

Ondes : son, diffraction, interférences, effet Doppler

Pourquoi la sirène d'une ambulance devient-elle plus grave au moment où elle te dépasse ? Et comment un radar peut-il mesurer ta vitesse sans te toucher ?

Ce que tu vas savoir faire

- Calculer une intensité sonore, un niveau d'intensité sonore en décibels et une atténuation
- Relier l'écart angulaire de diffraction à la longueur d'onde et à la taille de l'ouverture ($\theta = \lambda/a$)
- Établir les conditions d'interférences constructives et destructives à partir de la différence de marche
- Établir et exploiter l'interfrange $i = \lambda D/b$ des fentes d'Young
- Établir l'expression du décalage Doppler et l'exploiter pour mesurer une vitesse (son, radar, astronomie)
- Simuler avec Python la somme de deux signaux sinusoïdaux synchrones

À revoir avant de commencer

- Ondes mécaniques progressives, célérité, retard (1re)
- Ondes périodiques : période, fréquence, longueur d'onde $\lambda = v/f = vT$ (1re)
- Fonctions logarithme décimal et puissances de 10
- Conversions d'unités (nm, μm , km/h) et trigonométrie dans le triangle rectangle

1 Le cours

1. Le son : intensité et niveau d'intensité sonore

Au premier rang d'un concert, le son est « fort » ; au fond de la salle, moins. Ton oreille capte l'**énergie** transportée par l'onde, mesurée par l'**intensité sonore**. Elle perçoit des intensités de 10^{-12} à environ $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$: un facteur mille milliards ! D'où une échelle plus pratique, le **décibel**.

Définition – Intensité sonore

L'**intensité sonore** I est la puissance sonore reçue par unité de surface perpendiculaire à la direction de propagation :

$$I = \frac{P}{S} \quad I \text{ en } \text{W} \cdot \text{m}^{-2}, P \text{ en } \text{W}, S \text{ en } \text{m}^2.$$

L'**intensité sonore de référence** $I_0 = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ correspond au seuil d'audibilité de l'oreille humaine (à 1 kHz).

Relation – Niveau d'intensité sonore

$$L = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad \Longleftrightarrow \quad I = I_0 \times 10^{L/10}$$

L : niveau d'intensité sonore en **décibels (dB)** ; I et I_0 en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$; $\log$ est le logarithme décimal (touche **log** de la calculatrice). Au seuil d'audibilité, $I = I_0$ donc $L = 0$ dB.

Situation	L (dB)	I ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
Seuil d'audibilité	0	10^{-12}
Chuchotement	30	10^{-9}
Conversation	60	10^{-6}
Seuil de risque pour l'oreille	85	3×10^{-4}
Concert, seuil de douleur	110 à 120	10^{-1} à 1

À bien comprendre – Ce sont les intensités qui s'additionnent

Deux sources sonores (non cohérentes) :

$I_{\text{tot}} = I_1 + I_2$. Les **niveaux ne s'additionnent pas** ! À connaître :

- intensité multipliée par 2 : L augmente de $10 \log 2 \approx 3$ dB ;
- intensité multipliée par 10 : L augmente de 10 dB ; par 100 : de 20 dB.

Exemple résolu – Un, deux... dix scooters

Un scooter produit, à quelques mètres, un niveau sonore $L_1 = 80$ dB. Quel niveau mesure-t-on avec deux scooters identiques au même endroit ? Avec dix ?

Solution

Intensité d'un scooter : $I_1 = I_0 \times 10^{L_1/10} = 1,0 \times 10^{-12} \times 10^{8,0} = 1,0 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Deux scooters : $I_2 = 2I_1 = 2,0 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, donc $L_2 = 10 \log \left(\frac{2,0 \times 10^{-4}}{1,0 \times 10^{-12}} \right) = 83$ dB (et non 160 dB !).

Dix scooters : $I_{10} = 10I_1 = 1,0 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, donc $L_{10} = 10 \log (10^9) = 90$ dB.

2. L'atténuation d'un son

Définition – Atténuation

Quand le niveau sonore passe de L_1 à L_2 (en s'éloignant de la source ou en traversant un matériau), l'**atténuation** est $A = L_1 - L_2$ (A, L_1, L_2 en dB).

Atténuation géométrique

L'énergie émise se répartit sur une surface de plus en plus grande. Pour une source ponctuelle qui émet la puissance P (en W) uniformément dans toutes les directions, à la distance r (en m) :

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}.$$

Distance doublée : I divisée par 4, soit une atténuation de $10 \log 4 \approx 6$ dB. Exemple : pour $P = 0,10$ W, on trouve $L = 93$ dB à 2,0 m et 87 dB à 4,0 m.

