



Vous avez déjà entendu la sirène d'une ambulance lorsqu'elle s'approche de vous ? Elle paraît toujours plus aiguë que lorsqu'elle s'éloigne de vous. Ce phénomène est appelé effet Doppler et est dû au fait que la source du signal sonore (l'ambulance) est en mouvement par rapport à vous, récepteur fixe.

## A. Intensité des ondes acoustiques

### 1) Intensité sonore

Un son est une **perturbation** se propageant de proche en proche dans un **milieu matériel** par mouvements de compression-dilatation d'entités chimiques. Comme toute onde, il transporte de l'énergie, sans déplacement de matière.

L'**intensité sonore** est la puissance transportée par unité de surface :

$$I = \frac{P}{S}$$

$I$ , intensité sonore en  $W \cdot m^{-2}$

$P$ , puissance en  $W$

$S$ , surface en  $m^2$

Cette puissance se répartit sur une surface de plus en plus grande au cours de l'éloignement de la source sonore. Cela a pour effet de faire décroître rapidement l'intensité sonore lorsque la distance augmente.

La plus petite intensité sonore perceptible par l'oreille humaine est appelée **seuil d'audibilité** et a pour valeur moyenne à 1 kHz :  $I_0 = 1,0 \cdot 10^{-12} W \cdot m^{-2}$ .

### 2) Niveau d'intensité sonore

L'échelle d'intensités sonores étant très large (entre  $1,0 \cdot 10^{-12} W \cdot m^{-2}$  et  $1,0 \cdot 10^2 W \cdot m^{-2}$ ), il est plus commode d'utiliser l'échelle de **niveau d'intensité sonore**. Cette dernière compare l'intensité sonore des sons au seuil d'audibilité qui est la référence.

Le niveau d'intensité sonore noté  $L$  (« level » en anglais), est défini par la relation :

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

$L$ , niveau d'intensité sonore du son en  $dB$  (décibels)

$I$ , intensité sonore du son en  $W \cdot m^{-2}$

$I_0$ , seuil d'audibilité avec  $I_0 = 1,0 \cdot 10^{-12} W \cdot m^{-2}$

L'échelle d'intensité sonore étant logarithmique, il n'y a pas de proportionnalité entre l'intensité sonore et le niveau d'intensité sonore.

Le niveau d'intensité sonore se mesure à l'aide d'un **sonomètre**.

Remarque : La fonction réciproque de  $\log(x)$  est la fonction  $10^x$ . Ainsi  $\log(10^x) = x = 10^{\log(x)}$ .

### 3) Atténuation des sons

Au cours de son déplacement, une onde sonore cède progressivement son énergie au milieu qu'elle traverse. Le son est alors **atténué** à cause de cette perte de puissance. Les milieux traversés par les ondes sonores sont plus ou moins absorbant en fonction de leurs propriétés.

L'atténuation peut avoir lieu :

- lorsque le son a parcouru une grande distance. On parle d'**atténuation géométrique**.
- lorsque le son traverse un milieu très absorbant. On parle d'**atténuation par absorption**.

L'atténuation est calculée grâce à la relation :

$$A = L_{\text{proche}} - L_{\text{éloigné}} = L_{\text{incident}} - L_{\text{transmis}}$$

$A$ , atténuation en  $dB$

$L_{\text{proche}}$ ,  $L_{\text{incident}}$ , niveau sonore initial en  $dB$

$L_{\text{éloigné}}$ ,  $L_{\text{transmis}}$ , niveau sonore final en  $dB$

## B. Effet Doppler

### 1) Mise en évidence

Lorsqu'une source en mouvement émet des ondes (mécaniques ou électromagnétiques) de fréquence  $f_E$ , ces ondes sont perçues par un récepteur immobile par rapport à cette source, avec une fréquence  $f_R$  différente. Ce phénomène est appelé **effet Doppler**.

