

Exercices 2 Sons et effet Doppler

Application : spectre en bandes d'octave, sonomètre, isolation, sirène, radar, échographie, débitmètre, galaxies

8 exercices · niveau ●●○ · durée conseillée : 2 h · calculatrice autorisée

★ À RETENIR — Ce qu'il faut savoir faire à la fin de la feuille

- Combiner additivité des intensités, atténuation géométrique et atténuation par absorption sur un dispositif réel ; exploiter un relevé de mesures et un programme Python.
- Exploiter l'effet Doppler pour mesurer une vitesse : véhicule, radar routier, écoulement sanguin, galaxie lointaine.

Exercice 1 Le spectre en bandes d'octave d'un ventilateur

●●○

Un acousticien mesure le bruit d'un ventilateur non pas globalement, mais bande de fréquence par bande de fréquence : le sonomètre donne le niveau L_i associé à chacune des six bandes d'octave de la figure 1.

- 1.1 Quelle bande contribue le plus au bruit ? Peut-on répondre en regardant seulement les niveaux, ou faut-il passer par les intensités ? Justifier.
- 1.2 Calculer l'intensité sonore associée à chaque bande, puis l'intensité sonore totale. En déduire le niveau global L_{tot} du ventilateur.
- 1.3 Un traitement acoustique supprime complètement la bande 500 Hz. Calculer le nouveau niveau global et le gain obtenu. Ce gain est-il à la hauteur de l'effort ?
- 1.4 Quel serait le niveau global si les six bandes avaient toutes le même niveau de 75 dB ? Comparer à 75 dB et commenter.

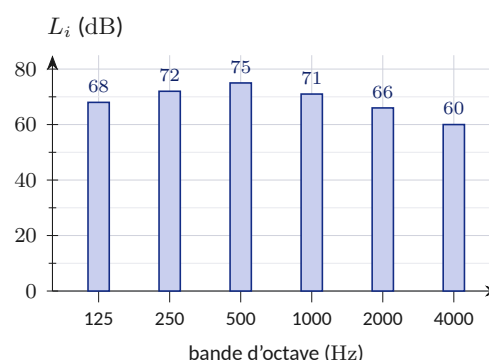


Figure 1 — Spectre en bandes d'octave

■ DONNÉES $I_0 = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ • $L = 10 \log(I/I_0)$, $I = I_0 \times 10^{L/10}$

Exercice 2 Un relevé au sonomètre, et un programme pour l'exploiter

●●○

Dans un champ, loin de tout obstacle, on place une enceinte et on mesure au sonomètre le niveau sonore à différentes distances d de l'enceinte, en la considérant comme une source ponctuelle.

■ DONNÉES $I_0 = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ • $L = 10 \log(I/I_0)$, $I = I_0 \times 10^{L/10}$

d (m)	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	32,0
L (dB)	94,0	88,0	82,0	75,9	69,9	63,9

- 2.1 Vérifier sur le relevé la règle des -6 dB par doublement de distance. Ce comportement est-il compatible avec le modèle de la source ponctuelle ?
- 2.2 Montrer que $L(d) = L_1 - 20 \log d$, où L_1 est le niveau mesuré à 1,0 m et d la distance exprimée en mètres.
- 2.3 Calculer l'intensité sonore à 1,0 m, puis la puissance sonore P émise par l'enceinte.
- 2.4 Recopier et compléter la ligne 4 du programme ci-dessous, qui affiche le niveau prévu pour chacune des distances de la liste. Indiquer la valeur affichée pour $d = 16,0$ m, puis celle qui serait affichée pour $d = 50,0$ m.

```

1 from math import log10
2 L1 = 94.0 # niveau a 1,0 m, en dB
3 for d in [1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0, 32.0]:
4     L = ... # ligne a completer
5     print(d, "m :", round(L, 1), "dB")

```

- 2.5 À 64,0 m, le sonomètre indique 56,8 dB. Calculer la valeur prévue par le modèle, puis l'écart. Citer deux causes possibles de cet écart.

