

Ondes sonores : intensité, niveau sonore et effet Doppler

COURS • P13 • TERMINALE

Spécialité de terminale, programme officiel. Cours original rédigé avec une IA. Le cours de ton enseignant fait foi.

Sommaire du cours

Ce que tu dois savoir faire	1
Cours	1
Exemples résolus	6
Méthodes et pièges	7
Vers le PASS	8
Exercices	8
Corrigés	9

Ce que tu dois savoir faire

- Décrire une onde sonore comme une onde mécanique progressive et relier sa célérité, sa fréquence et sa longueur d'onde.
- Définir l'intensité sonore et la calculer pour une source ponctuelle qui émet dans toutes les directions.
- Définir le niveau d'intensité sonore, passer de l'intensité au niveau et inversement, en utilisant correctement le logarithme décimal.
- Exploiter l'additivité des intensités sonores (et non des niveaux) pour plusieurs sources.
- Définir et calculer une atténuation en décibels, géométrique (avec la distance) ou par absorption (paroi, milieu).
- Décrire l'effet Doppler et établir l'expression du décalage de fréquence pour un émetteur mobile et un récepteur fixe, à une dimension.
- Utiliser l'approximation du décalage Doppler lorsque la vitesse de l'émetteur est faible devant la célérité de l'onde.
- Exploiter l'effet Doppler pour mesurer une vitesse : radar, échographie Doppler, astrophysique.

Cours

1. Le son, une onde mécanique progressive

Un **son** est une onde mécanique progressive : une perturbation de la pression du milieu (et du mouvement local de ses entités) qui se propage de proche en proche, avec transport d'énergie mais **sans transport de matière**. Dans l'air, l'onde sonore est longitudinale : les couches d'air vibrent dans la direction de propagation, créant une succession de compressions et de dilatations. Un son a besoin d'un milieu matériel : il ne se propage pas dans le vide.

La **célérité** c d'une onde est la vitesse de propagation de la perturbation. Elle dépend du milieu et de sa température : environ $340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dans l'air à 20°C , environ $1\,500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dans l'eau, environ $1\,540 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dans les tissus mous du corps humain, plusieurs milliers de $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ dans les solides.

Pour une onde périodique, la **période** T (en s) est la durée d'un motif, la **fréquence** $f = 1/T$ (en Hz) le nombre de motifs par seconde, et la **longueur d'onde** λ (en m) la distance parcourue par l'onde pendant une période :

$$\lambda = c \times T = c / f$$

La fréquence est imposée par la source et ne change pas quand l'onde passe d'un milieu à un autre ; la longueur d'onde, elle, change avec la célérité.

L'oreille humaine perçoit les sons de fréquence comprise entre environ **20 Hz et 20 kHz**. En dessous se trouvent les **infrasons**, au-dessus les **ultrasons** (utilisés en échographie, entre 1 et 20 MHz environ). La **hauteur** d'un son est liée à sa fréquence fondamentale, son **timbre** à la composition de son spectre (présence et amplitude des harmoniques), et sa **force** à l'intensité sonore, objet de ce chapitre.

2. L'intensité sonore

Une onde sonore transporte de l'énergie. On caractérise la puissance qu'elle transporte à travers une surface par l'**intensité sonore** I , puissance reçue par unité de surface perpendiculaire à la direction de propagation :

$$I = P / S, \text{ avec } P \text{ en } W, S \text{ en } \text{m}^2 \text{ et } I \text{ en } W\cdot\text{m}^{-2}.$$

Source ponctuelle isotrope. Une source de petite taille qui émet une puissance sonore P de la même façon dans toutes les directions, dans un milieu qui n'absorbe pas l'énergie, répartit cette puissance sur des sphères de plus en plus grandes. À la distance r de la source, la sphère a une aire $4\pi r^2$, d'où :

$$I = P / (4 \pi r^2)$$

L'intensité est donc **inversement proportionnelle au carré de la distance** : si r double, I est divisée par 4 ; si r est multiplié par 10, I est divisée par 100. C'est l'**atténuation géométrique**, due à la dilution de l'énergie dans l'espace, sans aucune perte d'énergie.

Ordres de grandeur. L'oreille humaine perçoit des intensités qui s'étendent sur un domaine immense : à 1 kHz, le **seuil d'audibilité** est voisin de $I_0 = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, et le **seuil de douleur** voisin de 1 à $10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Le rapport entre les deux dépasse mille milliards.

Additivité des intensités. Lorsque plusieurs sources indépendantes (non synchronisées, ce qui est le cas de sources de bruit ordinaires) émettent en même temps, les **intensités** reçues en un point s'additionnent :

$$I(\text{totale}) = I_1 + I_2 + \dots$$

3. Le niveau d'intensité sonore

Une échelle linéaire est malcommode pour un domaine qui s'étend sur plus de douze puissances de dix. De plus, la sensation auditive n'est pas proportionnelle à l'intensité : multiplier l'intensité par 10 donne la même impression d'augmentation, quel que soit le niveau de départ. On utilise donc une échelle **logarithmique**.