Atténuation par absorption

Le milieu traversé (air, mur, laine de verre, bouchons d'oreilles...) **absorbe** une partie de l'énergie de l'onde, qui est convertie en énergie thermique.

Exemple : des bouchons d'oreilles d'atténuation $A = 25$ dB ramènent un concert à 105 dB à 80 dB dans le conduit auditif. Les sons aigus sont en général plus absorbés que les graves.

Au labo – Mesurer un niveau sonore et une atténuation

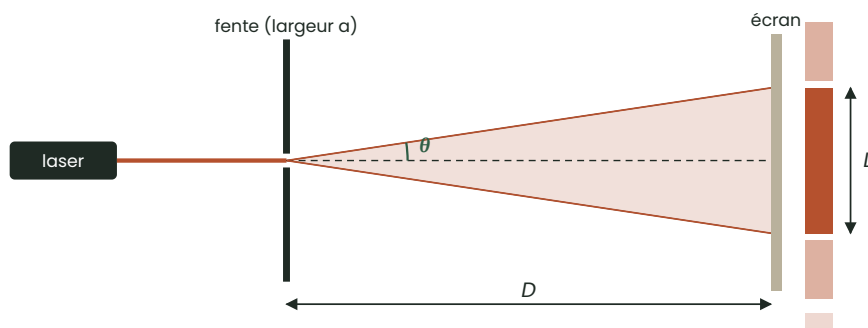
Un **sonomètre** face à un haut-parleur alimenté par un GBF (1 kHz) : chaque fois que la distance r double, L baisse d'environ 6 dB (loin des murs, qui réfléchissent le son). À distance fixe, on intercale des matériaux (carton, mousse...) : l'atténuation par absorption vaut $A = L_{\text{sans}} - L_{\text{avec}}$.

3. La diffraction

Tu entends quelqu'un parler dans le couloir sans le voir par la porte : le son « contourne » les obstacles. La lumière semble aller tout droit... sauf à travers une ouverture minuscule. Ce phénomène commun à **toutes les ondes** est la **diffraction**.

Définition – Diffraction

La **diffraction** est l'étalement des directions de propagation d'une onde lorsqu'elle rencontre une ouverture ou un obstacle. Elle est d'autant plus marquée que la dimension a de l'ouverture est **petite** ; elle est nettement visible quand a est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde λ (ou pas beaucoup plus grande). La diffraction ne modifie **ni la fréquence ni la longueur d'onde** de l'onde.



Diffraction d'un faisceau laser par une fente : une tache centrale large de L , entourée de taches moins lumineuses, perpendiculaires à la fente.

Relation – Écart angulaire de diffraction

Pour une fente (ou un fil) de largeur a , le **demi-angle** θ entre le centre de la tache centrale et la première extinction vérifie :

$$\theta = \frac{\lambda}{a} \quad \theta \text{ en radians (rad), } \lambda \text{ et } a \text{ dans la même unité (m).}$$

Relation valable pour des petits angles. Plus λ est grande ou plus l'ouverture est étroite, plus la diffraction est importante. Lorsque $a \gg \lambda$, θ est si petit que la diffraction est **négligeable** : l'onde se propage en ligne droite (optique géométrique).

Méthode – Relier la largeur L de la tache à λ

Dans le triangle rectangle de la figure : $\tan \theta = \frac{L/2}{D}$. Pour un angle petit (en radians), $\tan \theta \approx \theta$, donc $\theta \approx \frac{L}{2D}$. En égalant avec $\theta = \frac{\lambda}{a}$: $L = \frac{2\lambda D}{a}$ et $\lambda = \frac{aL}{2D}$.

Exemple résolu – Largeur de la tache centrale

Un laser rouge ($\lambda = 650 \text{ nm}$) éclaire une fente de largeur $a = 100 \text{ }\mu\text{m}$. L'écran est à $D = 2,00 \text{ m}$. Calculer θ puis L .

Solution

En mètres : $\lambda = 650 \times 10^{-9} \text{ m}$, $a = 100 \times 10^{-6} \text{ m}$. Donc $\theta = \frac{\lambda}{a} = \frac{650 \times 10^{-9}}{100 \times 10^{-6}} = 6,50 \times 10^{-3} \text{ rad}$ (angle petit : l'approximation est justifiée).

$$L = 2\theta D = 2 \times 6,50 \times 10^{-3} \times 2,00 = 2,60 \times 10^{-2} \text{ m} = 2,60 \text{ cm}.$$

Au labo – Mesurer λ par diffraction

On éclaire des fentes de largeurs a connues (de 40 à $120 \text{ }\mu\text{m}$) avec un laser et on mesure L à distance D fixée. Le tracé de L en fonction de $\frac{1}{a}$ donne une **droite passant par l'origine** de coefficient directeur $k = 2\lambda D$, d'où $\lambda = \frac{k}{2D}$. Un cheveu diffracte comme une fente de même largeur : la même droite permet de **mesurer son diamètre**.

