

Exercices

Corrigé de l'exercice 1 — L'épicentre du séisme

1. Les deux ondes partent en même temps du même point ; les ondes P sont plus **rapides** ($6,0 > 3,5 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$), elles arrivent donc toujours en premier — c'est ce qui leur vaut leur nom (P comme *premières*, S comme *secondes*).
2. Sur le sismogramme, les ondes P arrivent à $t_1 = 20 \text{ s}$ et les ondes S à $t_2 = 50 \text{ s}$: $\Delta t = 30 \text{ s}$.
3. La station est à la distance d : les temps de trajet sont $t_P = d/v_P$ et $t_S = d/v_S$, d'où $\Delta t = t_S - t_P = d \left(\frac{1}{v_S} - \frac{1}{v_P} \right)$ et $d = \Delta t / \left(\frac{1}{v_S} - \frac{1}{v_P} \right)$. Application numérique :

$$d = \frac{30}{\frac{1}{3,5} - \frac{1}{6,0}} = 2,5 \times 10^2 \text{ km.}$$

La station est à environ 250 km de l'épicentre.

4. Une station donne une **distance**, donc un cercle de positions possibles ; deux cercles se coupent en deux points ; il faut **trois** stations pour lever l'ambiguïté (triangulation).

Corrigé de l'exercice 2 — La célérité des ultrasons

1. Le retard entre les deux récepteurs distants de d vaut $\tau = d/v$, d'où $v = d/\tau = 0,800/(2,33 \times 10^{-3}) = 343 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.
2. $u(v) = v \cdot u(\tau)/\tau = 343 \times 0,05/2,33 = 8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (1 chiffre significatif, par excès), soit $v = (343 \pm 8) \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.
3. $v_{\text{th}} = 20,0 \times \sqrt{294} = 343 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Écart normalisé (fiche **O4**), avec les valeurs non arrondies :

$$z = \frac{|343,3 - 342,9|}{\sqrt{8^2 + 2^2}} = 0,05 < 2 :$$

la mesure est compatible avec la valeur théorique.

Corrigé de l'exercice 3 — La sono du festival

1. $I = I_0 \times 10^{L/10} = 10^{-12} \times 10^{9,5} = 3,2 \times 10^{-3} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.
2. Les intensités s'additionnent : $L_2 = 95 + 10 \times \log 2 = 98 \text{ dB}$; $L_{10} = 95 + 10 \times \log 10 = 105 \text{ dB}$.
3. On cherche n tel que $10 \times \log n = 110 - 95 = 15 \text{ dB}$, soit $n = 10^{1,5} = 32$ enceintes (31,6 arrondi à l'entier supérieur — avec 31 enceintes on reste sous 110 dB).

4. $L_{16} = 95 + 10 \times \log 16 = 107 \text{ dB} > 102 \text{ dB}$: le niveau dépasse la limite de 5 dB — soit plus de trois fois l'intensité autorisée ($10^{0,5} = 3,2$). Risque auditif réel pour le public (et amende pour l'installateur).

Corrigé de l'exercice 4 — La fibre optique

1. Si la puissance est divisée par deux, le niveau varie de $10 \times \log(1/2) = -3,0 \text{ dB}$: une chute de 3,0 dB correspond bien à une puissance divisée par deux.
2. $A = \alpha \cdot d = 3,0 \text{ dB}$ pour $d = 3,0/0,20 = 15 \text{ km}$.
3. Sur 120 km, $A = 0,20 \times 120 = 24 \text{ dB}$, soit un rapport $10^{-24/10} = 4,0 \times 10^{-3}$: il arrive 0,40 % de la puissance émise — d'où les répéteurs des liaisons transocéaniques.

