ONDES SONORES
EFFET DOPPLER

5 Utiliser le logarithme décimal

CORRIGÉ

1. Établir l'expression de l'intensité sonore en fonction du niveau d'intensité sonore.

2. Recopier et compléter sans calculatrice ce tableau.

$I\,(\mathrm{W \cdot m^{-2}})$	L (dB)
1×10^{-5}	
2×10^{-5}	
	60

Utiliser le réflexe 1

Données

- $L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$.
- $I_0 = 1{,}0 \times 10^{-12}\ \mathrm{W \cdot m^{-2}}$.
- $\log(2) = 0{,}3$.

5 CORRIGÉ **Côté maths**

Utiliser le logarithme décimal

1. On a $L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$ soit $\log\left(\frac{I}{I_0}\right) = \frac{L}{10}$.

D'où $\frac{I}{I_0} = 10^{\frac{L}{10}}$; l'intensité sonore a donc pour expression $I = I_0 \times 10^{\frac{L}{10}}$.

2. On obtient :

$I\,(\mathrm{W \cdot m^{-2}})$	L (dB)
1×10^{-5}	**70**
2×10^{-5}	**73**
$\mathbf{1 \times 10^{-6}}$	60

7 Exploiter une atténuation

| Rédiger une explication.

Casque antibruit
$A = 33$ dB
DELTAPLUS®

Bouchons d'oreilles
$A = 26$ dB

- Quel sera le niveau d'intensité sonore ressenti par un utilisateur de chacun de ces dispositifs si le niveau d'intensité sonore ambiant est 95 dB ?

7 Exploiter une atténuation

Avec le casque antibruit, le niveau d'intensité sonore ressenti devient :

$L = 95$ dB $- 33$ dB $= 62$ dB.

Avec les bouchons d'oreilles, le niveau d'intensité sonore ressenti devient :

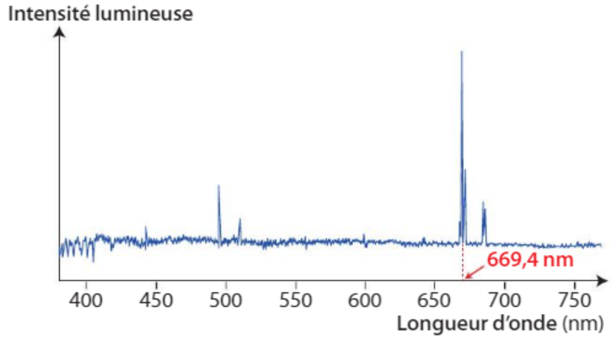
$L = 95$ dB $- 26$ dB $= 69$ dB.

10 Exploiter qualitativement l'effet Doppler

CORRIGÉ

| Interpréter des observations.

Le spectre de la lumière d'une étoile montre une raie de longueur d'onde égale à 669,4 nm.



Avec une source et un capteur immobiles sur Terre, cette raie a une longueur d'onde égale à 656,3 nm.

- Interpréter cette observation. Utiliser le réflexe 3

10 Exploiter qualitativement l'effet Doppler

On a $\lambda_R = 669{,}4$ nm et $\lambda_E = 656{,}3$ nm.

On observe l'effet Doppler :

- $\lambda_R \neq \lambda_E$ donc l'étoile est en mouvement par rapport à la Terre ;
- $\lambda_R > \lambda_E$ donc l'étoile s'éloigne de la Terre.

13 Identifier une expression (2)

| Discuter une formule.

Une étoile s'approche de la Terre avec une vitesse de valeur v telle que $0 < v < c$. Le spectre de la lumière de cette étoile comporte une raie de longueur d'onde λ. La même raie obtenue avec une source et un capteur immobiles sur Terre a une longueur d'onde λ_0.

- Parmi les relations ci-dessous, identifier celle qui donne la valeur de la vitesse de l'étoile par rapport à la Terre en expliquant pourquoi les deux autres sont incorrectes.

a $v = c \times \frac{\lambda_0}{\lambda_0 - \lambda}$ b $v = c \times \frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda_0}$ c $v = c \times \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$

13 Identifier une expression (2)

L'étoile se rapproche de la Terre ; on a donc $f_R > f_E$, ce qui est équivalent à $\lambda_R < \lambda_E$.