Conséquences concrètes

- **Son** : pour une voix ($f \approx 300 \text{ Hz}$), $\lambda = v/f \approx 1 \text{ m}$, comparable à une porte : le son contourne les obstacles, les graves mieux que les aigus.
- **Optique** : la diffraction par l'ouverture d'un télescope limite la finesse des détails visibles : plus le miroir est grand, meilleure est la résolution.

4. Les interférences

Lance deux cailloux en même temps dans une mare : là où les ondes se croisent, certains endroits s'agitent beaucoup, d'autres restent presque immobiles. Les casques « antibruit actif » utilisent la même idée : ils émettent un son qui **annule** le bruit extérieur. C'est le phénomène d'**interférences**.

Définition – Interférences

Deux ondes qui se superposent en un même point **interfèrent** : l'amplitude de l'onde résultante peut être plus grande (**interférences constructives**) ou plus petite (**interférences destructives**) que celle de chaque onde.

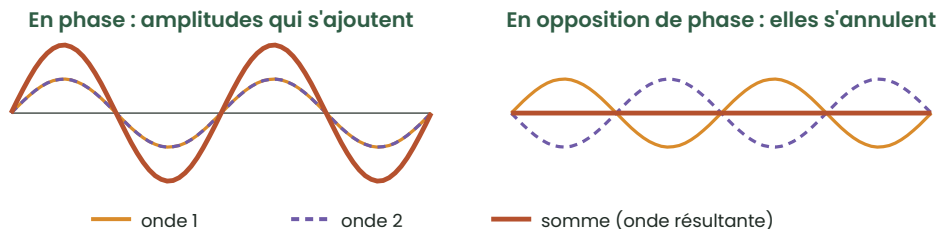
Conditions d'observation : les deux ondes doivent avoir la **même fréquence** et un **déphasage constant** dans le temps (on dit que les sources sont **cohérentes**). En optique, on l'obtient en divisant la lumière d'une même source (laser) en deux faisceaux.

Définition – Différence de marche

Deux sources S_1 et S_2 émettent en phase. Un point M est à la distance $d_1 = S_1M$ de S_1 et $d_2 = S_2M$ de S_2 . La **différence de marche** en M est :

$$\delta = d_2 - d_1 \quad \delta, d_1, d_2 \text{ en m.}$$

Pour la lumière : **différence de chemin optique** (dans l'air, égale à $d_2 - d_1$).



Superposition de deux ondes de même fréquence et de même amplitude : amplitude doublée (constructive) ou nulle (destructive).

Conditions d'interférences constructives et destructives À SAVOIR ÉTABLIR

Émises en phase, les deux ondes parcourent des distances différentes : l'onde issue de S_2 arrive en M avec un **retard** $\tau = \frac{\delta}{v}$ sur celle issue de S_1 (v : célérité, milieu homogène).

- Si ce retard est un nombre entier de périodes, $\tau = kT$, les deux ondes arrivent **en phase** : leurs amplitudes s'ajoutent. Comme $\delta = v\tau = kvT = k\lambda$:

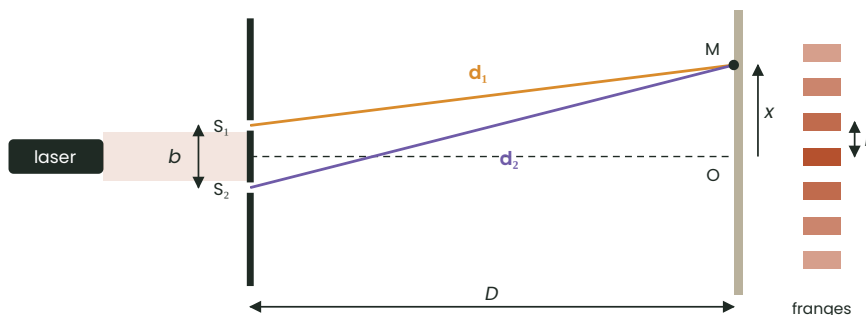
interférences constructives : $\delta = k\lambda, \quad k \in \mathbb{Z}$.

- Si le retard vaut un nombre entier de périodes plus une demi-période, $\tau = (k + \frac{1}{2})T$, elles arrivent **en opposition de phase** : elles s'annulent (si elles ont même amplitude). Alors :

interférences destructives : $\delta = (k + \frac{1}{2})\lambda, \quad k \in \mathbb{Z}$.

5. L'expérience des fentes d'Young

En 1801, Thomas Young fait passer la lumière par deux fentes fines et proches : sur l'écran apparaissent des **franges** alternativement brillantes et sombres, preuve du caractère **ondulatoire** de la lumière.



