

TERMINALE SPÉCIALITÉ · PHYSIQUE-CHIMIE · ONDES ET SIGNAUX · CHAPITRE 19



R. RINGUET · 2026 – 2027

Approfondissement Sons et effet Doppler

Démonstrations, émetteur ou récepteur mobile, double effet Doppler, sources linéiques, niveau équivalent, loi de Hubble

6 exercices · niveau ●●● · durée conseillée : 2 h · calculatrice autorisée

★ À RETENIR — Ce que cette feuille ajoute au cours

- Démontrer *entièrement* les relations de l'effet Doppler (émetteur mobile, puis récepteur mobile), le facteur 2 du radar, et la loi d'atténuation géométrique.
- Aller plus loin : sources linéiques, niveau équivalent et dose de bruit, loi de Hubble et âge de l'Univers, implantation d'un bâtiment près d'une infrastructure bruyante.

Les passages « hors programme » ne sont pas exigibles au baccalauréat : les relations nécessaires y sont fournies.

Exercice 1 Émetteur mobile ou récepteur mobile : ce n'est pas la même chose ●●●

A. L'émetteur s'éloigne. Un émetteur E se déplace en ligne droite à la vitesse constante v , en s'éloignant d'un récepteur fixe R, et émet un son de période T_E .

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

1.1 Entre l'émission de deux compressions successives, de combien l'émetteur s'est-il éloigné ? Quelle distance sépare, dans l'air, ces deux compressions ?

1.2 En déduire la longueur d'onde λ_R reçue par R, puis établir que $f_R = f_E \frac{c}{c+v}$.

B. C'est le récepteur qui bouge (*hors programme — pour aller plus loin*). L'émetteur est maintenant fixe et le récepteur se rapproche de lui à la vitesse v_R .

1.3 Justifier que la longueur d'onde du son dans l'air vaut toujours $\lambda = c/f_E$: le milieu « ignore » le mouvement du récepteur.

1.4 Le récepteur avance à la rencontre des compressions : à quelle vitesse les fronts d'onde défilent-ils devant lui ? En déduire que $f_R = f_E \frac{c+v_R}{c}$.

1.5 Calculer la fréquence perçue dans les deux situations suivantes, avec $f_E = 1\,000 \text{ Hz}$ et une vitesse de $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$: (i) l'émetteur se rapproche du récepteur fixe ; (ii) le récepteur se rapproche de l'émetteur fixe. Calculer l'écart relatif entre les deux résultats.

1.6 Montrer que les deux expressions coïncident lorsque $v \ll c$: on pourra utiliser $\frac{1}{1-x} \approx 1+x$ pour $|x| \ll 1$.

Retrouver ainsi $\frac{\Delta f}{f_E} \approx \frac{v}{c}$.

1.7 Pour une onde lumineuse, aucune expérience n'a jamais permis de distinguer « l'émetteur bouge » de « le récepteur bouge ». Quelle particularité de la lumière, par rapport au son, cela traduit-il ?

Exercice 2 D'où vient le facteur 2 du radar ? ●●●

(La relation du récepteur mobile, hors programme, est rappelée ci-dessous.) Un émetteur fixe envoie une onde de fréquence f_E vers un obstacle qui s'approche de lui à la vitesse v ; l'obstacle renvoie l'onde qu'il reçoit, et l'émetteur en mesure la fréquence f_R . On utilisera les deux relations de l'exercice 1 : émetteur mobile, $f = f' \frac{c}{c-u}$; récepteur mobile, $f = f' \frac{c+u}{c}$ (f' émise, f reçue, u vitesse de celui qui bouge, positive s'il se rapproche de l'autre, négative s'il s'en éloigne).

