

Son et effet Doppler

TERMINALE

1 Intensité et niveau d'intensité sonore

Définition

L'**intensité sonore** I est la puissance sonore reçue par unité de surface, en W/m^2 . L'oreille humaine perçoit des intensités s'étalant sur douze ordres de grandeur, ce qui impose une échelle **logarithmique**.

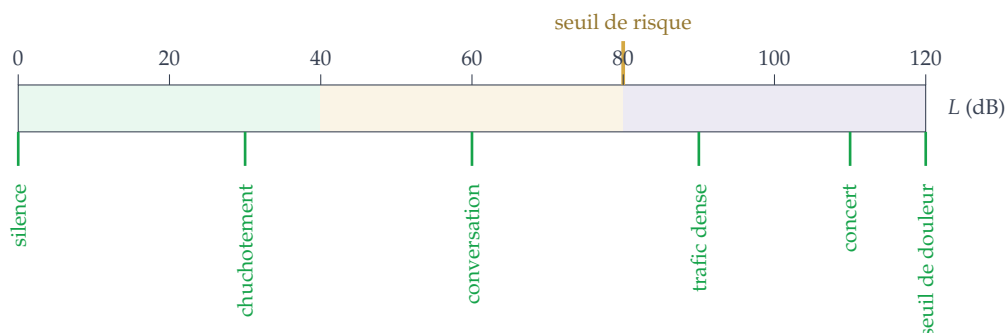
Propriété

Le **niveau d'intensité sonore** se mesure en décibels :

$$L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad \text{avec} \quad I_0 = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

I_0 est l'**intensité sonore de référence**, seuil d'audibilité à 1 kHz. La relation réciproque s'écrit

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



Propriété

Les réflexes de l'échelle logarithmique :

- multiplier I par 10 $\Rightarrow$ ajouter 10 dB ;
- multiplier I par 2 $\Rightarrow$ ajouter 3 dB ;
- deux sources identiques côte à côte ne font donc pas +100 % de bruit, mais seulement +3 dB.

Méthode — Passer de I à L et réciproquement

a. Une conversation correspond à $I = 1,0 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$:

$$L = 10 \log\left(\frac{1,0 \times 10^{-6}}{1,0 \times 10^{-12}}\right) = 10 \log(10^6) = 60 \text{ dB}$$

b. Un concert atteint $L = 105 \text{ dB}$. On revient à l'intensité :

$$I = I_0 \times 10^{105/10} = 1,0 \times 10^{-12} \times 10^{10,5} = 3,2 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2$$

c. Rapport avec la conversation :

$$\frac{3,2 \times 10^{-2}}{1,0 \times 10^{-6}} = 3,2 \times 10^4$$

Le concert est **trente mille fois** plus intense, alors que le niveau n'a augmenté que de 45 dB.

! Les niveaux sonores ne **s'additionnent jamais** : 60 dB + 60 dB ne font pas 120 dB, mais 63 dB. Pour combiner deux sources, il faut revenir aux *intensités*, les additionner, puis reconvertir.

2 L'atténuation

Définition

L'**atténuation** entre deux points est la diminution du niveau d'intensité sonore, exprimée en décibels :

$$A = L_1 - L_2$$

Propriété

• L'**atténuation géométrique** est due à l'étalement de l'énergie. Pour une source ponctuelle rayonnant une puissance $\mathcal{P}$ dans toutes les directions, l'énergie se répartit sur une sphère de rayon d :

$$I = \frac{\mathcal{P}}{4\pi d^2}$$

L'intensité varie donc en $1/d^2$: **doubler la distance divise I par 4, soit -6 dB.**

• L'**atténuation par absorption** est due au milieu traversé, qui convertit une partie de l'énergie sonore en énergie thermique. C'est le principe des matériaux isolants phoniques.

Méthode — Atténuation géométrique

Une enceinte assimilée à une source ponctuelle rayonne $\mathcal{P} = 0,50$ W.

1. Intensité à $d_1 = 2,0$ m :

$$I_1 = \frac{0,50}{4\pi \times 2,0^2} = 9,9 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2 \quad L_1 = 10 \log\left(\frac{9,9 \times 10^{-3}}{10^{-12}}\right) = 100 \text{ dB}$$

2. À $d_2 = 8,0$ m, soit quatre fois plus loin :

$$I_2 = \frac{0,50}{4\pi \times 8,0^2} = 6,2 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2 \quad L_2 = 88 \text{ dB}$$

3. Atténuation : $A = 100 - 88 = 12$ dB.

4. Contrôle : la distance a été multipliée par $4 = 2 \times 2$, donc on attend deux fois -6 dB, soit -12 dB. ✓

Méthode — Atténuation par absorption

Une cloison atténue de 28 dB. Dans une pièce, le niveau atteint 95 dB.