Fentes d'Young : deux fentes distantes de b éclairées par le même laser, écran à la distance $D \gg b$. Les franges sont équidistantes.

Position des franges et interfrange À SAVOIR ÉTABLIR

L'expression de la différence de chemin optique au point M d'abscisse x est **donnée** (elle est valable si $D \gg b$ et $D \gg x$) : $\delta = \frac{bx}{D}$.

Franges brillantes (constructives) : $\delta = k\lambda \iff \frac{bx}{D} = k\lambda \iff x_k = k \frac{\lambda D}{b}$.

Franges sombres (destructives) : $\delta = (k + \frac{1}{2})\lambda \iff x = (k + \frac{1}{2}) \frac{\lambda D}{b}$: elles sont à mi-chemin entre deux franges brillantes.

L'**interfrange** i est la distance entre les centres de deux franges brillantes (ou sombres)

consécutives : $i = x_{k+1} - x_k = (k+1) \frac{\lambda D}{b} - k \frac{\lambda D}{b}$, soit $i = \frac{\lambda D}{b}$ (i, λ, D, b en m).

Exemple résolu – Mesurer une longueur d'onde avec les fentes d'Young

Deux fentes distantes de $b = 0,40$ mm sont éclairées par un laser. Sur un écran à $D = 2,00$ m, la distance entre les centres de la 1^{re} et de la 11^e frange brillante est 3,2 cm. Déterminer λ .

Solution

Entre la 1^{re} et la 11^e frange brillante, il y a 10 interfranges (et non 11 !) : $10 i = 3,2$ cm, donc $i = 3,2 \times 10^{-3}$ m. Mesurer plusieurs interfranges d'un coup rend la mesure plus précise.

$$i = \frac{\lambda D}{b} \iff \lambda = \frac{i b}{D} = \frac{3,2 \times 10^{-3} \times 0,40 \times 10^{-3}}{2,00} = 6,4 \times 10^{-7} \text{ m} = 640 \text{ nm (rouge)}.$$

Au labo – Interférences d'ultrasons

Deux émetteurs d'ultrasons (40 kHz) branchés sur le **même** GBF (donc en phase) ; un récepteur relié à un oscilloscope, déplacé parallèlement aux émetteurs, détecte des **maxima** et des **minima** d'amplitude. Aux maxima, $d_2 - d_1$ est un multiple de $\lambda = v/f \approx 8,5$ mm. Un émetteur débranché : plus de minima.

Des interférences partout : bulles de savon irisées, traitements antireflet, casques antibruit, détection des ondes gravitationnelles (LIGO, Virgo).

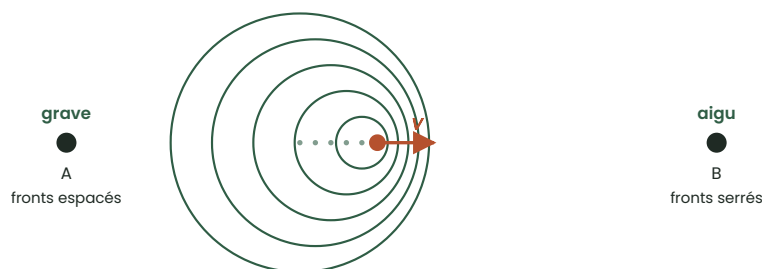
6. L'effet Doppler

Une ambulance passe, sirène hurlante : le son est plus **aigu** quand elle s'approche, puis brutalement plus **grave** quand elle s'éloigne. Pourtant, la sirène émet toujours la même fréquence : c'est l'**effet Doppler**.

Définition – Effet Doppler et décalage Doppler

L'**effet Doppler** est la modification de la fréquence f_R perçue par un récepteur lorsque l'émetteur (de fréquence f_E) et le récepteur sont en mouvement l'un par rapport à l'autre. Le **décalage Doppler** est $\Delta f = f_R - f_E$ (en Hz).

- Émetteur qui **se rapproche** : $f_R > f_E$, le son perçu est plus aigu ($\Delta f > 0$).
- Émetteur qui **s'éloigne** : $f_R < f_E$, le son perçu est plus grave ($\Delta f < 0$).



Fronts d'onde émis à des instants successifs par la source rouge en mouvement (les petits points marquent sa position à chaque émission) : resserrés devant la source.

Expression du décalage Doppler (émetteur mobile, récepteur fixe)

À SAVOIR ÉTABLIR

Un émetteur se déplace à la vitesse v en ligne droite **vers** un récepteur fixe. Il émet une onde de période T_E (fréquence f_E) qui se propage à la célérité c .