Corrigé de l'exercice 5 — Le radar routier

1. L'onde subit **deux** décalages : la voiture est un récepteur en mouvement (premier décalage), puis elle réémet l'onde réfléchiée en tant que source mobile (second décalage) — d'où le facteur 2.
2. De $\Delta f = 2 \times f_0 \cdot v/c$ on isole $v = \frac{\Delta f \cdot c}{2 \times f_0} = \frac{4,5 \times 10^3 \times 3,00 \times 10^8}{2 \times 24,125 \times 10^9} = 28,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 1,0 \times 10^2 \text{ km/h}$.
3. $1,0 \times 10^2 \text{ km/h} > 90 \text{ km/h}$: verbalisé (même après la marge technique de 5 km/h, l'excès est constitué).

Corrigé de l'exercice 6 — Le décalage vers le rouge

1. $\lambda > \lambda_0$: décalage vers le **rouge**, la galaxie **s'éloigne**.
2. $V = -c \cdot \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = -3,00 \times 10^8 \times \frac{675,0 - 656,3}{656,3} = -8,5 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (signe négatif = éloignement), soit $|V|/c = 2,8 \%$: on reste sous les quelques centièmes de c , l'approximation est acceptable (à 10 % de c il faudrait le traitement relativiste).
3. Presque toutes les galaxies présentent un décalage vers le rouge d'autant plus grand qu'elles sont lointaines (loi de Hubble) : tout observateur voit les autres galaxies le fuir — c'est la signature d'un Univers en **expansion**, où les distances elles-mêmes croissent.

Corrigé — Exercice de réflexion — Le musicien du train

L'effet Doppler dépend du **mouvement relatif** de l'émetteur et du récepteur. Pour le chef de wagon, le violoniste est immobile : la distance entre eux ne change pas, chaque crête met le même temps à lui parvenir, il reçoit exactement la fréquence émise. Pour l'auditeur du quai, la source s'approche puis s'éloigne : les crêtes lui arrivent d'abord resserrées (son plus aigu), puis espacées (plus grave). Si c'est l'**auditeur** qui court vers un violoniste immobile, il rencontre les crêtes plus souvent qu'un auditeur immobile : il perçoit là aussi un son plus aigu — l'effet Doppler existe dans les deux cas, seule l'expression exacte du décalage change (au programme : émetteur mobile, récepteur fixe).

Corrigé — Problème de Fermi — Le concert de cris

Le tableau de repères du cours place une classe bruyante vers 80 dB : on retient le même ordre de grandeur pour une personne qui crie à un mètre.

Un cri de 80 dB correspond à

$$I_1 = I_0 \times 10^{80/10} = 10^{-4} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}.$$

Le seuil de douleur, 120 dB, correspond à

$$I_{\max} = I_0 \times 10^{120/10} = 1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}.$$

À un mètre, si les intensités s'additionnaient simplement, il faudrait donc

$$n = \frac{I_{\max}}{I_1} = \frac{1}{10^{-4}} = 10^4$$

personnes.

Mais dix mille personnes ne tiennent pas à un mètre ! Dans un stade, un crieur moyen est à environ 50 m : son intensité est divisée par $50^2 = 2,5 \times 10^3 \sim 10^3$, et il faut alors $n \sim 10^7$ crieurs — environ **cent fois** la capacité du plus grand stade du monde. Conclusion d'ordre de grandeur : un groupe de voix humaines non amplifiées n'atteint pas le seuil de douleur pour un auditeur placé à distance réaliste ; les 120 dB d'un concert sont dus aux amplificateurs.

E.C.E. — Exploitation

1. Les longueurs d'onde des raies d'absorption sont connues très précisément en laboratoire (source immobile) : toute différence entre la valeur mesurée dans le spectre de l'étoile et la valeur de laboratoire est attribuable au mouvement relatif — les raies sont des étalons de longueur d'onde.
2. $\lambda = 5890,4 \text{ \AA} > \lambda_0 = 5889,95 \text{ \AA}$: décalage vers le rouge, l'étoile **s'éloigne** de la Terre ce jour-là.
3. De $\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = -\frac{V}{c}$ on isole $V = -c \cdot \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$. Application numérique :

$$V = -3,00 \times 10^8 \times \frac{5890,4 - 5889,95}{5889,95} = -2,3 \times 10^4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}.$$