Dans l'énoncé, la longueur d'onde de l'onde émise est notée λ_0. Celle de l'onde reçue est notée λ. Avec ces notations, on a donc $\lambda < \lambda_0$.

- Relation a : Comme $\lambda > 0$, il vient $\lambda_0 - \lambda < \lambda_0$.

De plus, comme $\lambda < \lambda_0$ il vient $\lambda_0 - \lambda > 0$.

Et $\lambda_0 > 0$. Donc $\frac{\lambda_0}{\lambda_0 - \lambda} > 1$.

Donc $c \times \frac{\lambda_0}{\lambda_0 - \lambda} > c$ car $c > 0$.

Or $v < c$, donc la relation a n'est pas correcte.

- Relation b : Comme $\lambda < \lambda_0$ et $\lambda > 0$, il vient :

$0 < \lambda_0 - \lambda < \lambda_0$.

Donc $0 < \frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda_0} < 1$.

Donc $0 < c \times \frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda_0} < c$ car $c > 0$.

Or $0 < v < c$, donc la relation b est correcte.

• Relation c : Comme $\lambda < \lambda_0$, il vient $\lambda - \lambda_0 < 0$.

Et $\lambda_0 > 0$. Donc $\dfrac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} < 0$.

Donc $c \times \dfrac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} < 0$ car $c > 0$.

Or $v > 0$, donc la relation c n'est pas correcte.

14 Calculer une valeur de vitesse

CORRIGÉ

| Effectuer des calculs.

A Fonctionnement d'un radar

1 Le radar a émis une onde de fréquence $f_E = 3{,}40 \times 10^{10}$ Hz.

2 Après réflexion sur le véhicule, l'onde est revenue vers le radar.

3 Le radar a mesuré la fréquence f_R de l'onde réfléchie et a exploité le décalage Doppler $\Delta f = f_R - f_E$ pour déterminer la valeur de la vitesse du véhicule.

Lors du passage d'une voiture, le radar a mesuré un décalage Doppler $\Delta f = 6{,}451 \times 10^3$ Hz. Pour ce radar, le décalage Doppler est :

$$\Delta f = \frac{2v \times \cos\alpha}{c} \times f_E$$

Dans cette expression, α est l'angle entre la direction de déplacement du véhicule et l'axe de visée du radar.

• Calculer la valeur de la vitesse du véhicule.

Utiliser le réflexe 4

Données

• Célérité de la lumière : $c = 3{,}00 \times 10^8$ m·s^{-1}.
• $\alpha = 20°$.

14 Calculer une valeur de vitesse

La valeur de la vitesse du véhicule est donnée par :

$$v = \frac{c \times \Delta f}{2 \times \cos\alpha \times f_E}.$$

$$\text{Donc } v = \frac{3{,}00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \times 6{,}451 \times 10^3 \text{ Hz}}{2 \times \cos(20°) \times 3{,}40 \times 10^{10} \text{ Hz}}$$

soit $v = 30$ m·s^{-1}.

15 Calculer un décalage Doppler

| Utiliser un modèle pour prévoir.

Une voiture passe en klaxonnant. Le son produit a une fréquence $f_E = 435$ Hz. Elle s'éloigne d'un piéton avec une vitesse de valeur $v = 80$ km·h^{-1}.

Dans une telle situation, la valeur du décalage Doppler est donnée par :

$$\Delta f = -f_E \times \frac{v}{v_{son} + v}$$

• Calculer le décalage Doppler perçu par le piéton.

Donnée

Célérité du son : $v_{son} = 345$ m·s^{-1}.

15 Calculer un décalage Doppler

Erratum : erreur dans le spécimen corrigé dans le manuel de l'élève. Dans une telle situation, la valeur du décalage Doppler est donnée par :

$$\Delta f = -f_E \times \frac{v}{v_{son} + v}.$$

$$\text{Soit } \Delta f = -435 \text{ Hz} \times \frac{80 \times \dfrac{10^3}{3600} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}}{345 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} + 80 \times \dfrac{10^3}{3600} \text{m}\cdot\text{s}^{-1}}$$

D'où $\Delta f = -26$ Hz.

