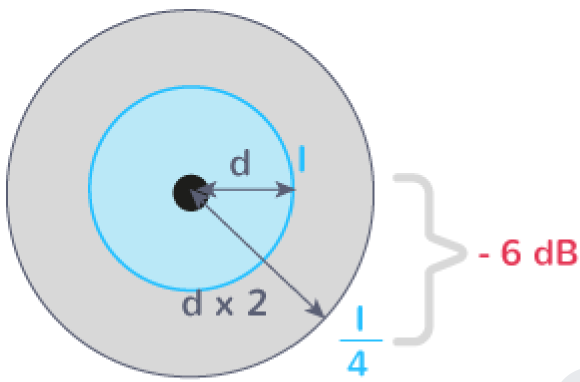
L'intensité et le niveau d'intensité sonores s'atténuent de manière géométrique. Cette atténuation se produit au fur et à mesure que le son s'éloigne de la source. L'intensité sonore s'atténue aussi lorsque le son rencontre un obstacle qui absorbe une partie de son énergie.

1. L'atténuation géométrique d'un son

L'intensité et le niveau d'intensité sonores sont atténués lorsque la distance entre la source sonore et le récepteur augmente. Lorsque la distance entre une source sonore ponctuelle et un récepteur est multipliée par deux, le niveau d'intensité sonore est diminué de 6 dB.

PROPRIÉTÉ

Lorsque la distance qui sépare un récepteur sonore d'une source sonore ponctuelle est multipliée par deux, l'intensité sonore reçue est divisée par 4 et le niveau sonore reçu est diminué de 6 dB.



Impact d'un changement de distance à la source sur l'intensité et le niveau d'intensité sonore

EXEMPLE

Beaucoup d'enceintes nomades se vantent d'émettre un son « à 360° », permettant une écoute dans une large zone autour d'elles. Ces enceintes peuvent être alors considérées comme des sources sonores ponctuelles. Si, à une distance d'un mètre d'une de ces enceintes, une personne reçoit un son de niveau sonore $L_1 = 88 \text{ dB}$, en reculant pour être maintenant éloignée d'une distance double, soit 2 mètres, le niveau sonore qu'elle recevra sera :

$L_2 = L_1 - 6$

$L_2 = 88 - 6$

$L_2 = 82 \text{ dB}$

ASTUCE

Le logarithme décimal d'un produit $a \times b$ est égal à la somme des logarithme décimaux de a et de b :

$$\log(a \times b) = \log(a) + \log(b)$$

EXEMPLE

$\log(4 \times I) = \log(4) + \log(I)$

Le logarithme décimal d'un quotient $\frac{a}{b}$ est égal à la différence des logarithme décimaux de a et de b :

$$\log\left(\frac{a}{b}\right) = \log(a) - \log(b)$$

EXEMPLE

$\log(\frac{I}{4}) = \log(I) - \log(4)$

Le logarithme décimal d'une puissance a^n est égal à la multiplication de la puissance avec le logarithme décimal de a :

$$\log(a^n) = n \times \log(a)$$

EXEMPLE

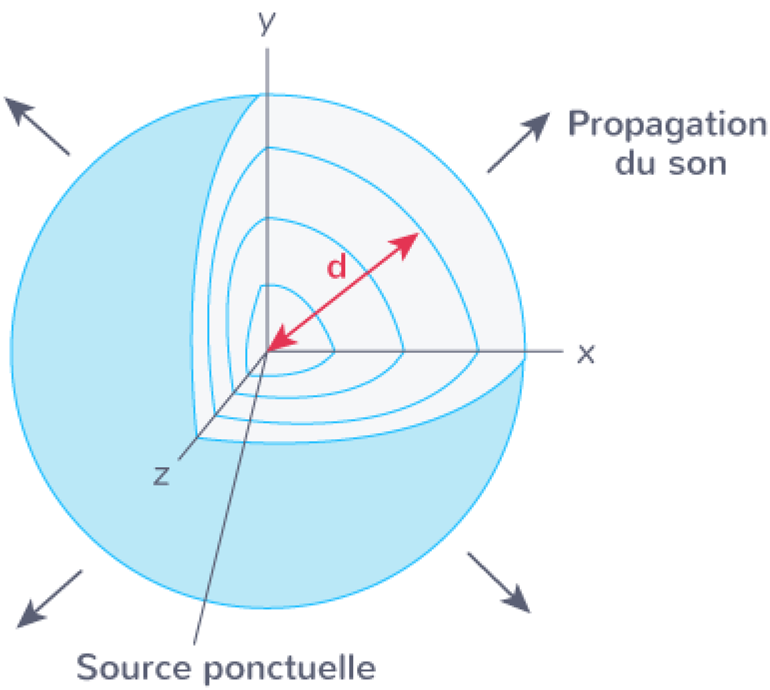
$\log\left(2^2\right) = 2 \times \log(2)$

DÉMONSTRATION

À une distance d d'une source sonore ponctuelle, la puissance sonore que celle-ci émet se répartit sur une sphère de rayon d.

La surface de cette sphère est $S = 4\pi d^2$.

Ainsi, lorsque la distance d qui sépare le récepteur de la source est doublée, la surface de la sphère devient :
$S' = 4\pi(2d)^2 = 4 \times 4\pi d^2 = 4 \times S$



Variation de l'intensité sonore et du niveau d'intensité sonore d'une source ponctuelle

L'intensité sonore étant le rapport de la puissance émise par la surface, lorsque la surface de la sphère est multipliée par 4, l'intensité sonore est divisée par 4, soit :

$$I' = \frac{P_{\text{émise}}}{S'} = \frac{P_{\text{émise}}}{4 \times S} = \frac{I}{4}$$

Donc le niveau sonore correspondant est :