- À $t = 0$, il émet un « bip » (une crête). Ce bip parcourt la distance $c T_E$ pendant une période.
- À $t = T_E$, il émet le bip suivant, mais il a avancé de $v T_E$ vers le récepteur.
- La distance entre deux bips successifs, c'est-à-dire la longueur d'onde perçue, est donc : $\lambda_R = c T_E - v T_E = (c - v) T_E$.
- Le récepteur fixe reçoit ces bips à la célérité c : $T_R = \frac{\lambda_R}{c} = \frac{(c - v) T_E}{c}$.

Comme $f = \frac{1}{T}$ (et de même en éloignement, en changeant v en $-v$) :

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

$$\text{Décalage (rapprochement)} : \Delta f = f_R - f_E = f_E \left(\frac{c}{c - v} - 1 \right) = f_E \frac{v}{c - v}.$$

Relation – Décalage Doppler lorsque $v \ll c$

$$|\Delta f| \approx f_E \frac{v}{c} \quad \text{et} \quad \frac{|\Delta \lambda|}{\lambda_E} \approx \frac{v}{c} \quad \Delta f, f_E \text{ en Hz} ; v, c \text{ en m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

En astronomie on raisonne sur les longueurs d'onde : source qui s'éloigne, $\lambda_R = (c + v) T_E = \lambda_E \left(1 + \frac{v}{c} \right)$: raies décalées vers le **rouge** ; source qui se rapproche : vers le **bleu**.

Exemple résolu – La sirène d'une ambulance

Une sirène émet un son de fréquence $f_E = 680 \text{ Hz}$. L'ambulance roule à $90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Célérité du son : $c = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Quelles fréquences perçoit un piéton immobile ?

Solution

$$\text{Conversion : } v = \frac{90}{3,6} = 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

$$\text{Ambulance qui s'approche : } f_R = f_E \frac{c}{c - v} = 680 \times \frac{340}{340 - 25} = 734 \text{ Hz}.$$

$$\text{Ambulance qui s'éloigne : } f'_R = f_E \frac{c}{c + v} = 680 \times \frac{340}{340 + 25} = 633 \text{ Hz}.$$

Le son « baisse » d'environ 100 Hz au passage. (La formule approchée $\Delta f \approx f_E v / c = 50 \text{ Hz}$ donnerait 730 et 630 Hz : écart faible car $v/c \approx 0,07$.)

Méthode – Mesurer une vitesse par effet

Doppler

1. Mesurer f_E (source immobile) et f_R (source en mouvement) : micro et analyse spectrale.
2. Sens du mouvement : $f_R > f_E$ si la source se rapproche.
3. Isoler v à partir de $f_R(c - v) = f_E c$:

$$v = c \frac{f_R - f_E}{f_R}.$$

4. Vérifier que v est vraisemblable.

Au labo : un émetteur d'ultrasons (40 kHz) sur un chariot se rapproche d'un récepteur fixe ; on compare la vitesse obtenue à celle d'une chronophotographie.

Applications

- **Radars routiers :** onde réfléchie par le véhicule ; le décalage est environ doublé (le véhicule est récepteur puis émetteur mobile).
- **Échographie Doppler :** vitesse du sang (ultrasons réfléchis par les globules rouges).
- **Astrophysique :** raies d'un astre qui s'éloigne décalées vers le rouge (*redshift*) : vitesse radiale des étoiles, détection d'exoplanètes, expansion de l'Univers.

2 Les pièges à éviter

Attention – Les erreurs classiques

- **Additionner des décibels.** Deux sources de 60 dB ne font pas 120 dB mais 63 dB : on additionne les **intensités**, puis on recalcule L .
- **Confondre log et ln.** Le niveau sonore utilise le logarithme **décimal** : $I = I_0 \times 10^{L/10}$, jamais $e^{L/10}$.
- **Oublier de convertir.** Dans $\theta = \lambda/a$ et $i = \lambda D/b$, toutes les longueurs dans la même unité (le mètre) : $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$, $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$, $1 \text{ mm} = 10^{-3} \text{ m}$. Et θ est en **radians**, pas en degrés.
- **Confondre L et $L/2$.** θ est un **demi-angle** : $\theta \approx \frac{L}{2D}$ où L est la largeur **totale** de la tache centrale.
- **Compter les franges au lieu des interfranges.** Entre n franges brillantes consécutives, il y a $n - 1$ interfranges.
- **Inverser le sens de l'effet Doppler.** Rapprochement : fréquence perçue **plus grande** (son plus aigu, lumière décalée vers le bleu), longueur d'onde plus petite. Éloignement : l'inverse. Et on convertit les $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (diviser par 3,6).

3 Avec Python

Superposition de deux signaux synchrones de même amplitude A , le second déphasé de φ : quelle est l'amplitude de la somme ?