16 Avant le spectacle

| Effectuer des calculs.

Des mesures réalisées pendant un concert de trois guitaristes sont rassemblées ci-dessous :

	Intensité sonore I (W·m^{-2})	Niveau sonore L (dB)
Guitariste 1	$1{,}0 \times 10^{-4}$	
Guitariste 2		70
Guitariste 3		
Guitaristes 1 et 3		83

1. Compléter le tableau.

2. Que deviennent l'intensité sonore et le niveau d'intensité sonore si les trois guitaristes jouent en même temps ?

Donnée

Intensité sonore de référence : $I_0 = 1{,}0 \times 10^{-12}$ W·m^{-2}.

16 Avant le spectacle

1.

	Intensité sonore I (W·m^{-2})	Niveau sonore L (dB)
Guitariste 1	$1{,}0 \times 10^{-4}$	**80**
Guitariste 2	**$1{,}0 \times 10^{-5}$**	70
Guitariste 3	**$1{,}0 \times 10^{-4}$**	**80**
Guitariste 1 et 3	**$2{,}0 \times 10^{-4}$**	83

2. Les intensités sonores s'ajoutent ; $I = 2{,}1 \times 10^{-4}$ W·m^{-2}.

Le niveau sonore est : $L = 10 \log\left(\dfrac{I}{I_0}\right)$.

$$\text{Donc } L = 10 \log\left(\frac{2{,}1 \times 10^{-4} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}}{1{,}0 \times 10^{-12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}}\right) = 83 \text{ dB.}$$

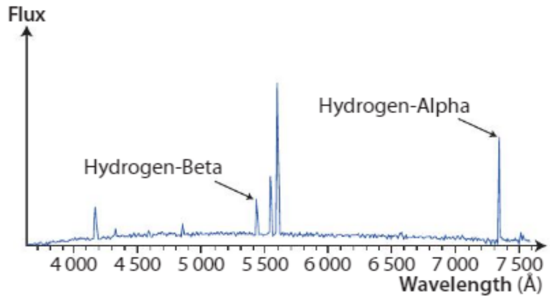
17 The Speed of the Galaxy Q2125-431

| Pratiquer une langue vivante étrangère.

The Doppler Shift[1] is an important physical phenomenon that astronomers use to measure the radial speeds of distant stars and galaxies. The basic formula for slow-speed motion (speeds much slower than the speed of light) is: speed $= 299\,792 \times \dfrac{\lambda_0 - \lambda_r}{\lambda_r}$.

We consider that this formula is valid here.

The speed of the object in km/s can be found by measuring the observed wavelength[2] of the object's signal (λ_0), and by knowing that the rest wavelength of the signal is λ_r, with wavelengths measured in Angstroms, Å (1 Å = 1×10^{-10} m).



This is a small part of the spectrum of Seyfert galaxy Q2125-431 in the Microscopium constellation. An astronomer has identified the spectral lines for Hydrogen Alpha ($\lambda_{r\alpha}$ = 6 563 Å), and Beta ($\lambda_{r\beta}$ = 5 007 Å). http://www.nasa.gov

Vocabulary : 1. *shift* : décalage ; 2. *rest wavelength* : longueur d'onde au repos.

1. Calculate the wavelength shift due to the Doppler-Fizeau for rays Hydrogen-Alpha and Hydrogen-Beta.
2. Is Seyfert galaxy Q2125-431 getting closer or further away from Earth?
3. Determine the speed at which galaxy Q2125-431 is moving away or closer to Earth.