La vitesse de l'émetteur influe sur la période / longueur d'onde des ondes, modifiant aussi la fréquence de réception. Lorsque l'émetteur se rapproche du récepteur les crêtes des ondes se rapprochent et le son est perçu plus aigu. À l'inverse, lorsque l'émetteur s'éloigne du récepteur, les crêtes des ondes s'écartent et le son est perçu plus grave.

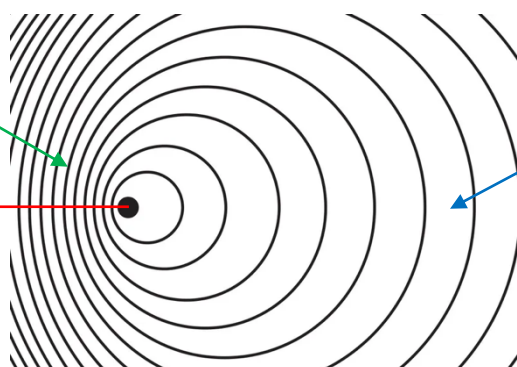
Lorsque l'émetteur voyage à la même vitesse ou à une vitesse supérieure à celle de l'onde, les ondes se superposent. Cela crée un bang supersonique dans le cas des avions à réaction par exemple (on dit qu'ils dépassent le mur du son).

Le **décalage Doppler** est la différence entre la fréquence reçue et la fréquence émise :

$$\Delta f = f_R - f_E$$

À l'avant les crêtes d'ondes se rapprochent : la période diminue, et la fréquence augmente. Le récepteur fixe perçoit un son plus aigu.

Sens du mouvement



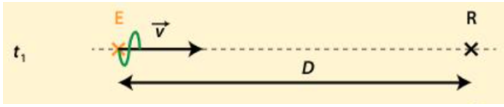
À l'arrière les crêtes d'ondes s'éloignent : la période augmente, et la fréquence diminue. Le récepteur fixe perçoit un son plus grave.

Illustration de l'effet Doppler

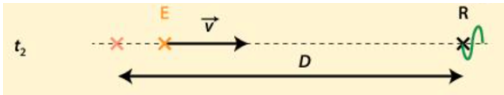
## 2) Démonstration de la relation entre vitesses et fréquences

Un émetteur E, voyage à une vitesse  $v_E$ , en direction d'un récepteur R situé à une distance  $D$ .

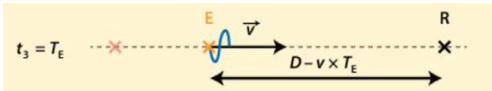
À  $t_1 = 0s$ , un signal sonore voyageant à la vitesse  $v_{onde}$  part de l'émetteur.



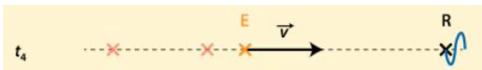
Le signal parcourt une distance  $D$  et voyage à  $v_{onde}$ , il est donc reçu à l'instant  $t_2 = \frac{D}{v_{onde}}$ , par le récepteur.



Une période d'émission  $T_E$  plus tard que le départ du signal, à  $t_3 = T_E$  un second signal sonore est envoyé par l'émetteur, or l'émetteur étant en mouvement il s'est déplacé d'une distance  $d_E$  entre  $t_1$  et  $t_3$ . On peut exprimer  $d_E = v_E \times T_E$ . La distance totale entre E et R vaut maintenant  $D - d_E = D - v_E \times T_E$ .



Le deuxième signal sonore est reçu par le récepteur à l'instant  $t_4$ . Le signal a parcouru entre l'émetteur une distance  $D - v_E \times T_E$ . Il arrive donc au temps  $t_4 = T_E + \frac{D - v_E \times T_E}{v_{onde}}$ .