Définition. Le **niveau d'intensité sonore** L , exprimé en **décibels (dB)**, est :

$$L = 10 \times \log(I / I_0)$$

où $\log$ est le logarithme décimal et $I_0 = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ l'intensité de référence (seuil d'audibilité à 1 kHz). L est sans dimension ; le décibel est une unité de rapport.

Relation inverse. En notant 10^x la puissance x de 10 (fonction réciproque du logarithme décimal) :

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

Propriétés à connaître, qui découlent de $\log(a \times b) = \log a + \log b$:

- $I = I_0$ donne $L = 0 \text{ dB}$ (seuil d'audibilité, et non absence de son) ;
- multiplier I par 10 ajoute 10 dB ; multiplier I par 100 ajoute 20 dB ; multiplier I par 10^n ajoute $10n \text{ dB}$;
- multiplier I par 2 ajoute $10 \log 2 \approx 3 \text{ dB}$; diviser I par 2 retire 3 dB ;
- multiplier I par 4 ajoute environ 6 dB.

Les niveaux ne s'additionnent pas. Deux sources identiques produisant chacune 70 dB en un point produisent ensemble une intensité double, donc un niveau de $70 + 3 = 73 \text{ dB}$, et non 140 dB. Pour combiner des niveaux, on revient toujours aux intensités : $I = I_0 \times 10^{L/10}$ pour chaque source, somme des intensités, puis retour au niveau.

Situation	$L \text{ (dB)}$	$I \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2})$
Seuil d'audibilité	0	$1,0 \times 10^{-12}$
Bruissement de feuilles	20	$1,0 \times 10^{-10}$
Conversation normale	60	$1,0 \times 10^{-6}$
Rue animée	80	$1,0 \times 10^{-4}$
Concert amplifié, près des enceintes	110	$1,0 \times 10^{-1}$
Seuil de douleur	120 à 130	1 à 10

Le niveau sonore se mesure avec un **sonomètre**. La réglementation du travail fixe des seuils d'exposition (de l'ordre de 80 à 85 dB pour une exposition quotidienne prolongée), au-delà desquels des protections auditives sont exigées.

Passer d'un niveau à une intensité et retour

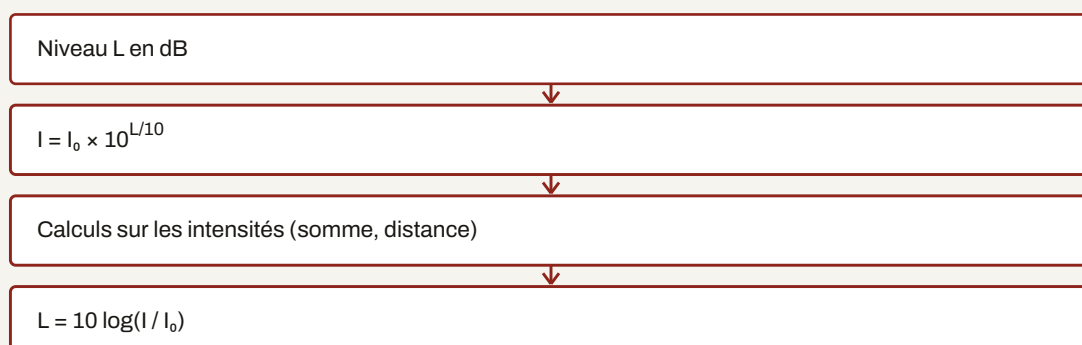


Schéma de principe original • lire les conditions et limites dans le texte

4. L'atténuation

Quand un son s'éloigne de sa source ou traverse un obstacle, son intensité diminue. On mesure cette diminution par l'**atténuation** A , en décibels, entre un niveau L_1 et un niveau L_2 plus faible :

$$A = L_1 - L_2 = 10 \times \log(I_1 / I_2)$$

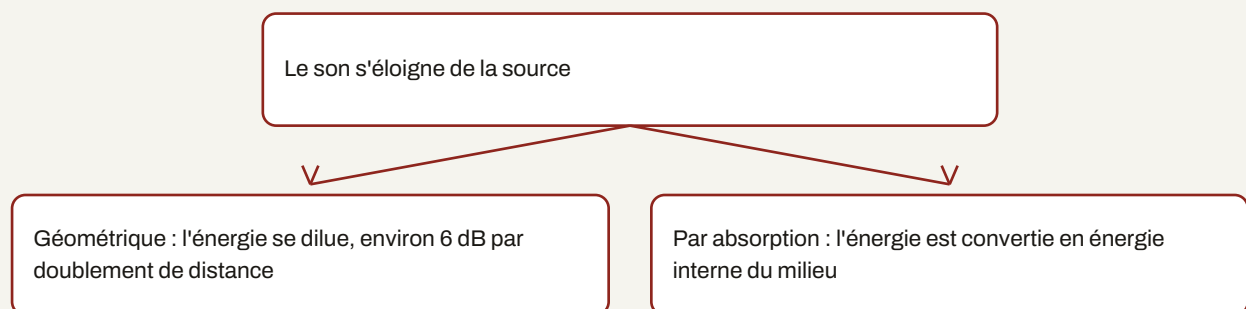
Une atténuation de 10 dB divise l'intensité par 10, une atténuation de 30 dB la divise par 1 000.