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

$$L' = 10 \times \log\left(\frac{I}{4 \times I_0}\right)$$

$$L' = 10 \times \left(\log\left(\frac{I}{I_0}\right) - \log(4)\right)$$

$$L' = 10 \times \log\left(\frac{I}{I_0}\right) - 10 \times \log(4)$$

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

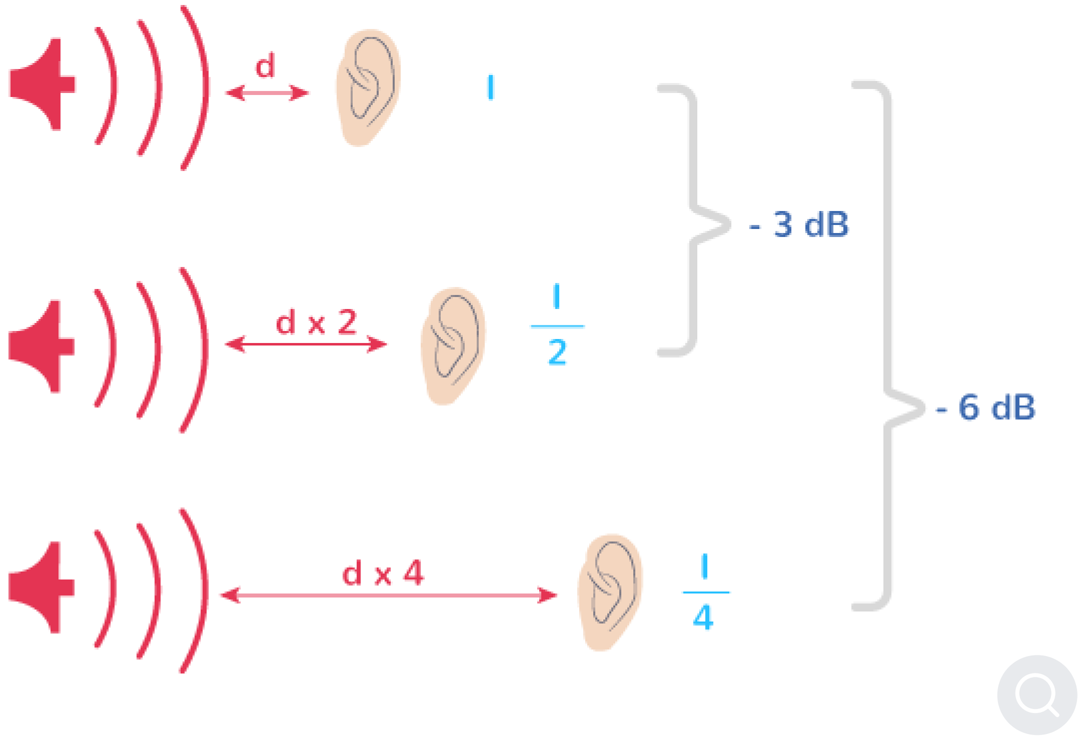
$$L' = 10 \times \log\left(\frac{I}{I_0}\right) - 10 \times 2 \times \log(2)$$

Or $\log(2) \approx 0{,}3$ et on obtient :

$$L' = L - 6 \text{ dB}$$

REMARQUE

Si la source sonore n'est pas ponctuelle mais linéaire et émet le son dans une seule direction, à chaque doublement de distance l'intensité sonore reçue est divisée par 2 et le niveau sonore reçu est diminué de 3 dB .



Variation d'intensité et de niveau d'intensité sonore d'une source linéaire

EXEMPLE

Des haut-parleurs de chaîne hi-fi peuvent être considérés comme des sources sonores linéaires, puisqu'ils émettent le son dans une seule direction. Si, à une distance d'un mètre d'une de ces haut-parleurs, une personne reçoit un son de niveau sonore $L_1 = 88 \text{ dB}$, en reculant pour être maintenant éloignée d'une distance double, soit 2 m, le niveau sonore qu'elle recevra sera :

$L_2 = L_1 - 3$

$L_2 = 88 - 3$

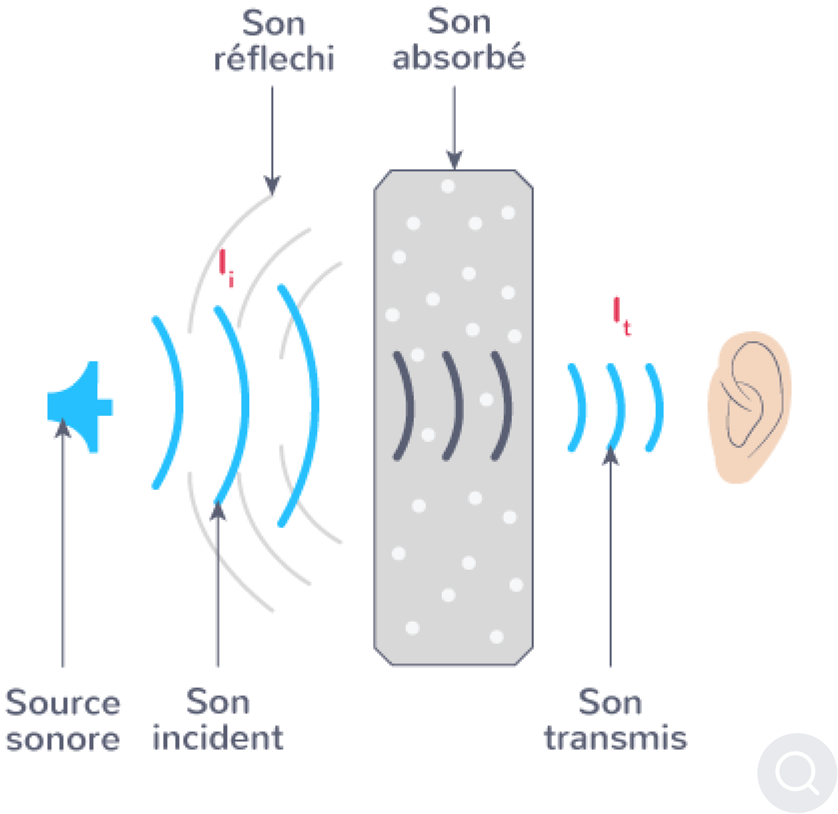
$L_2 = 85 \text{ dB}$

2. L'atténuation par absorption d'un son

L'intensité et le niveau d'intensité sonores sont atténués lorsque le son rencontre un obstacle. L'obstacle absorbe une partie de l'énergie de l'onde sonore. Cette atténuation est d'autant plus grande que le coefficient d'absorption d'un matériau est élevé.