1. Niveau perçu de l'autre côté :

$$L_2 = L_1 - A = 95 - 28 = 67 \text{ dB}$$

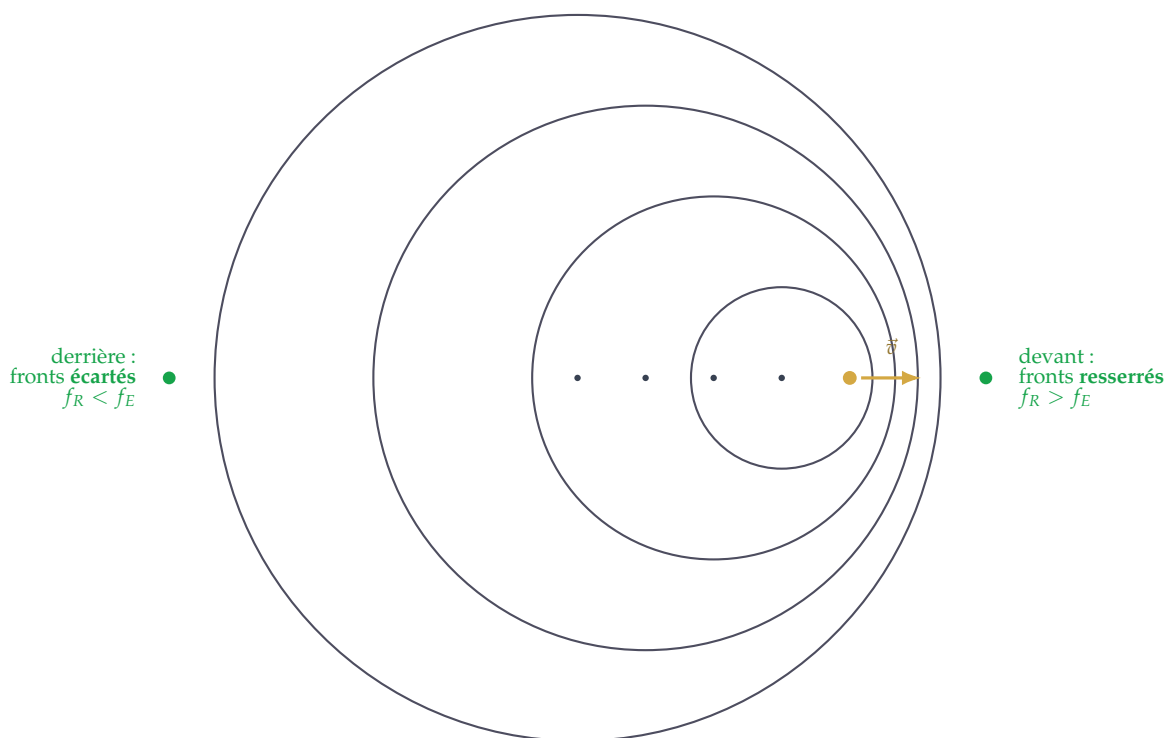
2. En intensité, cela correspond à une division par $10^{28/10} = 6,3 \times 10^2$: la cloison absorbe plus de 99,8 % de l'énergie sonore incidente.

3. Les deux atténuations **s'additionnent en décibels** : si le voisin est en plus à 6 m au lieu de 3 m, il faut retrancher 6 dB supplémentaires.

3 L'effet Doppler

Définition

L'**effet Doppler** est la modification de la fréquence perçue d'une onde lorsque la source et l'observateur sont en **mouvement relatif**. La fréquence est perçue plus **haute** à l'approche, plus **basse** à l'éloignement.



Propriété

Une source qui avance « rattrape » les fronts d'onde qu'elle émet vers l'avant et les resserre, tandis qu'elle les distend vers l'arrière. La **longueur d'onde** perçue change donc, alors que la **célérité** c , fixée par le milieu, reste *inchangée*.

Méthode — Établir l'expression du décalage Doppler

Une source émet à la fréquence f_E en se déplaçant à la vitesse v vers un observateur **fixe**, dans un milieu où l'onde se propage à la célérité c .