Atténuation géométrique. Pour une source ponctuelle isotrope, $I_1 / I_2 = (r_2 / r_1)^2$, donc $A = 20 \times \log(r_2 / r_1)$. Doubler la distance atténue de $20 \log 2 \approx 6$ dB ; multiplier la distance par 10 atténue de 20 dB.

Atténuation par absorption. Une partie de l'énergie sonore est transformée en énergie interne du milieu traversé (frottements, mouvements désordonnés) : c'est l'absorption. Elle dépend du matériau et de la fréquence ; en général, les sons aigus sont plus absorbés que les sons graves, ce qui explique qu'on entende surtout les basses d'une musique à travers un mur. Les matériaux poreux et souples (mousses, laines minérales) absorbent beaucoup ; une paroi lourde et étanche réfléchit et transmet peu. On caractérise une paroi ou une protection auditive par son atténuation en dB : un bouchon d'oreille de 25 dB fait passer un bruit de 100 dB à 75 dB pour l'oreille.

En **échographie**, les ultrasons sont absorbés par les tissus : l'atténuation est approximativement proportionnelle à la distance parcourue (aller et retour) et à la fréquence. Une fréquence élevée donne une meilleure résolution (longueur d'onde plus petite) mais pénètre moins profondément : c'est un compromis.

Causes de l'atténuation



Deux branches distinctes • ce schéma ne relie pas les deux issues entre elles

5. L'effet Doppler

Constat. Lorsqu'une ambulance s'approche, sa sirène paraît plus aiguë qu'à l'arrêt ; quand elle s'éloigne, plus grave. Plus généralement, l'**effet Doppler** est la modification de la fréquence perçue d'une onde lorsque l'émetteur et le récepteur sont en mouvement l'un par rapport à l'autre. Le **décalage Doppler** est la différence $\Delta f = f(R) - f(E)$ entre la fréquence reçue $f(R)$ et la fréquence émise $f(E)$.

Établissement du décalage (émetteur mobile, récepteur fixe, à une dimension). Un émetteur se déplace à la vitesse constante v en ligne droite vers un récepteur fixe. Il émet une onde de fréquence

$f(E)$, de période $T(E) = 1/f(E)$, qui se propage à la célérité c dans le milieu immobile (on suppose $v < c$).

- À l'instant $t = 0$, l'émetteur émet un maximum de pression (une « crête »).
- À l'instant $T(E)$, il émet la crête suivante. Pendant cette durée, la première crête a parcouru la distance $c \times T(E)$, mais l'émetteur s'est lui-même rapproché de $v \times T(E)$ en suivant la même direction.
- La distance entre les deux crêtes successives, c'est-à-dire la longueur d'onde dans la zone située devant l'émetteur, vaut donc : $\lambda(R) = c T(E) - v T(E) = (c - v) T(E)$.
- Les crêtes se propagent à la célérité c vers le récepteur, qui les reçoit avec la période $T(R) = \lambda(R) / c$.

On en déduit la fréquence reçue :

$$f(R) = c / \lambda(R) = f(E) \times c / (c - v) \text{ (émetteur qui se rapproche)}$$

Comme $c / (c - v) > 1$, le son reçu est plus aigu. Si l'émetteur s'éloigne, le même raisonnement donne $\lambda(R) = (c + v) T(E)$, d'où :

$$f(R) = f(E) \times c / (c + v) \text{ (émetteur qui s'éloigne)}$$

et le son reçu est plus grave.

Décalage Doppler. Pour un émetteur qui se rapproche :

$$\Delta f = f(R) - f(E) = f(E) \times (c / (c - v) - 1) = f(E) \times v / (c - v)$$

Approximation pour v très inférieure à c . On peut alors négliger v devant c au dénominateur, et l'on obtient la relation approchée, valable dans les deux sens :

$$\Delta f \approx \pm f(E) \times v / c, \text{ soit } \Delta f / f(E) \approx \pm v / c \text{ (signe + au rapprochement, signe - à l'éloignement)}$$

Le décalage relatif de fréquence est proportionnel à la vitesse de l'émetteur. Cette approximation est très bonne pour un véhicule (v / c de l'ordre de 0,1 pour une voiture rapide face au son) mais devient grossière quand v approche de c .