17 The Speed of the Galaxy Q2125-431

1. Le spectre de la lumière provenant de la galaxie Q2125-431 permet d'évaluer la longueur d'onde de la raie H_α. Elle est égale à environ $\lambda_{0\alpha}$ = 7 350 Å. De plus, d'après le texte, la longueur d'onde de la raie H_α mesurée sur Terre pour une source au repos est $\lambda_{r\alpha}$ = 6 563 Å.
Le décalage de longueur d'onde dû à l'effet Doppler-Fizeau pour la raie H_α est donc :
$\Delta\lambda = \lambda_{0\alpha} - \lambda_{\lambda r\alpha}$ soit $\Delta\lambda$ = 7 350 Å – 6 563 Å = 787 Å.
Pour la raie H_β, on a environ $\lambda_{0\beta}$ = 5 430 Å et d'après le texte $\lambda_{r\beta}$ = 5 007 Å.
Le décalage de longueur d'onde dû à l'effet Doppler-Fizeau pour la raie H_β est :
$\Delta\lambda = \lambda_{0\beta} - \lambda_{r\beta}$ soit $\Delta\lambda$ = 5 430 – 5 007 = 423 Å.
2. On a $\Delta\lambda > 0$; la galaxie Seyfert Q2125-431 s'éloigne de la Terre.
3. La valeur de la vitesse d'éloignement de la galaxie Q2125-431 par rapport à la Terre est :
$v = 299\,792 \times \frac{\Delta\lambda}{\lambda_r}$.
Avec la raie H_α, on obtient : $v = 3{,}59 \times 10^4$ km·s⁻¹.
Avec la raie H_β, on obtient : $v = 2{,}53 \times 10^4$ km·s⁻¹.
La dispersion des valeurs laisse penser que, de façon arrondie, $v = 3 \times 10^4$ km·s⁻¹.

19 Connaître les critères de réussite

Au son de la corne de brume

| Effectuer des calculs.

Les cornes de brume sont utilisées dans le domaine maritime pour signaler un obstacle ou un danger.
Elles peuvent produire un son dont le niveau d'intensité sonore peut atteindre 115 dB.

1. Déterminer l'intensité sonore maximale du son émis par une corne de brume.
2. À 50 m de la corne de brume, l'intensité sonore est égale à $1{,}0 \times 10^{-4}$ W·m⁻².
 a. Déterminer le niveau d'intensité sonore correspondant.
 b. En déduire l'atténuation géométrique du signal.

Donnée
Intensité sonore de référence : $I_0 = 1{,}0 \times 10^{-12}$ W·m⁻².

19 Connaître les critères de réussite
Au son de la corne de brume

1. Le niveau d'intensité sonore est donné par :
$L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$.
Donc $\frac{L}{10} = \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$.
En utilisant la réciproque de la fonction logarithme, on obtient :
$\frac{I}{I_0} = 10^{\frac{L}{10}}$. Et finalement : $I = I_0 \times 10^{\frac{L}{10}}$.
Donc $I = 1{,}0 \times 10^{-12}$ W·m⁻² $\times 10^{\frac{115 \text{ dB}}{10 \text{ dB}}}$
soit $I = 3{,}2 \times 10^{-1}$ W·m⁻².
2. a. Le niveau d'intensité sonore à 50 m de la corne de brume est donné par :
$L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$. Donc $L = 10 \log\left(\frac{1{,}0 \times 10^{-4}\ \text{W·m}^{-2}}{1{,}0 \times 10^{-12}\ \text{W·m}^{-2}}\right)$
soit L = 80 dB.
b. L'atténuation géométrique du signal est $A = L_{\text{proche}} - L_{\text{éloigné}}$
donc A = 115 dB – 80 dB soit A = 35 dB.

22 Expérience historique

| Exploiter des informations ; effectuer des calculs.

En 1845, afin de vérifier expérimentalement la théorie de Christian DOPPLER, le scientifique Christoph BUYS-BALLOT a réalisé l'expérience suivante : des musiciens à bord d'un train jouent un *La* de fréquence f_E. Des auditeurs, convenablement disposés le long de la voie ferrée, ont pu reconnaître la note jouée par les musiciens lors de l'approche du train.

1. a. Quel est le phénomène à l'origine du décalage des fréquences entre l'onde émise et l'onde perçue ?

b. Quelle est la fréquence f_R de la note entendue par les auditeurs situés au bord de la voie ferrée ?

2. Dans cette situation, on a :

$$\Delta f = f_E \times \frac{v}{v_{onde} - v}$$

$v_{onde} = 340\ m \cdot s^{-1}$ étant la célérité du son dans les conditions de température du jour de l'observation.
Calculer la valeur de la vitesse de déplacement du train.