1. Entre deux émissions successives, il s'écoule la période $T_E = 1/f_E$. Pendant ce temps, le front précédent a parcouru $c T_E$, mais la source s'est rapprochée de $v T_E$. La distance entre deux fronts

— la longueur d'onde perçue — vaut donc :

$$\lambda_R = c T_E - v T_E = (c - v) T_E$$

2. L'observateur étant fixe, l'onde lui parvient toujours à la célérité c :

$$f_R = \frac{c}{\lambda_R} = \frac{c}{(c - v) T_E}$$

$$\boxed{f_R = f_E \frac{c}{c - v}} \quad (\text{la source s'approche})$$

3. Si la source s'éloigne, les fronts sont distendus et il suffit de changer le signe de v :

$$\boxed{f_R = f_E \frac{c}{c + v}} \quad (\text{la source s'éloigne})$$

4. Le **décalage Doppler** est l'écart $\Delta f = f_R - f_E$. Lorsque $v \ll c$, on peut le simplifier :

$$\frac{\Delta f}{f_E} \approx \frac{v}{c}$$

Méthode — La sirène de l'ambulance

Une ambulance émet un son de fréquence $f_E = 700$ Hz et roule à $v = 25$ m/s (90 km/h). La célérité du son dans l'air vaut $c = 340$ m/s.

1. Fréquence perçue à l'approche :

$$f_R = 700 \times \frac{340}{340 - 25} = 700 \times \frac{340}{315} = 756 \text{ Hz}$$

2. Fréquence perçue après le passage :

$$f'_R = 700 \times \frac{340}{340 + 25} = 700 \times \frac{340}{365} = 652 \text{ Hz}$$

3. Le saut de fréquence au passage vaut $756 - 652 = 104$ Hz, soit environ deux demi-tons : c'est très nettement audible.

4. Contrôle : $f_R > f_E > f'_R$, conformément au sens attendu. ✓

Ce qui change, c'est la **fréquence perçue**, pas la fréquence *émise* : l'ambulancier, lui, entend toujours 700 Hz. Et la célérité c ne dépend que du milieu — jamais de la vitesse de la source. C'est l'erreur conceptuelle la plus fréquente du chapitre.

4 Applications du décalage Doppler

Propriété

L'effet Doppler concerne **toutes** les ondes, y compris électromagnétiques. Pour la lumière et avec $v \ll c$:

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$

Un objet qui s'éloigne décale son spectre vers le **rouge** (λ augmente, *redshift*), un objet qui

s'approche vers le **bleu**.

Méthode — Vitesse de fuite d'une galaxie

La raie de l'hydrogène, de longueur d'onde $\lambda_0 = 656,3 \text{ nm}$ au laboratoire, est observée à $\lambda = 662,9 \text{ nm}$ dans le spectre d'une galaxie.

1. La longueur d'onde a *augmenté* : la galaxie s'**éloigne**.

$$\Delta\lambda = 662,9 - 656,3 = 6,6 \text{ nm}$$

2. Vitesse d'éloignement, avec $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$:

$$v = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = 3,00 \times 10^8 \times \frac{6,6}{656,3} = 3,0 \times 10^6 \text{ m/s}$$

soit environ 3000 km/s.

3. Vérification de l'approximation : $v/c = 1,0 \times 10^{-2}$, donc $v \ll c$. La formule simplifiée est légitime. ✓

Trois applications à connaître :

- le **radar** de contrôle routier, qui mesure le décalage d'une onde réfléchie par un véhicule ;
- l'**échographie Doppler**, qui mesure la vitesse du sang dans les vaisseaux à partir des ultrasons réfléchis par les globules ;
- l'**astrophysique**, où le décalage vers le rouge des galaxies a révélé l'expansion de l'Univers.

À retenir

- $L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$ avec $I_0 = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$, et $I = I_0 \times 10^{L/10}$.
- $\times 10$ sur $I \Rightarrow +10 \text{ dB}$; $\times 2 \Rightarrow +3 \text{ dB}$. Les niveaux **ne s'additionnent pas**.
- **Atténuation** $A = L_1 - L_2$, en dB. Géométrique : $I = \frac{\mathcal{P}}{4\pi d^2}$, donc -6 dB quand la distance double.
- **Doppler** : $f_R = f_E \frac{c}{c - v}$ à l'approche, $f_R = f_E \frac{c}{c + v}$ à l'éloignement.
- Si $v \ll c$: $\frac{\Delta f}{f_E} \approx \frac{v}{c}$ et $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \approx \frac{v}{c}$.
- **Piège** : la célérité c ne dépend que du *milieu*. Ce qui change avec le mouvement, c'est λ , donc la fréquence *perçue*.