Récepteur mobile. Si c'est le récepteur qui se déplace à la vitesse v vers un émetteur fixe, il rencontre les crêtes plus souvent : $f(R) = f(E) \times (c + v) / c$. Pour v très inférieure à c , on retrouve, au rapprochement, $\Delta f \approx f(E) \times v / c$.

Seule compte la composante de la vitesse selon la droite émetteur-récepteur : un émetteur qui passe perpendiculairement à cette droite ne produit, à cet instant, aucun décalage.

6. Applications de l'effet Doppler

Mesurer une vitesse. En mesurant $f(R)$ et en connaissant $f(E)$ et c , on calcule la vitesse de l'émetteur : $v = c \times (f(R) - f(E)) / f(R)$ pour un émetteur qui se rapproche (relation exacte tirée de $f(R) = f(E) c / (c - v)$), ou $v \approx c \times \Delta f / f(E)$ si v est petite devant c .

Le radar routier. Le radar émet une onde électromagnétique ($c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) de fréquence $f(E)$ de l'ordre de 24 GHz, qui se réfléchit sur le véhicule et revient au radar. L'effet Doppler intervient **deux fois** : le véhicule en mouvement reçoit une onde décalée (récepteur mobile), puis la renvoie comme un émetteur mobile. Pour un véhicule se déplaçant selon l'axe du faisceau, avec v très inférieure à c , le décalage total vaut :

$$\Delta f \approx 2 \times f(E) \times v / c$$

Les décalages sont de l'ordre du kilohertz pour une fréquence émise de dizaines de gigahertz, mais se mesurent avec une grande précision par comparaison entre l'onde émise et l'onde reçue.

L'échographie Doppler. Une sonde émet des ultrasons de fréquence $f(E)$ (quelques MHz) dans les tissus ($c \approx 1\,540\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Les globules rouges du sang, en mouvement, réfléchissent les ultrasons avec un double décalage Doppler. Si la vitesse v du sang fait un angle θ avec l'axe du faisceau, seule sa composante $v \cos \theta$ compte :

$$\Delta f \approx 2 \times f(E) \times v \times \cos \theta / c$$

On mesure ainsi la vitesse du sang dans un vaisseau, son sens (selon le signe de Δf) et les accélérations anormales, par exemple au niveau d'un rétrécissement. Les décalages obtenus (de l'ordre du kHz) sont dans le domaine audible : l'appareil peut les rendre audibles, d'où le « souffle » caractéristique de l'examen. Il faut incliner la sonde : si le faisceau est perpendiculaire au vaisseau ($\theta = 90^\circ$), $\cos \theta = 0$ et aucun décalage n'est mesuré.

L'astrophysique. La lumière émise par une étoile ou une galaxie qui s'éloigne de la Terre est reçue avec une fréquence plus faible, donc une longueur d'onde plus grande : les raies du spectre sont décalées vers le rouge. Pour v très inférieure à c , le décalage relatif vaut $\Delta \lambda / \lambda \approx v / c$. Cette mesure a permis d'établir que les galaxies lointaines s'éloignent de nous.

Effet Doppler en pratique

Sirène qui passe : aigu puis grave

Radar routier : double décalage, $2fv/c$

Échographie Doppler : vitesse du sang, facteur $\cos \theta$

Astrophysique : décalage vers le rouge des galaxies

Repères complémentaires, sans séquence causale

Exemples résolus

Exemple 1 : le niveau sonore d'une enceinte

Énoncé. À 2,0 m d'une enceinte assimilée à une source ponctuelle isotrope, on mesure un niveau d'intensité sonore de 100 dB. On néglige l'absorption par l'air. Donnée : $I_0 = 1,0 \times 10^{-12}\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. a) Calculer l'intensité sonore à 2,0 m. b) Calculer la puissance sonore de l'enceinte. c) Calculer le niveau à 20 m. d) On ajoute une seconde enceinte identique, placée au même endroit. Quel niveau mesure-t-on à 2,0 m ?

Résolution. a) $I = I_0 \times 10^{L/10} = 1,0 \times 10^{-12} \times 10^{10} = 1,0 \times 10^{-2}\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. b) $I = P / (4\pi r^2)$, donc $P = I \times 4\pi r^2 = 1,0 \times 10^{-2} \times 4\pi \times (2,0)^2 \approx 0,50\text{ W}$. Une puissance sonore faible suffit à produire un niveau élevé. c) La distance est multipliée par 10, donc l'intensité est divisée par $10^2 = 100$: l'atténuation vaut 20 dB. $L = 100 - 20 = 80\text{ dB}$. d) Les intensités s'ajoutent : $I(\text{totale}) = 2 \times 1,0 \times 10^{-2}\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. $L = 10 \log(2,0 \times 10^{-2} / 1,0 \times 10^{-12}) = 10 \log(2,0 \times 10^{10}) = 10 \times (10 + \log 2) \approx 103\text{ dB}$.