PROPRIÉTÉ

Lorsqu'un son rencontre un obstacle, son intensité sonore est atténuée car une partie de son énergie est absorbée. La proportion d'énergie absorbée dépend du matériau composant l'obstacle et de l'épaisseur de celui-ci.



Atténuation d'un son

Ainsi, l'intensité sonore transmise I_t est toujours plus faible que l'intensité sonore incidente I_i. L'intensité sonore qui n'est pas transmise peut être absorbée par l'obstacle ou réfléchie.

EXEMPLE

À épaisseur égale, un obstacle en moquette absorbe deux fois plus d'énergie sonore qu'un obstacle en bois massif.

FORMULE

Coefficient d'atténuation

Le coefficient d'atténuation α, exprimé en décibels (dB), permet de quantifier la proportion d'intensité sonore absorbée par un obstacle à partir des intensités sonores incidente I_i et transmise I_t :

$$\alpha = 10 \times \log \left(\frac{I_{i\ (\text{W.m}^{-2})}}{I_{t\ (\text{W.m}^{-2})}} \right)$$

EXEMPLE

Lorsqu'un son d'intensité sonore $10^{-6}\ \text{W.m}^{-2}$ arrive sur une porte, l'intensité sonore transmise est $10^{-8}\ \text{W.m}^{-2}$. Le coefficient d'atténuation est :

$\alpha = 10 \times \log \left(\dfrac{I_i}{I_t} \right)$

$\alpha = 10 \times \log \left(\dfrac{10^{-6}}{10^{-8}} \right)$

$\alpha = 20\ \text{dB}$

La porte a un coefficient d'atténuation de $20\ \text{dB}$.

FORMULE

Intensité sonore transmise

La relation donnant **l'intensité sonore transmise** I_t en fonction du coefficient d'atténuation α et de l'intensité sonore incidente I_i est :

$$I_{t\ (\text{W.m}^{-2})} = I_{i\ (\text{W.m}^{-2})} \times 10^{\frac{-\alpha}{10}}$$

EXEMPLE

Un son incident d'intensité sonore $1{,}5 \times 10^{-4}\ \text{W.m}^{-2}$ est atténué de $22\ \text{dB}$. L'intensité sonore transmise est alors :

$I_{t\ (\text{W.m}^{-2})} = I_{i\ (\text{W.m}^{-2})} \times 10^{\frac{-\alpha}{10}}$

$I_t = 1{,}5 \times 10^{-4} \times 10^{\frac{-22}{10}}$

$I_t = 9{,}5 \times 10^{-7}\ \text{W.m}^{-2}$

REMARQUE

Les propriétés du logarithme décimal permettent de relier simplement les niveaux sonores des sons incidents et transmis.

FORMULE

Relation entre niveaux d'intensités sonores incidents et transmis

Le niveau sonore d'un son transmis L_t après une atténuation caractérisée par le coefficient α est lié au niveau sonore incident L_i par la relation suivante :

$$L_{t\ (\text{dB})} = L_{i\ (\text{dB})} - \alpha_{\ (\text{dB})}$$

EXEMPLE

Un son incident de niveau sonore $90\ \text{dB}$ est atténué de $15\ \text{dB}$. Le niveau sonore du son transmis est alors :

$L_{t\ (\text{dB})} = L_{i\ (\text{dB})} - \alpha_{\ (\text{dB})}$

$L_t = 90 - 15$

$L_t = 75\ \text{dB}$

II L'effet Doppler

L'effet Doppler est la modification de la fréquence, de la période et de la longueur d'une onde. Cette modification se produit lorsque la source émettrice et le récepteur sont en mouvement relatif. L'effet Doppler permet d'obtenir l'expression du décalage Doppler. Le décalage Doppler permet de mesurer la vitesse relative entre l'émetteur et le récepteur.

A La manifestation de l'effet Doppler

Lorsqu'une source émettrice d'une onde et un récepteur sont en mouvement relatif la fréquence, la période et la longueur d'onde de l'onde reçue par le récepteur ne sont pas égales à ceux de l'onde émise.

DÉFINITION

Effet Doppler

L'effet Doppler est le phénomène physique caractérisé par un changement apparent de la fréquence d'un signal dû à l'existence d'une vitesse relative entre l'émetteur du signal et le récepteur.

EXEMPLE

Une illustration de l'effet Doppler est donnée par le passage d'une voiture devant un observateur immobile : le son du moteur paraît plus aigu lorsque le véhicule se rapproche et plus grave lorsqu'il s'éloigne.

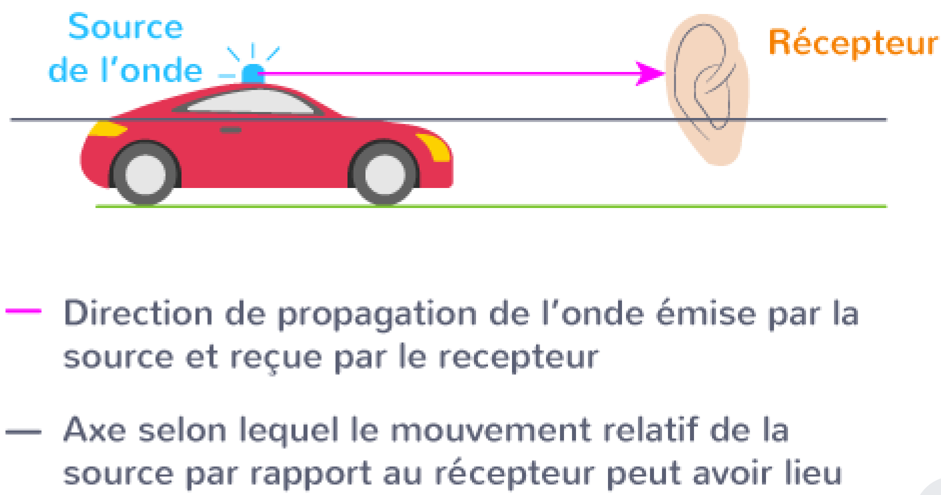
B L'expression du décalage Doppler

Une expression du décalage Doppler est obtenue en étudiant la longueur d'onde de l'onde reçue. Le décalage Doppler se produit au fur et à mesure que la distance entre l'émetteur et le récepteur varie.