Exercice 3 Isoler une chambre donnant sur le boulevard

●●○

Le niveau sonore extérieur, en façade d'un immeuble, atteint $L_{\text{ext}} = 78$ dB aux heures de pointe. La façade de la chambre est constituée d'un mur d'indice d'affaiblissement $R_{\text{mur}} = 52$ dB et d'une fenêtre à simple vitrage d'indice $R_{\text{fen}} = 25$ dB. L'indice d'affaiblissement est l'atténuation, en décibels, apportée par la paroi : $L_{\text{transmis}} = L_{\text{ext}} - R$.

■ DONNÉES $I_0 = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ • $L = 10 \log(I/I_0)$, $I = I_0 \times 10^{L/10}$

- 3.1 Calculer le niveau transmis dans la chambre par le mur seul, puis par la fenêtre seule.
- 3.2 En déduire le niveau sonore total dans la chambre. Lequel des deux éléments impose pratiquement le résultat ? Formuler la règle générale que cela illustre.
- 3.3 On remplace la fenêtre par un double vitrage acoustique d'indice $R'_{\text{fen}} = 37$ dB. Calculer le nouveau niveau total dans la chambre, puis le gain obtenu.
- 3.4 L'objectif est de descendre au-dessous de 35 dB. Déterminer l'indice d'affaiblissement minimal que devrait avoir la fenêtre pour l'atteindre, le mur restant inchangé. Cette valeur est-elle réaliste ? Que proposer d'autre ?

Exercice 4 La sirène qui passe

●●○

Un élève place un smartphone à une dizaine de mètres d'une route rectiligne et enregistre le passage d'un véhicule de secours dont la sirène émet un son de fréquence f_E constante. Un logiciel d'analyse restitue la fréquence perçue au cours du temps (figure 2).

- 4.1 Déterminer graphiquement la fréquence perçue longtemps avant le passage, puis longtemps après. Justifier le sens de la variation.
- 4.2 Déterminer la vitesse v du véhicule, en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ puis en $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$, ainsi que la fréquence f_E réellement émise par la sirène.
- 4.3 À quelle date le véhicule passe-t-il devant le smartphone ? Justifier que la fréquence perçue à cet instant vaut exactement f_E ; vérifier la cohérence avec la figure 2.
- 4.4 Expliquer pourquoi la transition n'est pas instantanée, alors que la vitesse du véhicule, elle, ne varie pas.

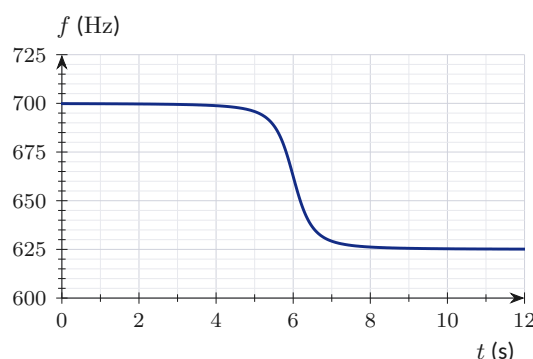


Figure 2 — Fréquence perçue par le smartphone

■ DONNÉES célérité du son dans l'air $c = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Exercice 5 Le radar routier

●●○

Un radar fixe émet une onde électromagnétique de fréquence $f_E = 24,125$ GHz vers les véhicules qui s'approchent. L'onde réfléchiée par un véhicule roulant à la vitesse v revient au radar avec la fréquence f_R ; on admet que, pour $v \ll c$, le décalage vaut $\Delta f = f_R - f_E = \frac{2f_E v}{c}$.

■ DONNÉES célérité de la lumière $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

- 5.1 Justifier qualitativement la présence du facteur 2 : décrire les deux effets Doppler successifs subis par l'onde entre l'émission et le retour au radar.

- 5.2** Le radar mesure $\Delta f = 4,50 \text{ kHz}$. Calculer la vitesse du véhicule, en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ puis en $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$.
- 5.3** L'incertitude-type sur la mesure de Δf vaut $u(\Delta f) = 50 \text{ Hz}$. En déduire $u(v)$ en $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$, puis écrire le résultat de la mesure de v sous la forme $v = (\dots \pm \dots) \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.
- 5.4** En réalité l'axe du faisceau fait un angle $\theta = 25^\circ$ avec la trajectoire du véhicule : la grandeur mesurée n'est que la composante $v \cos \theta$ de la vitesse. Calculer la vitesse réelle du véhicule. Le radar sous-estime-t-il ou surestime-t-il la vitesse ? Est-ce favorable à l'automobiliste ?