Exemple 2 : bruit de circulation et double vitrage

Énoncé. À 5,0 m d'une route, assimilée à une source ponctuelle, le niveau sonore vaut 80 dB. Une chambre se trouve à 20 m de la route, derrière un double vitrage qui apporte une atténuation de 30 dB. On néglige l'absorption par l'air. a) Calculer le niveau sonore devant la fenêtre. b) Calculer le niveau dans la chambre. c) Calculer l'intensité sonore dans la chambre.

Résolution. a) Atténuation géométrique : $A = 20 \log(r_2 / r_1) = 20 \log(20 / 5,0) = 20 \log 4 \approx 12 \text{ dB}$. Devant la fenêtre : $L = 80 - 12 = \mathbf{68 \text{ dB}}$. b) Le vitrage ajoute 30 dB d'atténuation : $L = 68 - 30 = \mathbf{38 \text{ dB}}$. c) $I = I_0 \times 10^{3,8} = 1,0 \times 10^{-12} \times 6,3 \times 10^3 \approx \mathbf{6,3 \times 10^{-9} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}$. L'intensité a été divisée par $10^{4,2} \approx 1,6 \times 10^4$ entre 5,0 m de la route et l'intérieur de la chambre.

Exemple 3 : la sirène d'une ambulance

Énoncé. Une ambulance roule en ligne droite à vitesse constante. Sa sirène émet un son de fréquence 680 Hz. La célérité du son dans l'air est $c = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. a) L'ambulance roule à $72 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ vers un piéton immobile. Calculer la fréquence perçue par le piéton. b) Calculer la fréquence perçue quand elle s'est éloignée. c) Inversement, un piéton mesure 722,5 Hz à l'approche puis 642,2 Hz à l'éloignement, sans connaître la fréquence émise. Retrouver la vitesse de l'ambulance.

Résolution. a) $v = 72 / 3,6 = 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Émetteur qui se rapproche : $f(R) = f(E) \times c / (c - v) = 680 \times 340 / 320 \approx \mathbf{723 \text{ Hz}}$ (722,5 Hz). Le son est plus aigu. b) Émetteur qui s'éloigne : $f(R) = 680 \times 340 / 360 \approx \mathbf{642 \text{ Hz}}$. Le son est plus grave. c) Le rapport des deux fréquences ne dépend pas de $f(E)$: $f(\text{approche}) / f(\text{éloignement}) = (c + v) / (c - v)$. Notons ce rapport $k = 722,5 / 642,2 \approx 1,125$. Alors $k(c - v) = c + v$, d'où $v = c(k - 1) / (k + 1) = 340 \times 0,125 / 2,125 = \mathbf{20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}$, soit $72 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. On retrouve la vitesse de la question a).

Méthodes et pièges

- Méthode type pour les niveaux sonores : convertis chaque niveau en intensité, fais les calculs sur les intensités (somme, effet de la distance), puis reviens au niveau. Ne fais jamais de calcul direct sur les décibels sauf pour une atténuation.
- Ne confonds pas l'intensité sonore $I (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$ et le niveau d'intensité sonore $L (\text{dB})$: ce ne sont ni les mêmes grandeurs ni les mêmes unités.
- Les décibels ne s'additionnent pas : deux sources de 60 dB donnent 63 dB, dix sources identiques ajoutent 10 dB.
- 0 dB ne signifie pas « aucun son » mais un son d'intensité égale à I_0 ; un niveau négatif est possible pour $I < I_0$.
- Pour une source ponctuelle, l'intensité varie en $1/r^2$, pas en $1/r$: doubler la distance retire environ 6 dB, et non 3 dB.
- Pour l'effet Doppler, raisonne d'abord qualitativement (rapprochement : fréquence plus haute ; éloignement : plus basse), puis vérifie que ton résultat respecte ce sens. C'est le meilleur contrôle du signe dans $c - v$ ou $c + v$.
- Utilise la relation approchée $\Delta f \approx \pm f v / c$ seulement si v est très petite devant c ; sinon, garde la relation exacte.
- Pour une onde réfléchiée par un objet mobile (radar, échographie), pense au facteur 2, et en échographie au facteur $\cos \theta$.

Vers le PASS

En PASS et en LAS, l'acoustique fait partie de la biophysique des ondes. Le niveau d'intensité sonore et les décibels servent à décrire l'audition : courbes de sensibilité de l'oreille selon la fréquence, audiogramme, seuils, et plus largement toute grandeur exprimée en échelle logarithmique. Les ultrasons sont étudiés pour l'imagerie : impédance acoustique, réflexion et transmission aux interfaces entre tissus, atténuation en fonction de la profondeur et de la fréquence, compromis entre résolution et profondeur d'exploration.