REMARQUE

Dans la suite du cours, les formules ne s'appliquent qu'au cas le plus courant pour lequel les mouvements de la source d'onde et du récepteur ont lieu sur une droite parallèle à la direction de propagation de l'onde émise.

EXEMPLE



Cadre du cours : la source et le récepteur se situent sur une droite parallèle à la direction de propagation de l'onde sonore

À RETENIR

L'effet Doppler étant souvent étudié dans le cas des ondes sonores et électromagnétiques, il est important de connaître la célérité (ou vitesse) de ces ondes :

- La célérité du son dans l'air est 340 m.s^{-1} .

- La célérité des ondes électromagnétiques dans le vide et dans l'air est $3{,}00.10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

FORMULE

Fréquence reçue

On considère, une source se rapprochant ou s'éloignant à la vitesse v_E d'un récepteur. Le tableau suivant donne alors les expression de la fréquence reçue, c étant la célérité de l'onde émise et F_E la fréquence de l'onde émise :

Situation	La source sonore se rapproche du récepteur à la vitesse v_E .	La source sonore s'éloigne du récepteur la vitesse v_E .
Expression de la fréquence reçue F_R	$F_R = \dfrac{1}{1-\dfrac{v_E}{c}} \times F_E$	$F_R = \dfrac{1}{1+\dfrac{v_E}{c}} \times F_E$
Conclusion	$v_E < c \Leftrightarrow (1-\dfrac{v_E}{c}) < 1 \Leftrightarrow F_R > F_E$ La fréquence de l'onde reçue est supérieure à celle de l'onde émise.	$v_E < c \Leftrightarrow (1+\dfrac{v_E}{c}) > 1 \Leftrightarrow F_R < F$ La fréquence de l'onde reçue est inférieu à celle de l'onde émise.

EXEMPLE

Une voiture se rapproche à la vitesse de 90 km.h^{-1} (soit $\dfrac{90}{3{,}6} = 25 \text{ m.s}^{-1}$) d'une personne immobile. Si le klaxon de la voiture émet un son de fréquence 120 Hz , la fréquence du son reçu par la personne est :

$$F_R = \dfrac{1}{1-\dfrac{v_E}{c}} \times F_E$$

$$F_R = \dfrac{1}{1-\dfrac{25}{340}} \times 120$$

$$F_R = 130 \text{ Hz}$$

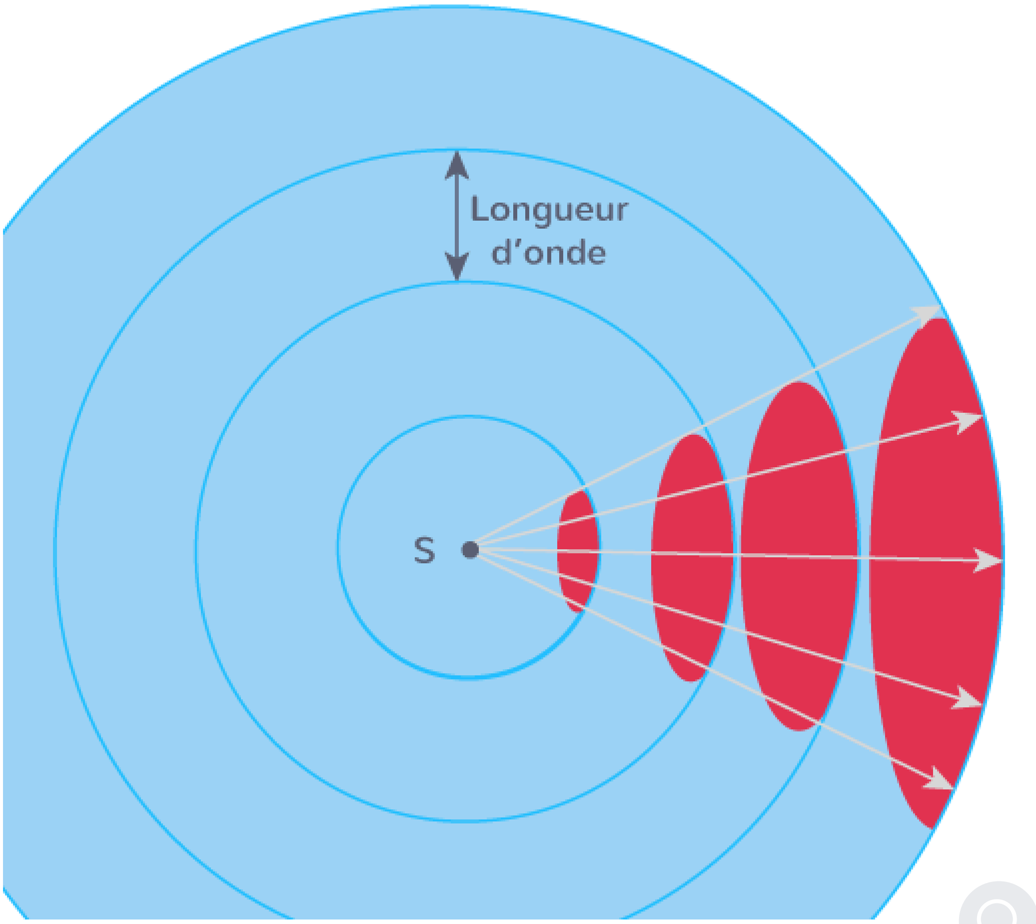
La fréquence reçue est bien supérieure à la fréquence émise par la source.

REMARQUE

On appelle « front d'onde » la surface regroupant les points dans le même état vibratoire à un instant donné.

EXEMPLE

Autour d'une source ponctuelle, tous les points situés à un multiple de la longueur d'onde du son émis sont situé sur une même sphère. Cette sphère est un front d'onde.



Représentation des fronts d'ondes émis par une source ponctuelle

DÉMONSTRATION

Pour cette démonstration, on considère une source sonore, la sirène d'une ambulance par exemple, qui émet un son de fréquence F_E , se déplaçant à la célérité c et un récepteur sonore, une personne par exemple, qui est initialement situé à une distance d de la source.