Python

```
import numpy as np

A = 1.0          # amplitude de chaque signal (unité arbitraire)
f = 440          # fréquence commune en Hz (signaux synchrones)
t = np.linspace(0, 2/f, 2001)    # deux périodes, 2001 instants

for phi_deg in [0, 60, 90, 120, 180]:
    phi = np.radians(phi_deg)      # déphasage en radians
    s1 = A*np.cos(2*np.pi*f*t)    # signal 1
    s2 = A*np.cos(2*np.pi*f*t + phi) # signal 2, déphasé de phi
    s = s1 + s2                    # superposition
    Amax = np.max(np.abs(s))        # amplitude de la somme
    print(f"phi = {phi_deg:3d}° amplitude de s1+s2 = {Amax:.2f}")
# Pour tracer : import matplotlib.pyplot as plt ; plt.plot(t, s1, t, s2, t, s)

# Affichage obtenu :
# phi = 0° amplitude de s1+s2 = 2.00
# phi = 60° amplitude de s1+s2 = 1.73
# phi = 90° amplitude de s1+s2 = 1.41
# phi = 120° amplitude de s1+s2 = 1.00
# phi = 180° amplitude de s1+s2 = 0.00
```

Amplitude $2A$ **en phase** ($\varphi = 0$: constructives), nulle en **opposition de phase** ($\varphi = 180^\circ$: destructives), $2A \left| \cos \frac{\varphi}{2} \right|$ entre les deux.

4 Exercices

Exercice 1 – Deux machines dans un atelier ★

Donnée : $I_0 = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Une machine produit, au poste de travail, un niveau sonore $L = 65 \text{ dB}$.

1. Calculer l'intensité sonore correspondante.
2. On met en marche une seconde machine identique. Calculer le nouveau niveau sonore.
3. Un casque de protection a une atténuation de 20 dB. Quel niveau perçoit l'ouvrier casqué avec les deux machines en marche ?

Exercice 2 – Mesurer la largeur d'une fente ★

Un laser hélium-néon ($\lambda = 633 \text{ nm}$) éclaire une fente de largeur a inconnue. Sur un écran placé à $D = 1,50 \text{ m}$, la tache centrale mesure $L = 3,8 \text{ cm}$.

1. Faire un schéma et exprimer θ en fonction de L et D (angle petit).
2. En déduire la largeur a de la fente.
3. Comment évolue L si on remplace le laser par un laser vert ($\lambda = 532 \text{ nm}$) ? Justifier.

Exercice 3 – Interférences d'ultrasons et de lumière ★★

A. Deux émetteurs d'ultrasons S_1 et S_2 émettent en phase une onde de longueur d'onde $\lambda = 8,5 \text{ mm}$. Un point M est tel que $S_1M = 20,00 \text{ cm}$ et $S_2M = 22,55 \text{ cm}$; un point N est tel que $S_1N = 20,00 \text{ cm}$ et $S_2N = 21,275 \text{ cm}$.

1. Calculer la différence de marche en M puis en N .
2. Quelle est la nature des interférences en M ? en N ?

B. Une lampe à vapeur de sodium filtrée ($\lambda = 589 \text{ nm}$) éclaire des fentes d'Young distantes de $b = 0,30 \text{ mm}$; l'écran est à $D = 1,20 \text{ m}$.

3. Calculer l'interfrange.
4. Comment varie l'interfrange si on rapproche les fentes ? si on recule l'écran ?

Exercice 4 – Au bord du circuit ★★

Au bord d'une ligne droite, un spectateur perçoit le bruit d'une voiture de course à la fréquence $f_1 = 1\,100 \text{ Hz}$ quand elle s'approche et $f_2 = 900 \text{ Hz}$ quand elle s'éloigne. On prend $c = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

1. Écrire f_1 et f_2 en fonction de la fréquence émise f_E , de c et de la vitesse v de la voiture.
2. Montrer que $v = c \frac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2}$ et calculer v en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ puis en $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$.
3. En déduire la fréquence f_E du son émis par le moteur.

Exercice 5 – Radar, bruit et mur antibruit (type bac) ★★★

Document 1 – Le cinémomètre radar. Un radar fixe émet une onde électromagnétique de fréquence $f_E = 24,125 \text{ GHz}$ vers les véhicules qui s'approchent, avec un angle $\alpha = 25^\circ$ par rapport à la route. L'onde réfléchie revient au radar avec la fréquence f_R . Pour $v \ll c$: $\Delta f = f_R - f_E = 2f_E v \cos \alpha / c$, avec $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Document 2 – Réglementation. Vitesse limitée à $90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Pour une vitesse mesurée inférieure à $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, on retranche une marge technique de $5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

Document 3 – Les riverains. À 10 m de la route, un camion (modélisé par une source ponctuelle rayonnant uniformément) produit un niveau sonore de 72 dB . Un mur antibruit de 3 m de haut est à l'étude. Son dans l'air : $v_{\text{son}} = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $I_0 = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