L'effet Doppler y est appliqué à la mesure des vitesses circulatoires : formule du décalage avec le double trajet et l'angle d'incidence, interprétation du signe et du spectre des vitesses, repérage d'une accélération au niveau d'une sténose. Le maniement sûr des logarithmes et des puissances de dix acquis dans ce chapitre est indispensable pour les QCM de calcul.

Suite en PASS : Ondes, acoustique et formation des images

Exercices

Niveau 1 : s'entraîner

- Donnée : $I_0 = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. a) Calcule l'intensité sonore correspondant à un niveau de 60 dB. b) Calcule le niveau d'intensité sonore correspondant à une intensité de $3,2 \times 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.
- Une source ponctuelle isotrope émet une puissance sonore de 0,10 W. Calcule l'intensité sonore à 5,0 m, puis le niveau d'intensité sonore correspondant ($I_0 = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$). On néglige l'absorption.
- Une machine produit, à un poste de travail, un niveau de 70 dB. Calcule le niveau produit au même poste par deux machines identiques fonctionnant ensemble, puis par dix.
- Un mur fait passer le niveau sonore de 85 dB d'un côté à 45 dB de l'autre. Calcule l'atténuation apportée par le mur et le facteur par lequel il divise l'intensité.
- Une source sonore émet un son de 440 Hz et se déplace à $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ en ligne droite. La célérité du son vaut $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Calcule la fréquence perçue par un observateur immobile situé sur sa trajectoire, quand elle se rapproche, puis quand elle s'éloigne.

Niveau 2 : type bac

- Le bruit et la distance. Une source ponctuelle isotrope produit un niveau de 90 dB à 10 m. On néglige l'absorption par l'air.
 - Montre que, chaque fois que la distance double, le niveau diminue d'environ 6 dB.
 - Calcule le niveau à 40 m.
 - À quelle distance le niveau tombe-t-il à 60 dB ?
 - En réalité, l'air et le sol absorbent une partie du son. La distance trouvée en c) est-elle surestimée ou sous-estimée ?
- Établir le décalage Doppler. Un émetteur se déplace à vitesse constante v vers un récepteur fixe, en émettant une onde de fréquence $f(E)$ et de période $T(E)$ qui se propage à la célérité c .
 - Exprime la distance entre deux crêtes successives devant l'émetteur.
 - Déduis-en la fréquence reçue $f(R)$ et le décalage Doppler Δf .
 - Montre que, si v est très inférieure à c , $\Delta f \approx f(E) v / c$.
 - Un train roulant à $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ émet un son de 500 Hz en s'approchant ($c = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Calcule la fréquence reçue avec la relation exacte, puis avec la relation approchée. Commente.

8. Contrôle radar. Un radar émet une onde électromagnétique de fréquence $f(E) = 24,125 \text{ GHz}$. Le décalage mesuré sur l'onde réfléchi par une voiture qui s'approche dans l'axe du faisceau vaut $\Delta f = 4,02 \text{ kHz}$. Donnée : $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

a) Explique pourquoi l'effet Doppler intervient deux fois. b) En admettant $\Delta f \approx 2 f(E) v / c$, calcule la vitesse de la voiture en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ puis en $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$. c) Justifie la validité de l'approximation utilisée.

9. Bruit dans un atelier. Dans un atelier, chacune de trois machines identiques produit 85 dB à un poste de travail.

a) Calcule le niveau sonore au poste quand les trois machines fonctionnent. b) L'opérateur porte un casque qui apporte une atténuation de 20 dB. Quel niveau parvient à ses oreilles ? c) Combien de machines identiques faudrait-il pour atteindre 100 dB au poste ?

Niveau 3 : vers le PASS

10. Échographie Doppler. Une sonde émet des ultrasons de fréquence 4,0 MHz dans les tissus ($c = 1540 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Le faisceau fait un angle $\theta = 60^\circ$ avec l'axe d'une artère. Le décalage mesuré vaut $\Delta f = 1,3 \text{ kHz}$. On admet $\Delta f \approx 2 f(E) v \cos \theta / c$.

a) Calcule la vitesse du sang. b) Calcule la longueur d'onde des ultrasons dans les tissus. c) Le décalage mesuré est-il audible ? Justifie. d) Que mesurerait-on avec un faisceau perpendiculaire à l'artère ? Qu'en conclus-tu pour la pratique ?

11. Une galaxie qui s'éloigne. Dans le spectre d'une galaxie, une raie de l'hydrogène, de longueur d'onde 656,3 nm au laboratoire, est observée à 658,5 nm. On admet que, pour v très inférieure à c , $\Delta \lambda / \lambda \approx v / c$, avec $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

a) La galaxie se rapproche-t-elle ou s'éloigne-t-elle ? Justifie. b) Calcule sa vitesse. c) Vérifie que l'approximation est justifiée.

