

Fiche de cours Sons et effet Doppler

L'essentiel du chapitre en deux pages

définitions · lois · méthodes · à savoir par cœur

1 RAPPELS SUR L'ONDE SONORE

Définition. Un son est une onde mécanique progressive **longitudinale** : une succession de compressions et de dilatations du milieu, qui ne se propage donc *pas dans le vide*. Sa célérité c ne dépend que du milieu ($c \approx 340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dans l'air, environ $1500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dans l'eau) ; sa fréquence f est imposée par la source et ne change pas en changeant de milieu. La période $T = 1/f$ et la longueur d'onde vérifient $\lambda = cT = \frac{c}{f}$.

2 INTENSITÉ ET NIVEAU D'INTENSITÉ SONORE

Définition. L'**intensité sonore** I est la puissance sonore reçue par unité de surface, en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. Le **niveau d'intensité sonore** L se calcule à partir du seuil d'audibilité $I_0 = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$:

$$L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \text{ en décibels (dB)}, \quad \text{soit} \quad I = I_0 \times 10^{L/10}.$$

Remarque. L'échelle est *logarithmique* car l'oreille perçoit des intensités s'étalant sur douze ordres de grandeur : I_0 correspond à $L = 0 \text{ dB}$, le seuil de douleur (120 dB) à $I = 1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Utile : $\log(10^x) = x$, $\log(ab) = \log a + \log b$, $\log(a^n) = n \log a$, $\log 2 \approx 0,30$.

Propriété — additivité. Les **intensités s'ajoutent**, jamais les niveaux : $I = I_1 + I_2 + \dots$. Pour n sources identiques de niveau L_1 : $L_n = L_1 + 10 \log n$. En particulier, doubler le nombre de sources ajoute 3,0 dB ; dix sources identiques ajoutent 10 dB.

3 ATTÉNUATION

Propriété — atténuation géométrique. Une source *ponctuelle* de puissance P rayonne dans toutes les directions : à la distance d , l'énergie se répartit sur une sphère d'aire $4\pi d^2$, donc

$$I = \frac{P}{4\pi d^2} : I \text{ décroît en } 1/d^2.$$

Doubler la distance divise I par 4, soit une perte de $10 \log 4 = 6,0 \text{ dB}$.

Définition. L'**atténuation** A due à l'absorption par un matériau traversé est la diminution du niveau : $A = L_{\text{avant}} - L_{\text{après}}$, en dB (elle est parfois donnée par mètre de matériau traversé). Les atténuations successives, en décibels, s'ajoutent.

Remarque. Exposition au bruit : le seuil réglementaire (85 dB pour une journée de travail de 8 h) et le seuil de douleur (120 dB) s'expriment par un *niveau*, mais la dose reçue est proportionnelle à $I \times \text{durée}$: la durée admissible est divisée par deux chaque fois que le niveau augmente de 3 dB.

4 EFFET DOPPLER

Définition. L'**effet Doppler** est le décalage entre la fréquence f_E émise par une source et la fréquence f_R perçue par un récepteur, lorsque la distance entre eux varie. Lorsque la source se rapproche, les fronts d'onde successifs sont resserrés : la longueur d'onde perçue diminue et **la fréquence perçue augmente** ; elle diminue lorsque la source s'éloigne.

Théorème. Pour un émetteur se déplaçant à la vitesse $v < c$ sur la droite qui le joint à un récepteur fixe :

$$f_R = f_E \frac{c}{c - v} \text{ (rapprochement)}, \quad f_R = f_E \frac{c}{c + v} \text{ (éloignement)}.$$

Méthode — établir la relation, à savoir refaire. Pendant une période T_E , deux compressions successives sont émises ; entre ces deux émissions, la première a parcouru cT_E et l'émetteur vT_E dans la même direction. Devant un émetteur qui se rapproche, elles sont donc séparées de $\lambda_R = (c - v)T_E$: le récepteur les reçoit à la période $T_R = \frac{\lambda_R}{c} = \frac{c - v}{c}T_E$, d'où $f_R = \frac{1}{T_R} = f_E \frac{c}{c - v}$. Derrière un émetteur qui s'éloigne, $\lambda_R = (c + v)T_E$.