Données

Les définitions des notes de musique ont évolué depuis le XIXe siècle. Les fréquences actuelles sont reportées dans le tableau ci-dessous.

Note	Fa	Fa♯	Sol	La♭	La	La♯	Si
f (Hz)	349	370	393	415	440	464	494

22 Expérience historique

1. a. Le phénomène mis en jeu est l'effet Doppler.

b. Les musiciens situés au bord de la voie ferrée entendent un La#, soit une note de fréquence f_R égale à 464 Hz.

2. La valeur de la vitesse du train se déduit de l'expression du décalage Doppler : $\Delta f = f_E \times \frac{v}{v_{onde} - v}$.

Il vient $\Delta f \times (v_{onde} - v) = f_E \times v$.

Et ensuite $\Delta f \times v_{onde} = f_E \times v + \Delta f \times v$

soit $v \times (f_E + \Delta f) = \Delta f \times v_{onde}$. Or $\Delta f = f_R - f_E$.

D'où $v \times f_R = (f_R - f_E) \times v_{onde}$.

Ainsi $v = \frac{f_R - f_E}{f_R} \times v_{onde}$.

Ce qui s'écrit aussi $v = v_{onde} \times \left(1 - \frac{f_E}{f_R}\right)$.

Donc $v = 340\ m \cdot s^{-1} \times \left(1 - \frac{440\ Hz}{464\ Hz}\right) = 17{,}6\ m \cdot s^{-1}$.

23 À chacun son rythme

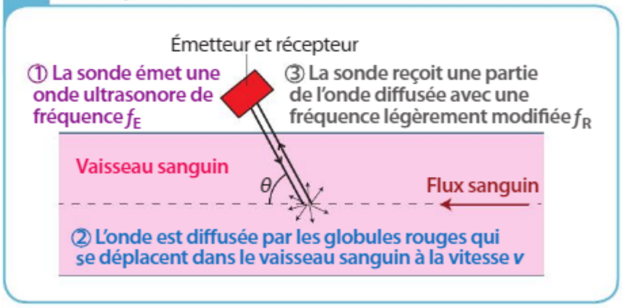
Vitesse d'écoulement sanguin

| Effectuer des calculs ; rédiger une explication.

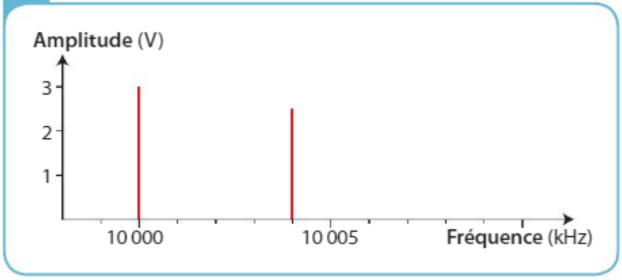
Commencer par résoudre l'énoncé compact. En cas de difficultés, passer à l'énoncé détaillé.

La vélocimétrie est une technique qui permet de mesurer la vitesse d'écoulement du sang dans les vaisseaux sanguins.

A Principe de la vélocimétrie



B Spectre obtenu après enregistrement simultané de l'onde émise et de l'onde reçue



La relation entre le décalage Doppler et la vitesse v est :

$$\Delta f = 2 \times \cos\theta \times f_E \times \frac{v}{v_{ultrason}}$$

Énoncé compact

Déterminer la valeur de la vitesse des globules rouges dans le vaisseau sanguin.

23 À chacun son rythme
Vitesse d'écoulement sanguin

1. D'après la figure **A**, les globules rouges se rapprochent du récepteur. On peut en déduire que la fréquence de l'onde reçue est supérieure à celle de l'onde émise : $f_R > f_E$.
D'après le doc. **B**, l'une de ces fréquences est égale à 10 000,0 kHz, l'autre est égale à 10 004,0 kHz.
On a donc $f_E = 10\,000{,}0$ kHz.

2. Le décalage Doppler est obtenu à partir du doc. **B** :
$\Delta f = 10\,004{,}0\ Hz - 10\,000{,}0\ Hz$ soit $\Delta f = 4{,}0$ kHz.