Une période  $T_R$  s'écoule entre  $t_4$  et  $t_2$  pour le récepteur :

$$\text{Ainsi } T_R = t_4 - t_2 = T_E + \frac{D - v_E \times T_E}{v_{onde}} - \frac{D}{v_{onde}}$$

$$\Leftrightarrow T_R = T_E \left( 1 - \frac{v}{v_{onde}} \right) = T_E \times \frac{v_{onde} - v}{v_{onde}}$$

Sachant que  $f = \frac{1}{T}$  on peut écrire :

$$f_R = f_E \times \frac{v_{onde}}{v_{onde} - v}$$

Ici on voit que  $\frac{v_{onde}}{v_{onde} - v} > 1$  donc  $f_R > f_E$   
Le décalage Doppler  $\delta f = f_R - f_E > 0$

Cette expression est valable lorsque l'émetteur s'**approche** du récepteur.

Si l'émetteur s'**éloigne** du récepteur, on peut alors écrire :

$$f_R = f_E \times \frac{v_{onde}}{v_{onde} + v}$$

Ici on voit que  $\frac{v_{onde}}{v_{onde} + v} < 1$  donc  $f_R < f_E$   
Le décalage Doppler  $\delta f = f_R - f_E < 0$

$f_R, f_E$ , fréquences de réception et d'émission des ondes en Hz

$v_{onde}$ , vitesse de l'onde en  $m \cdot s^{-1}$

$v$ , vitesse de l'émetteur de l'onde par rapport au récepteur en  $m \cdot s^{-1}$

L'effet Doppler par la mise en équation de cette relation entre vitesses et fréquences permet de déterminer des valeurs de vitesses de déplacement.

### 3) Applications

La découverte de l'effet Doppler fonctionne de la même manière avec les ondes électromagnétiques et est utilisée en astronomie sous le nom d'**effet Doppler-Fizeau**.

Le spectre d'émission des étoiles (souvent composées d'hydrogène et d'hélium) possède des raies d'émission à des longueurs d'ondes bien définies. Ce spectre peut être tracé avec précision sur Terre.

En observant les étoiles et en comparant leur spectre avec celui tracé sur Terre on observe un léger décalage, identique pour toutes les raies, vers la gauche du spectre dans la lumière bleue (blue shift) ou vers la droite du spectre dans la lumière rouge (red shift).

Ces décalages Doppler-Fizeau ont permis de calculer les **vitesse de rapprochement ou d'éloignement des galaxies** par rapport à la Terre, récepteur considéré comme fixe, ou encore d'observer la présence d'exoplanètes par légère oscillation des étoiles entre décalage vers le rouge et décalage vers le bleu.

L'effet Doppler (échodoppler) est aussi utilisé en **médecine** pour mesurer la **vitesse des flux sanguins** ou pour les **contrôles routiers** dans les **radars**. Pour ces deux applications, les ondes utilisées sont des ultrasons et ce n'est pas l'émetteur qui est en mouvement mais le récepteur, ce qui ne change pas le principe de fonctionnement.



Tale SI

Attendus

Thème 4 : Ondes et signaux

## Chapitre 06 : Sons et effet Doppler



## Ce que je dois connaître – Notions

Grandeurs et valeursVitesse  $v$ , en  $m \cdot s^{-1}$ Fréquence  $f$ , en  $Hz$ Période  $T$ , en  $s$ Intensité sonore  $I$ , en  $W \cdot m^{-2}$ Puissance  $P$ , en  $W$ Niveau d'intensité sonore  $L$ , en  $dB$ Seuil d'audibilité  $I_0 = 1,0 \cdot 10^{-12} W \cdot m^{-2}$ Formules

$$I = \frac{P}{S} \quad L = 10 \log \left( \frac{I}{I_0} \right) \quad A = L_{proche} - L_{éloigné}$$

$$A = L_{incident} - L_{transmis}$$

$$f_R = f_E \times \frac{v_{onde}}{v_{onde} - v} \quad f_R = f_E \times \frac{v_{onde}}{v_{onde} + v}$$