Cas où l'émetteur est immobile par rapport au récepteur :

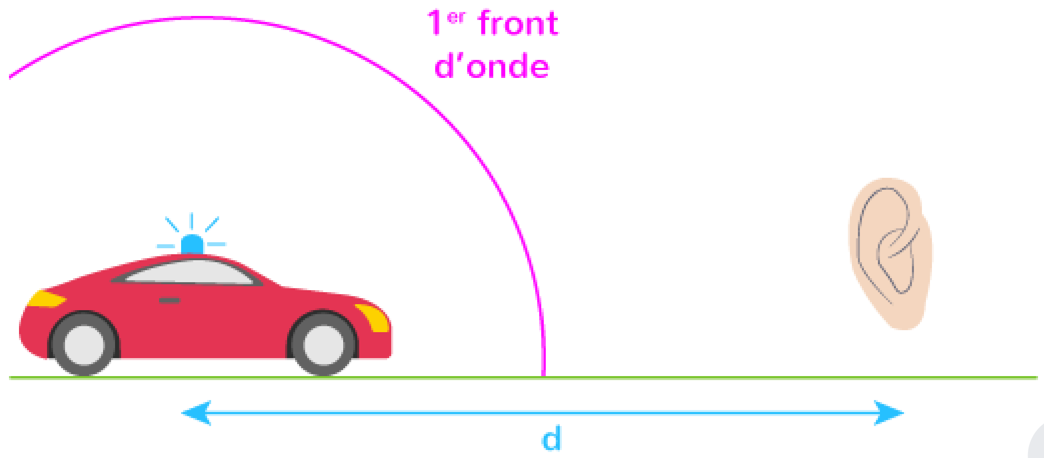
- À l'instant $t = 0 \text{ s}$: la source sonore émet un premier front d'onde.

Ce front d'onde doit se déplacer jusqu'au récepteur pour être reçu. La durée Δt écoulée pour que le front d'onde parcoure la distance d à la célérité c est :

$$\Delta t = \frac{d}{c}$$

Le récepteur reçoit donc ce premier front d'onde à l'instant :

$$t_1 = 0 + \Delta t \Leftrightarrow t_1 = \frac{d}{c}$$



Réception de l'onde sonore quand la source est immobile

- À l'instant $T = T_E$: la source sonore émet le deuxième front d'onde.

Ce front d'onde doit encore se déplacer jusqu'au récepteur. La distance d n'ayant pas varié, la durée Δt écoulée pendant cette propagation est encore :

$$\Delta t = \frac{d}{c}$$

Le récepteur reçoit donc ce deuxième front d'onde après à l'instant :

$$t_2 = T_E + \Delta t \Leftrightarrow t_2 = T_E + \frac{d}{c}$$

- Pour le récepteur, la période du son reçu T_R correspond à la durée séparant la réception des deux fronts d'onde, soit :

  $$T_R = t_2 - t_1 = T_E + \frac{d}{c} - \frac{d}{c}$$

D'où :

$$T_R = T_E$$

Lorsque la source sonore est immobile par rapport au récepteur, celui-ci reçoit donc un son de même période, et donc de même fréquence que le son émis.

Cas où l'émetteur se rapproche du récepteur en se déplaçant à la vitesse v_E :

- Comme précédemment, le récepteur reçoit le premier front d'onde à l'instant :

  $$t_1 = \frac{d}{c}$$

- À l'instant $t = T_E$: la source sonore émet le deuxième front d'onde.

Ce front d'onde doit encore se déplacer jusqu'au récepteur mais la source ayant parcouru la distance $v_E \times T_E$, la distance qui la sépare maintenant du récepteur est :

$$d' = d - v_E \times T_E$$

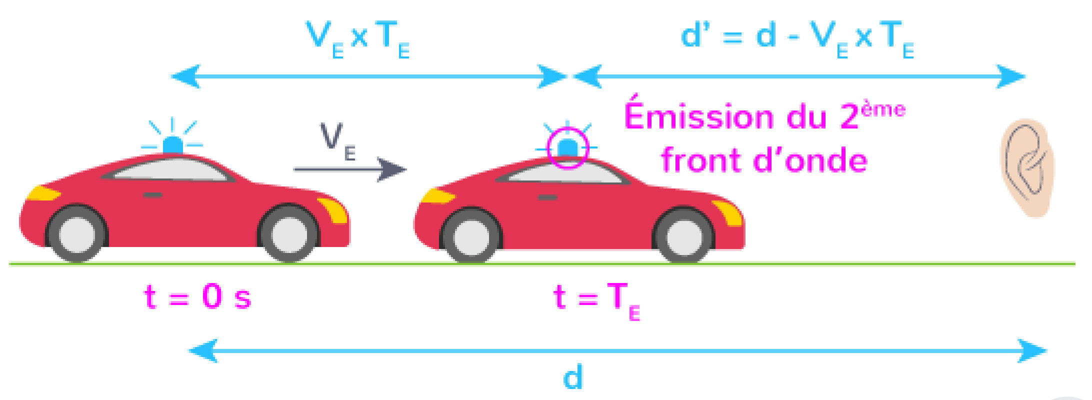
La durée qui s'écoule pendant sa propagation entre la source et le récepteur est donc :

$$\Delta t' = \frac{d'}{c}$$

$$\Delta t' = \frac{d - v_E \times T_E}{c}$$

- Le récepteur reçoit donc ce deuxième front d'onde après à l'instant :

$$t_2 = T_E + \Delta t' \Leftrightarrow t_2 = T_E + \frac{d - v_E \times T_E}{c}$$



Réception de l'onde sonore quand la source est en mouvement

- Pour le récepteur, la période du son reçu T_R correspond à la durée séparant la réception des deux fronts d'onde, soit :

$$T_R = t_2 - t_1 = \left(T_E + \frac{d - v_E \times T_E}{c}\right) - \frac{d}{c}$$

$$T_R = T_E + \frac{-v_E \times T_E}{c}$$

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

Soit, avec les fréquences émise F_E et reçue F_R :

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

D'où :

$$F_R = \frac{1}{T_R} = \frac{1}{1 - \frac{v_E}{c}} \times F_E$$

Et puisque la vitesse de la source v_E est inférieure à celle du son c :

$$v_E < c \Leftrightarrow (1 - \frac{v_E}{c}) < 1 \Leftrightarrow \frac{1}{1 - \frac{v_E}{c}} > 1$$

Ainsi, la fréquence du son reçu par le récepteur T_R est supérieure à celle du son émis F_E : le son reçu est plus aigu que le son émis.