Propriété — approximation des faibles vitesses. Si $v \ll c$, alors $\frac{|\Delta f|}{f_E} = \frac{|f_R - f_E|}{f_E} \approx \frac{v}{c}$, d'où $v \approx c \frac{|\Delta f|}{f_E}$: la mesure du décalage donne la vitesse.

Remarque. Applications : radar et échographie Doppler (l'onde fait l'aller-retour, ce qui double le décalage), vélocimétrie, astrophysique — le **décalage vers le rouge** (redshift) des galaxies qui s'éloignent, avec $\frac{|\Delta \lambda|}{\lambda_0} \approx \frac{v}{c}$.

■ DONNÉES — Valeurs de référence

$I_0 = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ • $c_{\text{son, air}} = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ • $c_{\text{lumière}} = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ • sons audibles : 20 Hz à 20 kHz • conversation 60 dB, rue passante 80 dB, seuil de douleur 120 dB.

5 SAVOIR-FAIRE DU CHAPITRE

► SAVOIR-FAIRE

- Passer de I à L et réciproquement ; utiliser les propriétés du logarithme décimal.
- Additionner plusieurs sources en passant par les intensités, puis revenir au niveau.
- Exploiter l'atténuation géométrique $I = P/(4\pi d^2)$ et une atténuation par absorption en dB.
- Décrire qualitativement l'effet Doppler et prévoir le sens du décalage de fréquence.
- Calculer f_R pour un émetteur mobile, ou déterminer une vitesse à partir d'un décalage mesuré.

6 EXEMPLES TYPES

★ EXEMPLE — de I à L , et retour

Un capteur mesure $I = 2,0 \times 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$: $L = 10 \log \left(\frac{2,0 \times 10^{-5}}{1,0 \times 10^{-12}} \right) = 10 \log(2,0 \times 10^7) = 73 \text{ dB}$. Inversement, $L = 94 \text{ dB}$ donne $I = 10^{-12} \times 10^{9,4} = 2,5 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

★ EXEMPLE — additivité

Deux machines produisent chacune 80 dB au poste de travail. Les intensités s'ajoutent : $I = 2 I_1$, donc $L = L_1 + 10 \log 2 = 80 + 3,0 = 83 \text{ dB}$, et non 160 dB. Pour descendre à 77 dB, il faudrait diviser l'intensité par 4.

★ EXEMPLE — atténuation géométrique

Une source ponctuelle de puissance $P = 0,50 \text{ W}$ est écoutée à $d = 10 \text{ m}$: $I = \frac{P}{4\pi d^2} = 4,0 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, soit $L = 86 \text{ dB}$. À 20 m, le niveau n'est plus que de 80 dB : 6,0 dB de moins.

★ EXEMPLE — effet Doppler

Une sirène émet $f_E = 700 \text{ Hz}$; le véhicule roule à $v = 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. En approche : $f_R = 700 \times \frac{340}{340 - 25} = 756 \text{ Hz}$; après le passage : $f_R = 700 \times \frac{340}{340 + 25} = 652 \text{ Hz}$. Le saut de fréquence audible vaut environ 104 Hz.

✗ PIÈGES

- Additionner des niveaux en décibels : ce sont les *intensités* qui s'ajoutent ; 80 + 80 donne 83 dB, pas 160 dB.
- Confondre $\log$ (décimal) et $\ln$ dans $L = 10 \log(I/I_0)$, ou oublier le facteur 10.
- Croire que la source émet une autre fréquence quand elle bouge : f_E est inchangée, c'est la fréquence *perçue* qui varie.
- Se tromper de signe : au dénominateur, $c - v$ lorsque la source se *rapproche* (fréquence plus élevée), $c + v$ lorsqu'elle s'éloigne.
- Oublier que seule compte la vitesse le long de la ligne source-récepteur : au moment où le véhicule passe devant l'observateur, le décalage est nul.