■ **DONNÉES** célérité du son dans l'air $c = 340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ • célérité de la lumière $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

- 2.1** L'obstacle joue d'abord le rôle de *récepteur mobile*. Exprimer la fréquence f_1 qu'il reçoit.
- 2.2** Il réémet ce signal de fréquence f_1 en jouant cette fois le rôle d'*émetteur mobile*. Montrer que la fréquence finalement reçue vaut $f_R = f_E \frac{c+v}{c-v}$.
- 2.3** En déduire que $\Delta f = f_R - f_E = f_E \frac{2v}{c-v}$, puis que $\Delta f \approx \frac{2f_E v}{c}$ lorsque $v \ll c$. Expliquer d'où vient le facteur 2.
- 2.4** **Radar routier.** $f_E = 24,1 \text{ GHz}$ et $v = 30,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Calculer Δf avec l'expression exacte, puis avec l'expression approchée. Combien de chiffres significatifs faudrait-il afficher pour voir une différence ?
- 2.5** **Chauve-souris.** Une chauve-souris émet $f_E = 45,0 \text{ kHz}$ en volant à $8,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ vers un papillon immobile. Elle est ici émetteur mobile puis récepteur mobile : montrer que l'on retrouve le f_R de la question 2.2. Calculer la fréquence qu'elle reçoit en retour, puis Δf , avec l'expression exacte puis avec l'expression approchée : calculer l'écart relatif entre les deux. Commenter.
- 2.6** Le papillon se met à fuir en ligne droite à $v_p = 2,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, la chauve-souris continuant à $v_c = 8,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Si l'émetteur (vitesse u_E) et le récepteur (vitesse u_R) bougent tous deux, on admet que $f = f' \frac{c+u_R}{c-u_E}$. En suivant l'onde (aller : chauve-souris qui se rapproche, papillon qui s'éloigne ; retour : papillon qui s'éloigne, chauve-souris qui se rapproche), établir l'expression de f_R en fonction de f_E , c , v_c et v_p . Calculer Δf et le comparer à $\frac{2f_E(v_c - v_p)}{c}$. Que peut en déduire la chauve-souris sur sa proie ?

Exercice 3 Sources ponctuelles et sources linéiques



A. Une source ponctuelle de puissance sonore P rayonne la même puissance dans toutes les directions, dans un milieu sans absorption.

■ **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** En considérant la sphère de rayon d centrée sur la source, établir $I(d) = \frac{P}{4\pi d^2}$, puis montrer que $L(d) = 10 \log\left(\frac{P}{4\pi I_0}\right) - 20 \log d$.
- 3.2** En déduire la perte de niveau lorsque la distance est doublée, puis lorsqu'elle est multipliée par 10.
- B. (Hors programme — pour aller plus loin.)** Une file ininterrompue de véhicules sur une autoroute se comporte comme une source *linéique* : la puissance sonore n'est plus concentrée en un point mais répartie le long d'une droite infinie, et l'énergie se répartit alors sur des *cylindres* de rayon d centrés sur cette droite.
- 3.3** En raisonnant sur l'aire latérale d'un cylindre de rayon d et de longueur ℓ , montrer que $I(d)$ est inversement proportionnelle à d (et non à d^2). En déduire la perte de niveau par doublement de distance.
- 3.4** Trois sonomètres placés à 25 m, 50 m et 100 m de l'axe d'une autoroute indiquent respectivement 68,0 dB, 65,0 dB et 62,0 dB. Ces mesures sont-elles compatibles avec le modèle de la source ponctuelle ? avec celui de la source linéique ? Justifier.
- 3.5** Quel niveau le modèle de la source ponctuelle aurait-il prévu à 100 m ? De combien se serait-on trompé, et dans quel sens ?
- 3.6** À quelle distance de l'autoroute le niveau descend-il à 55 dB ? Commenter l'ampleur du résultat.

Exercice 4 Le niveau équivalent, ou comment moyenner des décibels



(Hors programme — pour aller plus loin.) Un bruit dont le niveau varie au cours du temps est caractérisé par son *niveau équivalent* sur une durée T : c'est le niveau du bruit constant qui apporterait à l'oreille la même énergie pendant T . Si l'ouvrier subit le niveau L_i pendant la durée t_i , avec $\sum t_i = T$:

$$L_{\text{eq}} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \sum_i t_i 10^{L_i/10} \right).$$

Un ouvrier passe 2,0 h à 92 dB, 3,0 h à 85 dB et 3,0 h à 78 dB.