REMARQUE

Dans les situations où le récepteur est aussi en mouvement, il faut utiliser la vitesse relative de la source par rapport à l'émetteur.

EXEMPLE

Le long d'un axe, une source se rapproche d'un récepteur à la vitesse v_s qui lui aussi s'éloigne de la source à la vitesse v_R :

La source et le récepteur sont en mouvement

La vitesse de la source relativement au récepteur est alors :
$v_E = v_S - v_R$

Pour la même situation, il existe d'autres expressions possibles de la fréquence de l'onde reçue.

REMARQUE

EXEMPLE

La relation $F_R = \dfrac{c}{c - v_E} \times F_E$ est similaire à : $F_R = \dfrac{1}{1 - \dfrac{v_E}{c}} \times F_E$.

FORMULE

Expression du décalage Doppler

Quand la vitesse v_E de la source par rapport au récepteur est faible devant la célérité c de l'onde (ce qui est généralement le cas pour les ondes électromagnétiques), le décalage relatif de la fréquence $\dfrac{\Delta F}{F_E} = \dfrac{F_R - F_E}{F_E}$ est lié de manière simple au rapport de la vitesse de la source et de la célérité de l'onde :

$$\frac{\Delta F}{F_E} = \frac{v_E}{c} \text{ si la source se rapproche du récepteur.}$$

$$\frac{\Delta F}{F_E} = -\frac{v_E}{c} \text{ si la source s'éloigne du récepteur.}$$

EXEMPLE

Les fréquences des notes *la*$_3$ et *la#*$_3$ sont respectivement 440 Hz et 466 Hz . La célérité du son dans l'air est 340 m.s^{-1} . Une source sonore émet un *la#*$_3$. Pour qu'un auditeur entende un *la*$_3$ elle

doit s'éloigner de lui à une vitesse vérifiant :
$\frac{\Delta F}{F_E} = -\frac{v_E}{c}$ soit $v_E = -c \times \frac{\Delta F}{F_E}$

D'où :
$$v_E = -340 \times \frac{440 - 466}{466}$$
$$v_E = 19 \text{ m.s}^{-1}$$

Soit :
$$v_E = 68 \text{ km.h}^{-1}$$

DÉMONSTRATION

Montrons que le décalage relatif de fréquence causé par l'effet Doppler est :
$$\frac{\Delta F}{F_E} = \frac{F_R - F_E}{F_E}$$

Dans la situation où la source se rapproche du récepteur à la vitesse v_E, on sait que :
$$F_R = \frac{1}{1 - \frac{v_E}{c}} \times F_E$$

D'où :
$$F_R - F_E = \left(\frac{1}{1 - \frac{v_E}{c}} \times F_E\right) - F_E$$

Ce qui donne, après factorisation par F_E :
$$F_R - F_E = \left(\frac{1}{1 - \frac{v_E}{c}} - 1\right) \times F_E$$

D'où :
$$\frac{F_R - F_E}{F_E} = \frac{1}{1 - \frac{v_E}{c}} - 1$$

Et donc :
$$\frac{\Delta F}{F_E} = \frac{1}{1 - \frac{v_E}{c}} - 1$$

Pour n'avoir qu'une seule fraction, on écrit le nombre « 1 » comme étant égal au rapport $\frac{1 - \frac{v_E}{c}}{1 - \frac{v_E}{c}}$, ce qui permet d'avoir le même dénominateur que la fraction $\frac{1}{1 - \frac{v_E}{c}}$:

$$\frac{\Delta F}{F_E} = \frac{1}{1 - \frac{v_E}{c}} - \frac{1 - \frac{v_E}{c}}{1 - \frac{v_E}{c}}$$

On obtient donc :

$$\frac{\Delta F}{F_E} = \frac{\frac{v_E}{c}}{1 - \frac{v_E}{c}}$$

Dans le cas où la vitesse v_E de la source par rapport au récepteur est faible devant la célérité c de l'onde, le rapport $\frac{v_E}{c}$ tend vers 0 :

$$v_E << c \Leftrightarrow \frac{v_E}{c} \longmapsto 0$$

Il peut donc être négligé devant le nombre « 1 » et le décalage relatif s'écrit alors :

$$\frac{\Delta F}{F_E} = \frac{\frac{v_E}{c}}{1}$$

Soit :

$$\frac{\Delta F}{F_E} = \frac{v_E}{c}$$

PROPRIÉTÉ

Les différentes formules de l'effet Doppler peuvent relier les fréquences F de l'onde émise et de l'onde reçue, mais aussi leur période T et leur longueur d'onde λ .

Étant donné que pour une onde : $T = \frac{1}{F}$ et $\lambda = \frac{c}{F}$, on obtient les relations suivantes :

Situation	**La source sonore se rapproche du récepteur à la vitesse v_E**	**La source sonore s'éloigne du récepteur à la vitesse v_E**	
Expression de la fréquence reçue F_R en fonction de celle de l'onde émise F_E	$F_R = \frac{1}{1 - \frac{v_E}{c}} \times F_E$ si $v_E << c$: $\frac{\Delta F}{F_E} = \frac{v_E}{c}$	$F_R = \frac{1}{1 + \frac{v_E}{c}} \times F_E$ si $v_E << c$: $\frac{\Delta F}{F_E} = -\frac{v_E}{c}$	
Expression de la période de l'onde reçue $\mathbf{T_R}$ en fonction de celle de l'onde émise $\mathbf{T_E}$	$T_R = (1 - \frac{v_E}{c}) \times T_E$ si $v_E << c$: $\frac{\Delta T}{T_E} = -\frac{v_E}{c}$	$T_R = (1 + \frac{v_E}{c}) \times T_E$ si $v_E << c$: $\mathbf{\frac{\Delta T}{T_E} = \frac{v_E}{c}}$	

Expression de la longueur de l'onde reçue λ_R en fonction de celle de l'onde émise λ_E	$\lambda_R = (1 - \frac{v_E}{c}) \times \lambda_E$ si $v_E << c$: $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_E} = -\frac{v_E}{c}$	$\lambda_R = (1 + \frac{v_E}{c}) \times \lambda_E$ si $v_E << c$: $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_E} = \frac{v_E}{c}$

EXEMPLE

Dans le spectre de la lumière émise par une étoile qui s'éloigne de la Terre, on mesure un décalage de longueur d'onde $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_E} = 2 \times 10^{-5}$.