12. Profondeur d'exploration en échographie. Dans les tissus mous, l'atténuation des ultrasons par absorption vaut environ 0,5 dB par centimètre parcouru et par mégahertz de fréquence. L'onde fait l'aller et le retour entre la sonde et l'organe.

a) Calcule l'atténuation subie par un écho venant d'un organe situé à 5,0 cm de profondeur, à 4,0 MHz, puis le facteur de diminution de l'intensité. b) Même question à 10 MHz. c) L'appareil exploite des échos atténués de 60 dB au plus. Calcule la profondeur maximale explorable à 10 MHz puis à 3,0 MHz. d) Sachant que la résolution est d'autant meilleure que la longueur d'onde est petite, explique le choix de la fréquence selon l'organe examiné.

13. QCM. Indique pour chaque proposition si elle est vraie ou fausse, en justifiant.

A. Un niveau de 0 dB correspond à une absence totale de son. B. Passer de 50 dB à 70 dB revient à multiplier l'intensité sonore par 100. C. Deux sources produisant chacune 80 dB en un point produisent ensemble 160 dB. D. Une source qui s'éloigne d'un observateur fixe est perçue avec une fréquence plus faible que la fréquence émise. E. En échographie Doppler, le décalage est maximal quand le faisceau est perpendiculaire au vaisseau.

Corrigés

1. a) $I = I_0 \times 10^{L/10} = 1,0 \times 10^{-12} \times 10^6 = 1,0 \times 10^{-6} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

b) $L = 10 \log(I / I_0) = 10 \log(3,2 \times 10^{-5} / 1,0 \times 10^{-12}) = 10 \log(3,2 \times 10^7) = 10 \times (7 + \log 3,2) = 10 \times 7,51 \approx 75 \text{ dB}$.

2. $I = P / (4\pi r^2) = 0,10 / (4\pi \times 5,0^2) = 0,10 / 314 \approx 3,2 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. $L = 10 \log(3,2 \times 10^{-4} / 1,0 \times 10^{-12}) = 10 \log(3,2 \times 10^8) \approx 85 \text{ dB}$.
3. Une machine : $I_1 = I_0 \times 10^7 = 1,0 \times 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Deux machines : $I = 2 I_1$, donc $L = 70 + 10 \log 2 \approx 73 \text{ dB}$. Dix machines : $I = 10 I_1$, donc $L = 70 + 10 \log 10 = 80 \text{ dB}$. Le niveau n'est pas multiplié : on ajoute $10 \log N$.
4. $A = L_1 - L_2 = 85 - 45 = 40 \text{ dB}$. Comme $A = 10 \log(I_1 / I_2)$, $I_1 / I_2 = 10^{4,0} = 10^4$: le mur divise l'intensité par dix mille.
5. Rapprochement : $f(R) = f(E) \times c / (c - v) = 440 \times 340 / 310 \approx 483 \text{ Hz}$. Éloignement : $f(R) = 440 \times 340 / 370 \approx 404 \text{ Hz}$. Le son est plus aigu à l'approche et plus grave à l'éloignement, comme attendu.
6. a) Pour une source ponctuelle, $I = P / (4\pi r^2)$: si r double, I est divisée par 4. La variation de niveau vaut $10 \log(1/4) = -20 \log 2 \approx -6,0 \text{ dB}$.
- b) De 10 m à 40 m, la distance double deux fois : $L = 90 - 2 \times 6,0 = 78 \text{ dB}$ (calcul exact : $90 - 20 \log 4 = 90 - 12,0 = 78 \text{ dB}$). c) Il faut une atténuation de 30 dB, soit $20 \log(r / 10) = 30$, donc $\log(r / 10) = 1,5$ et $r = 10 \times 10^{1,5} \approx 10 \times 31,6 \approx 3,2 \times 10^2 \text{ m}$. d) L'absorption ajoute une atténuation à l'atténuation géométrique : le niveau de 60 dB est atteint **plus près**. La distance trouvée est donc **surestimée**.
7. a) Pendant une période $T(E)$, la crête émise au début a parcouru $c T(E)$, et l'émetteur s'est rapproché de $v T(E)$ dans le même sens. Distance entre deux crêtes : $\lambda(R) = (c - v) T(E)$.
- b) Les crêtes se propagent à la célérité c , le récepteur fixe les reçoit avec la période $T(R) = \lambda(R) / c$. Donc $f(R) = c / \lambda(R) = f(E) \times c / (c - v)$, et $\Delta f = f(R) - f(E) = f(E) \times v / (c - v)$. c) Si v est très inférieure à c , $c - v \approx c$, donc $\Delta f \approx f(E) \times v / c$. d) $v = 300 / 3,6 \approx 83,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Relation exacte : $f(R) = 500 \times 340 / (340 - 83,3) = 500 \times 340 / 256,7 \approx 662 \text{ Hz}$. Relation approchée : $f(R) \approx 500 \times (1 + 83,3 / 340) = 500 \times 1,245 \approx 623 \text{ Hz}$. L'écart est important (environ 40 Hz) car $v / c \approx 0,25$ n'est pas petit devant 1 : l'approximation n'est **pas valable** ici.
8. a) La voiture reçoit l'onde du radar en se déplaçant (récepteur mobile : premier décalage), puis la réfléchit comme une source en mouvement (émetteur mobile : second décalage). Les deux décalages s'ajoutent.
- b) $v = \Delta f \times c / (2 f(E)) = 4,02 \times 10^3 \times 3,00 \times 10^8 / (2 \times 24,125 \times 10^9) = 1,206 \times 10^{12} / 4,825 \times 10^{10} \approx 25,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, soit $25,0 \times 3,6 = 90,0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. c) $v / c = 25,0 / 3,00 \times 10^8 \approx 8 \times 10^{-8}$: la vitesse est extrêmement petite devant c , l'approximation est **parfaitement justifiée**.
9. a) Trois intensités égales s'additionnent : $L = 85 + 10 \log 3 = 85 + 4,8 \approx 89,8 \text{ dB}$.
- b) $L = 89,8 - 20 = 69,8 \text{ dB}$, soit environ 70 dB. c) Il faut $10 \log N = 100 - 85 = 15$, soit $N = 10^{1,5} \approx 31,6$. Le nombre de machines étant entier, il en faut 32.
10. a) $v = \Delta f \times c / (2 f(E) \cos \theta) = 1,3 \times 10^3 \times 1\,540 / (2 \times 4,0 \times 10^6 \times 0,50) = 2,00 \times 10^6 / 4,0 \times 10^6 \approx 0,50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