Définitions et notions

Intensité sonore

Seuil d'audibilité

Niveau d'intensité sonore

Atténuation géométrique / par absorption

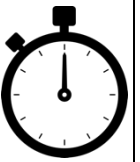
Effet Doppler / Doppler-Fizeau

Applications

## Ce que je dois savoir faire – Capacités



| Capacités à maîtriser                                                                                                                           | Exercices et activités associées          | Auto-évaluation |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------|
| <b>Utiliser</b> l'expression donnant le niveau d'intensité sonore d'un signal                                                                   | Activité : 3<br>Exercice : 4, 16, 21, 25  | 😊 😐 😞           |
| <b>Illustrer</b> l'atténuation géométrique et l'atténuation par absorption                                                                      | Activité : 3<br>Exercice : 7, 18, 20      | 😊 😐 😞           |
| <b>Utiliser</b> la fonction logarithme décimal et sa fonction réciproque                                                                        | Activité : 3<br>Exercice : 4, 16, 21      | 😊 😐 😞           |
| <b>Décrire et interpréter</b> qualitativement les observations correspondantes à une manifestation de l'effet Doppler                           | Activité : 1, 2<br>Exercice : 9, 11, 22   | 😊 😐 😞           |
| <b>Établir</b> l'expression du décalage Doppler dans le cas d'un observateur fixe, d'un émetteur mobile, dans une configuration à une dimension | Activité : 2<br>Exercice : 13, 22, 26     | 😊 😐 😞           |
| <b>Utiliser</b> l'expression du décalage Doppler dans des situations variées utilisant des ondes acoustiques ou des ondes électromagnétiques    | Activité : 2<br>Exercice : 15, 17, 22, 26 | 😊 😐 😞           |
| <b>Utiliser</b> l'expression du décalage Doppler en acoustique pour déterminer une vitesse                                                      | Activité : 2                              | 😊 😐 😞           |



## 1 Le niveau d'intensité sonore

### Calcul de $I$ à partir de $L$

On utilise la fonction logarithme décimal  $x \mapsto \log x$  (pour  $x > 0$ ) qui est la réciproque de la fonction  $x \mapsto 10^x$  :

Niveau d'intensité sonore  $L$  en dB  $\rightarrow L = 10 \log \left( \frac{I}{I_0} \right)$

Intensité sonore  $I$  en  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$  : puissance par unité de surface transportée par une onde sonore

Intensité sonore de référence  $I_0$  en  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$

### Atténuation $A$ en décibel (dB)

Atténuation géométrique liée à la distance parcourue par l'onde sonore

$$A = L_{\text{proche}} - L_{\text{éloigné}}$$

Atténuation par absorption liée à la paroi traversée par l'onde sonore

$$A = L_{\text{incident}} - L_{\text{transmis}}$$

$$A > 0$$

## 2 L'effet Doppler

### Effet Doppler

Existence d'un décalage entre la fréquence  $f_E$  d'une onde émise et la fréquence  $f_R$  de l'onde reçue lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie.

### Décalage Doppler

$$\Delta f = f_R - f_E$$

#### Rapprochement de E et R

$$\lambda_R < \lambda_E; T_R < T_E$$

$$f_R > f_E \text{ donc } \Delta f > 0$$



#### Distance constante entre E et R

$$\lambda_R = \lambda_E; T_R = T_E$$

$$f_R = f_E \text{ donc } \Delta f = 0$$



#### Éloignement de E et R

$$\lambda_R > \lambda_E; T_R > T_E$$

$$f_R < f_E \text{ donc } \Delta f < 0$$



### Établissement de l'expression du décalage Doppler

Chronologie de deux émissions consécutives de signaux et de leurs deux réceptions consécutives



Expression de  $T_R$  en fonction de  $T_E$



Expression de  $f_R$  en fonction de  $f_E$ , puis de  $\Delta f$

### Détermination de valeurs de vitesse et de sens de déplacement



Vitesse d'un véhicule



Vitesse d'écoulement du sang



Galaxie qui s'éloigne

Décalage vers le rouge (redshift)

Vitesse d'éloignement d'une galaxie