Puisque :

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_E} = \frac{v_E}{c}$$

La vitesse ce cette étoile par rapport à la Terre est :

$$v_E = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_E} \times c$$
$$v_E = 2 \times 10^{-5} \times 3 \times 10^8$$
$$v_E = 6 \times 10^3 \text{ m.s}^{-1}$$

C Les applications de l'effet Doppler

L'effet Doppler subi par une onde acoustique ou électromagnétique permet de déterminer la vitesse relative entre un émetteur et un récepteur.

PROPRIÉTÉ

Dans de nombreux domaines, la mesure du décalage relatif de fréquence que subissent des ondes acoustiques ou électromagnétiques par effet Doppler permet de déterminer une vitesse.

EXEMPLE

Les sonar des bateaux permettent de mesurer la distance qui les sépare d'obstacles ou de poissons, mais aussi de mesurer leur vitesse grâce à l'effet Doppler.

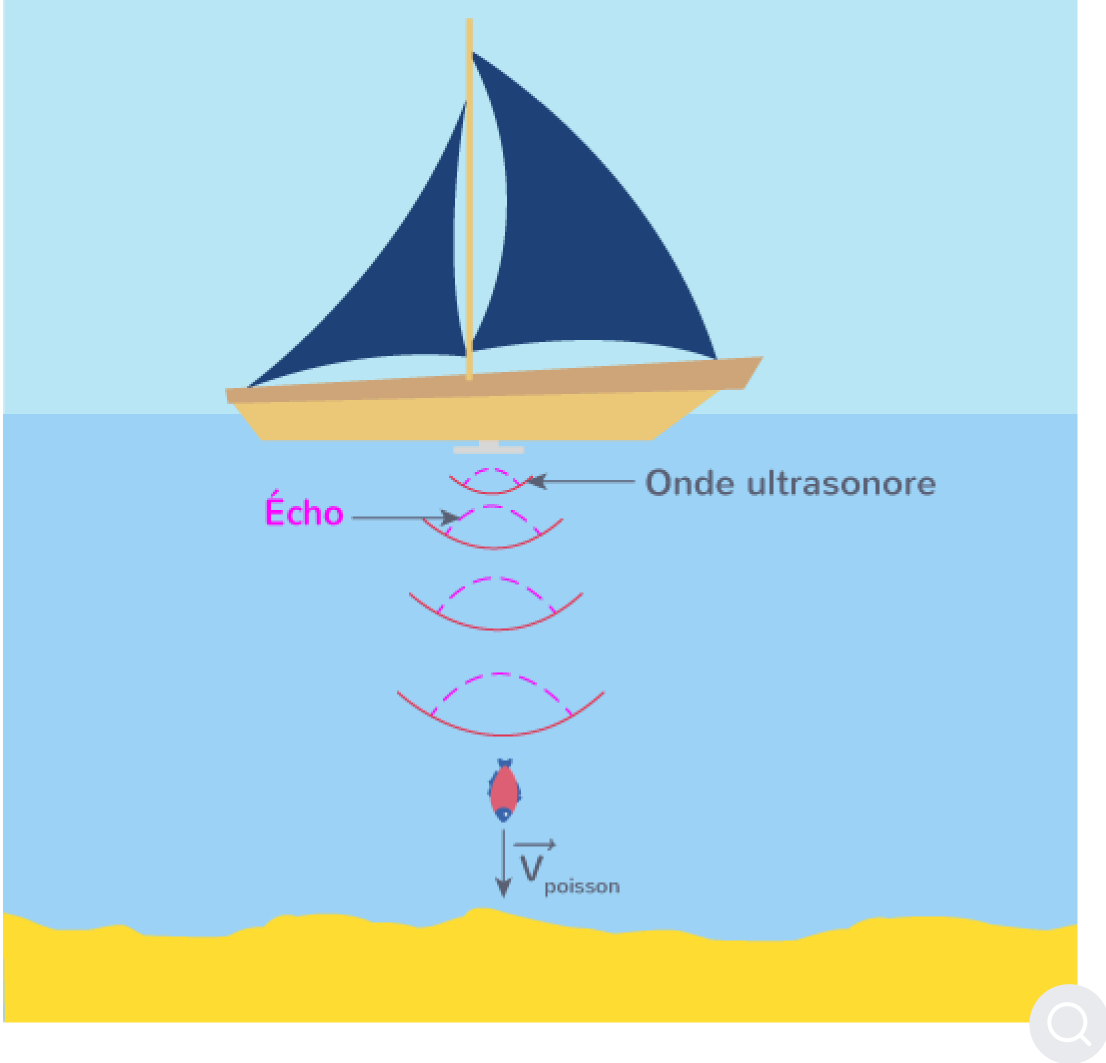


Schéma de fonctionnement d'un sonar

Le navire émet des ultrasons dans la direction du poisson. Les ultrasons se propagent dans l'eau à la célérité d'environ $c = 1\ 500 \text{ m.s}^{-1}$. Le poisson, qui se déplace vers le fond réfléchit les ultrasons, qui sont captés par le sonar. Si celui-ci mesure un décalage relatif en fréquence $\dfrac{\Delta F}{F_E} = -6{,}2 \times 10^{-3}$, la vitesse du poisson est :

$v_{\text{poisson}} = -c \times \dfrac{\Delta F}{F_E}$ (puisqu'ici : $\dfrac{\Delta F}{F_E} = -\dfrac{v_{\text{poisson}}}{c}$)

D'où :