b) $\lambda = c / f = 1\,540 / 4,0 \times 10^6 \approx 3,9 \times 10^{-4} \text{ m}$, soit environ 0,39 mm. c) 1,3 kHz est compris entre 20 Hz et 20 kHz : le décalage est dans le **domaine audible**. L'appareil peut donc le restituer directement sous forme de son. d) Avec $\theta = 90^\circ$, $\cos \theta = 0$, donc $\Delta f = 0$: on ne mesure aucun décalage, quelle que soit la vitesse du sang. En pratique, on incline la sonde pour obtenir un angle nettement inférieur à 90° , et l'on doit connaître cet angle pour calculer v .

11. a) La longueur d'onde observée est plus grande (décalage vers le rouge), donc la fréquence reçue est plus faible : la galaxie **s'éloigne**.

b) $\Delta \lambda = 658,5 - 656,3 = 2,2 \text{ nm}$. $v \approx c \times \Delta \lambda / \lambda = 3,00 \times 10^8 \times 2,2 / 656,3 \approx 1,0 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, soit environ $1,0 \times 10^3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. c) $v / c = \Delta \lambda / \lambda \approx 3,4 \times 10^{-3}$, très petit devant 1 : l'approximation est **justifiée**.

12. a) Distance parcourue : $2 \times 5,0 = 10 \text{ cm}$. $A = 0,5 \times 4,0 \times 10 = 20 \text{ dB}$. L'intensité est divisée par $10^{2,0} = 100$.

b) $A = 0,5 \times 10 \times 10 = 50 \text{ dB}$; l'intensité est divisée par $10^{5,0} = 10^5$. c) Pour une profondeur d , $A = 0,5 \times f \times 2d$. À 10 MHz : $0,5 \times 10 \times 2d = 60$, donc $d = 6,0 \text{ cm}$. À 3,0 MHz : $0,5 \times 3,0 \times 2d = 60$, donc $d = 20 \text{ cm}$. d) Une fréquence élevée donne une petite longueur d'onde, donc une image plus fine, mais l'onde est vite absorbée : on la réserve aux **organes superficiels** (peau, thyroïde, vaisseaux du cou). Pour les **organes profonds** (abdomen), on choisit une fréquence plus basse, qui pénètre davantage au prix d'une résolution moins bonne.

13. A. **Faux**. 0 dB correspond à $I = I_0 = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, le seuil d'audibilité à 1 kHz, pas à une intensité nulle.

B. **Vrai**. Une hausse de 20 dB correspond à $10 \log(I_2 / I_1) = 20$, soit $I_2 / I_1 = 10^2 = 100$. C. **Faux**. Les intensités s'additionnent : l'intensité double et le niveau vaut $80 + 3 = 83 \text{ dB}$. D. **Vrai**. Pour un émetteur qui s'éloigne, $f(R) = f(E) \times c / (c + v)$, inférieure à $f(E)$: le son paraît plus grave. E. **Faux**. Le décalage est proportionnel à $\cos \theta$: il est nul quand le faisceau est perpendiculaire au vaisseau ($\theta = 90^\circ$) et maximal quand le faisceau est aligné avec l'écoulement.