3. La valeur de la vitesse v des globules rouges est :

$v = \frac{\Delta f \times v_{ultrason}}{2 \times \cos\theta \times f_E}$, donc $v = \frac{4{,}0 \times 10^3\ Hz \times 1500\ m \cdot s^{-1}}{2 \times \cos(45°) \times 10\ 000 \times 10^3\ Hz}$

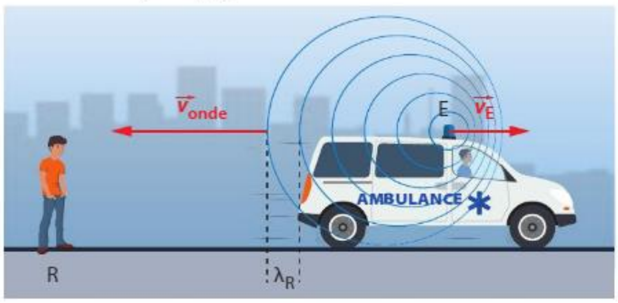
soit $v = 4{,}2 \times 10^{-1}\ m \cdot s^{-1}$.

24 Détermination par effet Doppler de la vitesse d'éloignement d'un émetteur

| Effectuer des calculs ; interpréter des résultats.

L'effet Doppler permet de mesurer la valeur de la vitesse d'un émetteur E s'éloignant d'un observateur immobile R.
On se propose de relier :
- la fréquence f_E d'émission des signaux par E ;
- la fréquence f_R de réception des signaux par R ;
- la valeur v_{onde} de la célérité de l'onde émise par E ;
- la valeur v_E de la vitesse de l'émetteur.

Les valeurs des vitesses sont mesurées dans un référentiel terrestre et $v_E < v_{onde}$.



1. À l'instant initial $t_1 = 0$ s, E est à la distance d de R et émet une onde sonore se propageant à la célérité v_{onde}. Exprimer littéralement la date t_2 au bout de laquelle ce signal est reçu par R.

2. a. Déterminer l'expression de la distance d_E parcourue par l'émetteur pendant une durée égale à une période T_E du signal émis.
b. À la date $t_3 = T_E$, quelle est la distance qui sépare E et R ?
c. À la date $t_3 = T_E$, l'émetteur émet de nouveau un signal. À quelle date t_4 le récepteur R reçoit-il ce signal ?

3. Quelle est la durée, notée T_R, séparant la réception par R de deux signaux consécutifs ? Que représente cette durée T_R ?

4. a. Exprimer la relation entre les fréquences f_R et f_E, la célérité v_{onde} du signal et la valeur v_E de la vitesse de E.
b. Quelle est l'expression littérale de la valeur de la vitesse v_E de l'émetteur ?

24 Détermination par effet Doppler de la vitesse d'éloignement d'un émetteur

1. D'après la relation entre la valeur de vitesse, la distance parcourue et la durée de parcours : $t_2 = \dfrac{d}{v_{onde}}$.

2. a. De même, $d_E = v_E \times T_E$.

b. La distance qui sépare E et R est :

$d_3 = d + d_E = d + v_E \times T_E$.

c. $t_4 = T_E + \dfrac{d_3}{v_{onde}} = T_E + \dfrac{d + v_E \times T_E}{v_{onde}}$

3. $T_R = t_4 - t_2$ soit :

$$T_R = T_E + \frac{d + v_E \times T_E}{v_{onde}} - \frac{d}{v_{onde}} = T_E + \frac{v_E \times T_E}{v_{onde}} = T_E \times \left(1 + \frac{v_E}{v_{onde}}\right)$$

C'est la période de l'onde reçue.

4. a. On déduit de la relation précédente : $\dfrac{1}{f_R} = \dfrac{1}{f_E} \times \left(1 + \dfrac{v_E}{v_{onde}}\right)$

d'où $f_E = f_R \times \left(1 + \dfrac{v_E}{v_{onde}}\right)$ soit $f_E = f_R \times \dfrac{v_{onde} + v_E}{v_{onde}}$.

b. L'expression précédente conduit à :

$f_E \times v_{onde} = f_R \times (v_{onde} + v_E)$

d'où $\dfrac{f_E \times v_{onde}}{f_R} = v_{onde} + v_E$ soit $v_E = \dfrac{f_E \times v_{onde}}{f_R} - v_{onde}$.