1. Pourquoi la fréquence de l'onde reçue par le radar est-elle différente de celle émise ? Quel est le signe de Δf pour un véhicule qui s'approche ?
2. Le radar mesure $\Delta f = 3,90 \text{ kHz}$. Calculer la vitesse du véhicule en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ puis en $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$. Le conducteur est-il en infraction ?
3. Vérifier que l'hypothèse $v \ll c$ est justifiée.
4. Calculer l'intensité sonore reçue à 10 m du camion. Quel niveau sonore mesure un riverain situé à 40 m ?
5. Combien de camions identiques faut-il au minimum, passant en même temps à 10 m , pour dépasser 80 dB ?
6. Le mur atténue fortement les sons aigus ($f = 4\,000 \text{ Hz}$) mais beaucoup moins le grondement grave du moteur ($f = 100 \text{ Hz}$). Expliquer ce constat à l'aide de la diffraction, en calculant les longueurs d'onde.

5 Teste-toi (QCM)

- 1 Un son de 70 dB s'ajoute à un autre son identique de 70 dB. Le niveau total est :
A. 70 dB **B.** 73 dB **C.** 80 dB **D.** 140 dB
- 2 En s'éloignant d'une source ponctuelle, on passe de r à $2r$. Le niveau sonore :
A. diminue de 3 dB **B.** est divisé par 2
C. diminue d'environ 6 dB **D.** est divisé par 4
- 3 La diffraction d'une onde par une fente est d'autant plus marquée que :
A. la fente est large **B.** la longueur d'onde est petite
C. la fente est étroite **D.** l'onde est intense
- 4 Deux sources en phase ; en un point, $\delta = 2,5 \lambda$. Les interférences y sont :
A. constructives **B.** destructives **C.** impossibles à prévoir **D.** constructives si λ est petite
- 5 Dans l'expérience des fentes d'Young, si on double la distance b entre les fentes :
A. l'interfrange double **B.** l'interfrange est divisé par 2
C. l'interfrange ne change pas **D.** les franges disparaissent
- 6 Une étoile s'éloigne de la Terre. Les raies de son spectre sont :
A. décalées vers le rouge **B.** décalées vers le bleu
C. non décalées **D.** élargies mais non décalées

L'essentiel à retenir

- $I = \frac{P}{S} \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2}\text{)} ; L = 10 \log \frac{I}{I_0} \text{ (dB)}, I = I_0 \times 10^{L/10}, I_0 = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$
- Les intensités s'additionnent, pas les niveaux :
 $I \times 2 \Rightarrow +3 \text{ dB} ; I \times 10 \Rightarrow +10 \text{ dB}.$
- Atténuation $A = L_1 - L_2 \text{ (dB)}$, par absorption ou géométrique : $I = \frac{P}{4\pi r^2}$, soit -6 dB quand r double.
- Diffraction : $\theta = \frac{\lambda}{a}$ (θ en rad), notable si a est de l'ordre de λ ; $L = \frac{2\lambda D}{a}.$
- Interférences (même fréquence, déphasage constant) : constructives si $\delta = k\lambda$, destructives si $\delta = (k + \frac{1}{2}) \lambda.$
- Fentes d'Young : $\delta = \frac{bx}{D}$; interfrange $i = \frac{\lambda D}{b}.$
- Doppler, émetteur qui se rapproche : $f_R = \frac{f_E c}{c - v}$ (plus aigu, vers le bleu) ; qui s'éloigne : $f_R = \frac{f_E c}{c + v}$ (plus grave, vers le rouge).
- Pour $v \ll c$: $|\Delta f| \approx f_E \frac{v}{c}$ et $\frac{|\Delta \lambda|}{\lambda} \approx \frac{v}{c}.$

6 Corrigés

Exercice 1

- $I = I_0 \times 10^{L/10} = 1,0 \times 10^{-12} \times 10^{6,5} = 3,2 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.
- Les intensités s'ajoutent : $I' = 2I = 6,3 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, d'où $L' = 10 \log \left(\frac{6,3 \times 10^{-6}}{1,0 \times 10^{-12}} \right) = 68 \text{ dB}$ (soit +3 dB).
- $L'' = L' - A = 68 - 20 = 48 \text{ dB}$.

Exercice 2

- Le demi-angle θ a pour côté opposé $L/2$ et pour côté adjacent D : $\tan \theta = \frac{L}{2D}$, et pour un angle petit $\theta \approx \frac{L}{2D}$.
- $\frac{\lambda}{a} = \frac{L}{2D} \iff a = \frac{2\lambda D}{L} = \frac{2 \times 633 \times 10^{-9} \times 1,50}{3,8 \times 10^{-2}} = 5,0 \times 10^{-5} \text{ m} = 50 \mu\text{m}$.
- $L = \frac{2\lambda D}{a}$ est proportionnelle à λ : avec λ plus petite, la tache centrale est **plus étroite** ($L' = 3,8 \times \frac{532}{633} \approx 3,2 \text{ cm}$).