4. $u(V) = c \cdot u(\lambda)/\lambda_0 = 3,00 \times 10^8 \times 0,1/5889,95 = 6 \times 10^3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (1 c.s., par excès), d'où $V = (-23 \pm 6) \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$: le signe négatif confirme l'éloignement.
5. La seconde raie est décalée de $5896,4 - 5895,92 = 0,5 \text{ \AA}$, égal — à l'incertitude de lecture près — au décalage de la première (0,45 Å). Deux raies décalées de la même fraction : c'est bien un effet Doppler global de l'étoile, la mesure est confirmée.

6. La courbe $V(t)$ est **sinusoïdale** : période $\simeq 10$ jours, amplitude $\simeq 23 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, autour d'une vitesse moyenne (dite **systémique**) $V_0 \simeq -6 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ — l'ensemble du système s'éloigne lentement de nous, et l'étoile oscille autour de cette valeur. La vitesse radiale change périodiquement de signe : l'étoile décrit un mouvement de va-et-vient, elle orbite autour du centre de masse d'un système et est donc tirée par un **compagnon invisible**. Cette oscillation seule ne prouve pas qu'il s'agit d'une exoplanète — c'est la méthode dite des vitesses radiales, à l'origine de la découverte de 51 Pegasi b (prix Nobel 2019 de M. Mayor et D. Queloz).

Programmation Python

1. `L = 10 * math.log10(I / I0)`
2. La recherche complète est :

```
while trouve == False:
    if niveaux[i] < SEUIL:
        r_limite = distances[i]
        trouve = True
    else:
        i = i + 1
```

3. Le script affiche à $r = 16,0 \text{ m}$, le niveau sonore passe sous $85,0 \text{ dB}$. Par le calcul : $I_{85} = I_0 \times 10^{8,5} = 3,2 \times 10^{-4} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, puis de $I = P/(4\pi r^2)$ on isole $r = \sqrt{P/(4\pi I_{85})} = 16 \text{ m}$.
4. Avec $P' = 2P$, le script affiche $22,5 \text{ m}$: la distance limite est multipliée par $\sqrt{2} = 1,4$ — et non par 2 — car r varie comme la **racine** de la puissance ($r = \sqrt{P/(4\pi I)}$). Doubler la sono ne repousse le danger que de 40 %.

Corrigé — Exercice d'approfondissement — La galaxie au radiotélescope

1. $f_G = 1396,7 \text{ MHz} < f_0 = 1420,4 \text{ MHz}$: décalage vers les basses fréquences, la galaxie **s'éloigne**. Rien de surprenant : c'est le cas de la quasi-totalité des galaxies (expansion, exercice 6) — seules quelques voisines immédiates, comme Andromède, s'approchent.
2. $v_G = c \cdot \frac{f_G - f_0}{f_0} = 3,00 \times 10^8 \times \frac{1396,7 - 1420,4}{1420,4} = -5,01 \times 10^6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (signe négatif = éloignement); de même $v_B = 3,00 \times 10^8 \times \frac{1395,7 - 1420,4}{1420,4} = -5,22 \times 10^6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Le bras fuit un peu plus vite que le centre; la rotation en est la différence : $v_{\text{rot}} = |v_B - v_G| = 2,1 \times 10^5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ — deux cents kilomètres par seconde.
3. Le bras décrit un cercle de rayon $R = 4,5 \times 10^{20} \text{ m}$ à la vitesse v_{rot} :

$$T = \frac{2\pi R}{v_{\text{rot}}} = \frac{2\pi \times 4,5 \times 10^{20}}{2,1 \times 10^5} = 1,3 \times 10^{16} \text{ s} \simeq 4 \times 10^8 \text{ ans},$$

du même ordre que la période de la Voie lactée. C'est en confrontant de telles

vitesses de rotation à la masse visible des galaxies qu'est née l'hypothèse de la matière noire (encadré *Pour aller plus loin*).