Finalement : $v_E = v_{onde} \times \left(\dfrac{f_E}{f_R} - 1\right) = v_{onde} \times \dfrac{f_E - f_R}{f_R}$.

27 Avion de chasse

| Tracer un graphique ; effectuer des calculs.

Un avion se déplace à basse altitude à la vitesse subsonique $v = 200\ m \cdot s^{-1}$, selon une trajectoire rectiligne horizontale. À chaque instant, il émet une onde sphérique acoustique qui se propage à la célérité $v_s = 340\ m \cdot s^{-1}$.

À l'instant $t_0 = 0$ s, un point de l'avion est à la position M_0 de sa trajectoire. À $t_1 = 0,1$ s, il est en M_1 ; à $t_2 = 0,2$ s, il est en M_2, etc.

1. Placer le point M_0 au centre d'une feuille de papier millimétré. Porter, à l'échelle 1 cm pour 20 m, les positions successives de M_0 à M_6 de l'avion sur sa trajectoire.

2. On analyse le phénomène à la date $t_6 = 0,6$ s : l'avion est en M_6.
a. Si, aux positions $M_5, M_4, ..., M_0$ ont été créées des ondes sphériques acoustiques, quelles distances $d_5, d_4, ..., d_0$ ont été franchies par ces ondes à la date $t_6 = 0,6$ s ?
b. À cette date t_6, tracer au compas les limites circulaires atteintes par ces ondes sphériques (placer chaque fois le centre du cercle à tracer sur la position M_i considérée).

3. Montrer que cette construction met en évidence, pour un observateur terrestre, deux séries d'ondes, une en avant et une autre en arrière de l'avion, dont on comparera les longueurs d'onde apparentes respectives λ' et λ''.

4. En déduire qu'il en résulte deux sons, de fréquences f' et f'', dont l'un est plus aigu que l'autre.

5. On note λ la longueur d'onde acoustique dans le référentiel du pilote et f la fréquence correspondante.

Calculer le rapport $\dfrac{f'}{f''}$.

Données

$\lambda' = \lambda - \dfrac{v}{f}$ et $\lambda'' = \lambda + \dfrac{v}{f}$.

27 Avion de chasse

1. Les positions successives de l'avion entre les instants t_0 et t_6 s'obtiennent à partir de la relation entre la valeur de vitesse constante, la distance parcourue et la durée de parcours : $d = v \times \Delta t$.
On a ainsi :

Position	Instant	Distance	Distance sur le schéma
M_0	$t_0 = 0$ s	$M_0M_0 = 0$ m	0,0 cm
M_1	$t_1 = 0,1$ s	$M_0M_1 = 20$ m	1,0 cm
M_2	$t_2 = 0,2$ s	$M_0M_2 = 40$ m	2,0 cm
M_3	$t_3 = 0,3$ s	$M_0M_3 = 60$ m	3,0 cm
M_4	$t_4 = 0,4$ s	$M_0M_4 = 80$ m	4,0 cm
M_5	$t_5 = 0,5$ s	$M_0M_5 = 100$ m	5,0 cm
M_6	$t_6 = 0,6$ s	$M_0M_6 = 120$ m	6,0 cm

Le schéma complet est fait en **2. b**.

2. a. L'onde se propage sur une distance $d = v_S \times \Delta t$ et $\Delta t = t_6 - t_i$; on obtient alors :

$d_5 = v_S \times (t_6 - t_5)$
$d_5 = 340\ m \cdot s^{-1} \times (0,6\ s - 0,5\ s) = 34$ m
soit 1,7 cm à l'échelle proposée ;

$d_4 = v_S \times (t_6 - t_4)$
$d_4 = 340\ m \cdot s^{-1} \times (0,6\ s - 0,4\ s) = 68$ m
soit 3,4 cm à l'échelle proposée ;

$d_3 = v_S \times (t_6 - t_3)$
$d_3 = 340\ m \cdot s^{-1} \times (0,6\ s - 0,3\ s) = 102$ m
soit 5,1 cm à l'échelle proposée ;