Exercice 6 L'échographie Doppler



Une sonde d'échographie émet vers un vaisseau sanguin des ultrasons de fréquence $f_E = 5,0 \text{ MHz}$. Les hématies en mouvement renvoient une onde dont la fréquence est décalée de $\Delta f = \frac{2 f_E v \cos \theta}{c_t}$, où v est la vitesse du sang, $\theta = 60^\circ$ l'angle entre le faisceau et l'axe du vaisseau et c_t la célérité des ultrasons dans les tissus mous.

■ **DONNÉES** célérité des ultrasons dans les tissus mous $c_t = 1\,540 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

- 6.1** Calculer la longueur d'onde des ultrasons dans les tissus. Un détail de $0,1 \text{ mm}$ peut-il être distingué par cette sonde ? Justifier en une phrase.
- 6.2** Le sang circule à $v = 0,45 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dans une artère saine. Calculer Δf . Ce décalage appartient-il au domaine audible (20 Hz à $20\,000 \text{ Hz}$) ? C'est ce qui permet au médecin d'écouter le flux sanguin.
- 6.3** Au niveau d'un rétrécissement de l'artère, l'appareil mesure $\Delta f = 2,1 \text{ kHz}$. Calculer la vitesse correspondante du sang et comparer à la valeur précédente.
- 6.4** Pourquoi l'angle θ doit-il être connu avec soin ? Que mesurerait l'appareil si la sonde était placée perpendiculairement au vaisseau ?

Exercice 7 Une galaxie qui s'éloigne



Dans le spectre d'une galaxie lointaine, la raie K du calcium, de longueur d'onde $\lambda_0 = 393,37 \text{ nm}$ au laboratoire, est observée à $\lambda = 401,80 \text{ nm}$.

■ **DONNÉES** lumière : $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ • $H_0 = 70 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-1}$ • $1 \text{ pc} = 3,26 \text{ a.l.}$ • $1 \text{ an} = 3,16 \times 10^7 \text{ s}$

- 7.1** Le décalage se fait-il vers le rouge ou vers le bleu ? Qu'en déduit-on sur le mouvement de la galaxie par rapport à la Terre ?
- 7.2** Calculer le décalage relatif $z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$, puis la vitesse d'éloignement de la galaxie, en $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$. Vérifier que $v \ll c$.
- 7.3** La loi de Hubble s'écrit $v = H_0 d$. En déduire la distance d de la galaxie, en mégaparsecs puis en années-lumière.
- 7.4** Exprimer H_0 en s^{-1} (on prendra $1 \text{ pc} = 3,09 \times 10^{16} \text{ m}$), puis calculer $1/H_0$ en années. Quelle grandeur cosmologique cette durée estime-t-elle, et pourquoi n'est-ce qu'un ordre de grandeur ?

Exercice 8 Un débitmètre à effet Doppler



Pour mesurer sans contact le débit d'eau d'une canalisation de diamètre intérieur $D = 80,0 \text{ mm}$, on colle sur sa paroi une sonde qui émet dans l'eau des ultrasons de fréquence $f_E = 1,00 \text{ MHz}$, sous un angle $\theta = 45^\circ$ avec l'axe de la canalisation. Les micro-bulles et particules entraînées par l'eau renvoient vers la sonde une onde décalée de $\Delta f = \frac{2 f_E v \cos \theta}{c_{\text{eau}}}$, où v est la vitesse de l'eau et $c_{\text{eau}} = 1,50 \times 10^3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

- 8.1** Calculer la longueur d'onde des ultrasons dans l'eau. Citer un avantage des ultrasons sur un son audible pour cette mesure.
- 8.2** L'appareil mesure $\Delta f = 1,90 \text{ kHz}$. Calculer la vitesse v de l'eau.
- 8.3** En déduire le débit volumique de la canalisation, en $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$ puis en $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$.
- 8.4** Si l'eau est parfaitement limpide et dégazée, l'appareil n'affiche plus rien. Expliquer pourquoi. Quel autre débitmètre, vu au chapitre 16, pourrait alors être utilisé ?