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

- 4.1 Justifier la forme de cette expression à partir de la définition de l'intensité sonore et de l'énergie reçue.
- 4.2 Calculer $L_{\text{éq}}$ sur les 8 h de la journée de travail. La valeur limite réglementaire étant de 85 dB, l'exposition est-elle acceptable ?
- 4.3 Calculer la moyenne des trois niveaux pondérée par les durées. La comparer à $L_{\text{éq}}$: pourquoi est-elle à la fois fautive et dangereuse ?
- 4.4 À quelle durée maximale faudrait-il ramener la phase la plus bruyante pour que $L_{\text{éq}}$ redescende à 85 dB, les deux autres phases étant inchangées ? (Le temps libéré est passé au calme : on garde $T = 8 \text{ h}$.)
- 4.5 L'entreprise préfère équiper l'ouvrier d'un casque d'atténuation 25 dB, porté uniquement pendant la phase à 92 dB. Calculer le nouveau $L_{\text{éq}}$ et conclure.

Exercice 5 La loi de Hubble et l'âge de l'Univers



Dans le spectre de cinq galaxies dont la distance est connue par une autre méthode, on mesure la longueur d'onde de la raie K du calcium, qui vaut $\lambda_0 = 393,37 \text{ nm}$ au laboratoire.

■ **DONNÉES** célérité de la lumière $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ • $H_0 = 70 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ • $1 \text{ Mpc} = 3,09 \times 10^{22} \text{ m}$ • $1 \text{ an} = 3,16 \times 10^7 \text{ s}$

$d \text{ (Mpc)}$	20	50	100	200	300
$\lambda \text{ (nm)}$	395,21	397,96	402,55	411,73	420,91

- 5.1 Pour chaque galaxie, calculer le décalage relatif $z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$, puis la vitesse radiale $v = z c$, en $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$.
- 5.2 Tracer v en fonction de d . Les points sont-ils alignés avec l'origine ? Déterminer graphiquement le coefficient directeur et comparer à H_0 .
- 5.3 Exprimer H_0 en s^{-1} , puis calculer $1/H_0$ en secondes et en années.
- 5.4 Montrer que, si les galaxies s'éloignent à vitesse constante, elles auraient toutes quitté un même point il y a $1/H_0$. Pourquoi n'est-ce qu'une estimation de l'âge de l'Univers ?
- 5.5 Un quasar présente $z = 3,0$. Que donnerait la relation $v = z c$? Expliquer pourquoi elle n'est plus valable, et ce qu'il faut alors abandonner dans l'image d'une « vitesse de fuite » des galaxies.

Exercice 6 Résolution de problème : où implanter la nouvelle école ?



Une commune doit construire une école sur un terrain bordant une rocade. Le trafic est assimilable à une source linéique (exercice 3) et un sonomètre placé à 30 m de l'axe indique 74,0 dB en journée. La réglementation impose de ne pas dépasser 60 dB en façade d'un établissement scolaire. Le terrain s'étend de 30 m à 120 m de l'axe. La commune peut faire édifier le long de la rocade un écran acoustique qui apporterait 10 dB d'atténuation en tout point du terrain.

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

Le projet est-il réalisable ? Si oui, à quelle distance minimale de la rocade faut-il implanter l'école ? On établira d'abord l'expression du niveau en fonction de la distance ; toute démarche sera valorisée.

- 6.1 Une voie ferrée produit à elle seule 54,0 dB en façade, en tout point du terrain. La solution retenue reste-t-elle conforme ? Sinon, déterminer la nouvelle distance minimale.
- 6.2 Le maire propose de réduire l'écran à 6,0 dB d'atténuation pour en diminuer le coût, en implantant l'école à la limite du terrain. Cette solution est-elle acceptable ? Justifier par le calcul.
- 6.3 Citer deux limites du modèle utilisé dans tout ce problème.