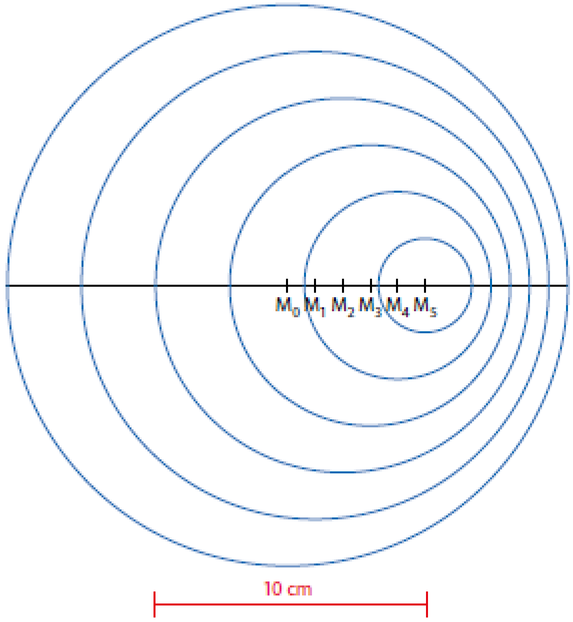
$d_2 = v_S \times (t_6 - t_2)$
$d_2 = 340\ m \cdot s^{-1} \times (0,6\ s - 0,2\ s) = 136$ m
soit 6,8 cm à l'échelle proposée ;

$d_1 = v_S \times (t_6 - t_1) = 340\ m \cdot s^{-1} \times (0,6\ s - 0,1\ s) = 170$ m
soit 8,5 cm à l'échelle proposée ;

$d_0 = v_S \times (t_6 - t_0) = 340\ m \cdot s^{-1} \times (0,6\ s - 0\ s) = 204$ m
soit 10,2 cm à l'échelle proposée.

b. *Voir le schéma à la fin du chapitre.*

Réponse de l'exercice 27 1 et 2.b.



3. À l'avant de l'avion, les fronts des ondes sphériques sont plus resserrés qu'en arrière.
Il en résulte qu'il existe deux longueurs d'onde apparentes λ' et λ'' pour un observateur terrestre. La longueur d'onde à l'avant de l'avion, λ', est plus petite que celle à l'arrière, λ''.

4. Pour une onde, $\lambda = \frac{v_S}{f}$, à v_S identique, plus la longueur d'onde λ est courte, plus la fréquence f est grande. Il existe donc deux fréquences f' et f'' pour un observateur terrestre.
Par rapport à la fréquence f de l'onde émise par l'avion dans le référentiel du pilote, l'observateur va entendre un son plus aigu si l'avion se rapproche de lui (car $f' > f$) et un son plus grave si l'avion s'éloigne (car $f'' < f$). C'est l'effet Doppler.

5. D'après les données, on a $\lambda' = \lambda - \frac{v}{f}$ et $\lambda'' = \lambda + \frac{v}{f}$.

On en déduit $f' = \frac{v_S}{\lambda'} = \frac{v_S}{\lambda - \frac{v}{f}} = \frac{v_S \times f}{\lambda \times f - v} = \frac{v_S \times f}{v_S - v}$

soit $f' = f \times \frac{v_S}{v_S - v}$.

Et $f'' = \frac{v_S}{\lambda''} = \frac{v_S}{\lambda + \frac{v}{f}} = \frac{v_S \times f}{\lambda \times f + v} = \frac{v_S \times f}{v_S + v}$ soit $f'' = f \times \frac{v_S}{v_S + v}$

D'où le rapport $\frac{f'}{f''} = \frac{v_S + v}{v_S - v} = \frac{340\ \text{m·s}^{-1} + 200\ \text{m·s}^{-1}}{340\ \text{m·s}^{-1} - 200\ \text{m·s}^{-1}}$

soit $\frac{f'}{f''} = 3{,}86$.

Entre le son perçu quand l'avion s'approche et celui perçu quand il s'éloigne, la fréquence est divisée par 3,86.