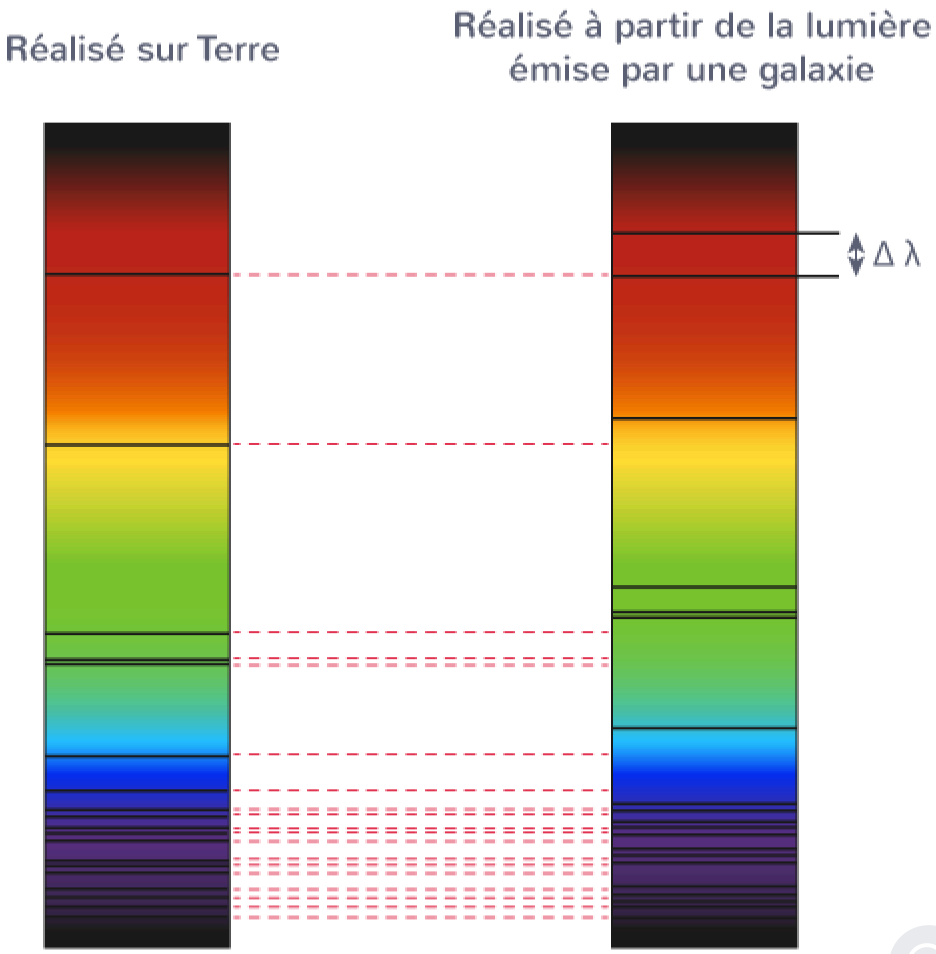
$$v_{\text{poisson}} = 1\ 500 \times 6{,}2 \times 10^{-3}$$
$$v_{\text{poisson}} = 9{,}3 \text{ m.s}^{-1}$$

PROPRIÉTÉ

En astronomie, l'effet Doppler que subissent les ondes électromagnétiques permet de mesurer la vitesse des astres : les longueurs d'onde des raies caractéristiques des éléments chimiques subissent un décalage $\Delta\lambda$ en fonction de la vitesse relative de l'astre émetteur par rapport à la Terre.

EXEMPLE

En 1929, Edwin Hubble a constaté que pour la plupart des galaxies qui nous entourent, les longueurs d'ondes des raies caractéristiques des éléments chimiques étaient décalées vers le rouge (on appelle ce phénomène le « redshift »). Ainsi, puisque $\Delta\lambda$ est positif, cette observation signifie que les galaxies s'éloignent toutes de nous (et les unes des autres). Cela a été la première preuve du Big Bang.

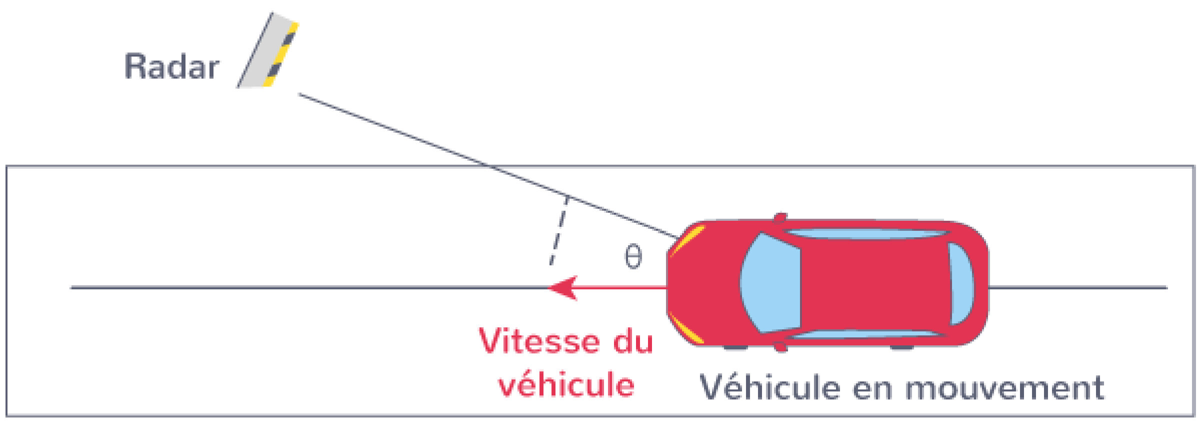


Décalage des longueurs d'onde

REMARQUE

Une autre application de l'effet Doppler est la mesure de la vitesse des véhicules par les « radars » qui sont des émetteurs d'ondes radio (électromagnétiques). Mais cette situation est plus complexe car la source d'onde, le récepteur et la direction de propagation de l'onde ne sont pas alignés et les ondes radio, étant réfléchies par le véhicule, subissent un double effet Doppler.

EXEMPLE



Dans cette situation, l'expression du décalage relatif Doppler est :

$$\frac{\Delta F}{F_E} = \frac{2 \times v_{\text{véhicule}} \times \cos(\theta)}{c}$$

La vitesse du véhicule est donc déterminée à partir de la mesure du décalage de fréquence :

$$v_{\text{véhicule}} = \frac{c}{2 \times \cos(\theta)} \times \frac{\Delta F}{F_E}$$