Exercice 3

- $\delta_M = 22,55 - 20,00 = 2,55 \text{ cm}$; $\delta_N = 21,275 - 20,00 = 1,275 \text{ cm}$.
- $\frac{\delta_M}{\lambda} = \frac{2,55}{0,85} = 3,0$; $\delta_M = 3\lambda$, interférences **constructives** en M . $\frac{\delta_N}{\lambda} = \frac{1,275}{0,85} = 1,5$; $\delta_N = (1 + \frac{1}{2})\lambda$, interférences **destructives** en N .
- $i = \frac{\lambda D}{b} = \frac{589 \times 10^{-9} \times 1,20}{0,30 \times 10^{-3}} = 2,4 \times 10^{-3} \text{ m} = 2,4 \text{ mm}$.
- i est inversement proportionnel à b : si on rapproche les fentes (b diminue), l'interfrange **augmente**. i est proportionnel à D : si on recule l'écran, l'interfrange **augmente**.

Exercice 4

- Approche : $f_1 = f_E \frac{c}{c-v}$; éloignement : $f_2 = f_E \frac{c}{c+v}$.
- En divisant : $\frac{f_1}{f_2} = \frac{c+v}{c-v}$, donc $f_1(c-v) = f_2(c+v) \iff c(f_1 - f_2) = v(f_1 + f_2) \iff v = c \frac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2}$.
 $v = 340 \times \frac{1\,100 - 900}{1\,100 + 900} = 34,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, soit $34,0 \times 3,6 = 122 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.
- $f_E = f_1 \frac{c-v}{c} = 1\,100 \times \frac{340 - 34,0}{340} = 990 \text{ Hz}$. Vérification : $990 \times \frac{340}{374} = 900 \text{ Hz}$.

Exercice 5

- Le véhicule est en mouvement par rapport au radar : c'est l'**effet Doppler**. Le véhicule se rapproche, donc la fréquence reçue est plus grande : $\Delta f > 0$.
- $v = \frac{c \Delta f}{2f_E \cos \alpha} = \frac{3,00 \times 10^8 \times 3,90 \times 10^3}{2 \times 24,125 \times 10^9 \times \cos 25^\circ} = 26,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, soit $26,8 \times 3,6 = 96,3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Vitesse retenue : $96,3 - 5 \approx 91 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} > 90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$: le conducteur est (de peu) en infraction.

3. $\frac{v}{c} = \frac{26,8}{3,00 \times 10^8} \approx 9 \times 10^{-8} \ll 1$: l'hypothèse est largement justifiée.

4. $I_{10} = I_0 \times 10^{7,2} = 1,6 \times 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Pour une source ponctuelle, $I = \frac{P}{4\pi r^2}$ est inversement proportionnelle à r^2 : à 40 m (distance $\times 4$), $I_{40} = \frac{I_{10}}{16} = 9,9 \times 10^{-7} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, d'où $L_{40} = 72 - 10 \log 16 = 72 - 12 = 60 \text{ dB}$.

5. 80 dB correspond à $I = 1,0 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Il faut $n I_{10} > 1,0 \times 10^{-4}$, soit $n > \frac{1,0 \times 10^{-4}}{1,58 \times 10^{-5}} = 6,3$. Il faut donc au moins **7 camions** (avec 6 camions : $L = 72 + 10 \log 6 = 79,8 \text{ dB}$; avec 7 : 80,5 dB).

6. $\lambda = \frac{v_{\text{son}}}{f}$. Aigu : $\lambda = \frac{340}{4000} = 8,5 \times 10^{-2} \text{ m} = 8,5 \text{ cm}$, très petite devant la hauteur du mur (3 m) : la diffraction par le sommet du mur est faible, le son est bien arrêté. Grave : $\lambda = \frac{340}{100} = 3,4 \text{ m}$, du même ordre que la hauteur du mur : le son est fortement **diffracté** et « contourne » le mur pour atteindre les riverains.

QCM

1. **B** : intensité doublée, $+10 \log 2 \approx 3 \text{ dB}$. · 2. **C** : I divisée par 4, $-10 \log 4 \approx 6 \text{ dB}$. · 3. **C** : $\theta = \lambda/a$ augmente quand a diminue. · 4. **B** : $2,5\lambda = (2 + \frac{1}{2})\lambda$. · 5. **B** : $i = \lambda D/b$ est inversement proportionnel à b . · 6. **A** : éloignement, λ reçue plus grande.