

Propriétés des ondes

Activités

1 Approche historique du caractère ondulatoire de la lumière (p. 62)

- 1** I. NEWTON observe que la lumière est constituée de radiations colorées.
C. HUYGENS interprète les observations faites par I. NEWTON et en déduit le caractère ondulatoire de la lumière.
T. YOUNG met en évidence les phénomènes de diffraction et d'interférences confirmant le caractère ondulatoire de la lumière.
J. VON FRAUNHOFER met au point le spectroscopie et observe des spectres.
C. DOPPLER prévoit le décalage des ondes lorsque qu'il y a un mouvement relatif de l'émetteur par rapport au récepteur.
C. BUYS-BALLOT vérifie expérimentalement la théorie de C. DOPPLER pour le son.
H. FIZEAU prévoit que la théorie de C. DOPPLER peut s'étendre à la lumière des étoiles.

2 Listes des phénomènes physiques étudiés :

Scientifique	Phénomène physique
I. NEWTON	Dispersion de la lumière
C. HUYGENS	Caractère ondulatoire de la lumière
T. YOUNG	Diffraction et interférences de la lumière
J. VON FRAUNHOFER	Spectroscopie de la lumière
C. DOPPLER, C. BUYS-BALLOT, H. FIZEAU	Effet Doppler

3 Les appareils d'observation n'étaient pas suffisamment précis pour pouvoir vérifier l'effet Doppler-Fizeau.

2 Diffraction de la lumière (p. 63)

A Étude qualitative

- 1** Sur l'écran, on observe une alternance de zones lumineuses et de zones sombres dans une direction perpendiculaire à celle de la fente. C'est une « figure de diffraction ».
- 2** En l'absence de fente, on observe une tache lumineuse. Il y a donc des zones éclairées par la figure de diffraction qui ne le sont pas en l'absence de fente.
- ▶ Avec un fil, on observe la même figure de diffraction que celle obtenue avec une fente.
 - ▶ Avec un trou circulaire, on observe une tache centrale très lumineuse entourée d'anneaux concentriques alternativement sombres et lumineux.

B Étude quantitative

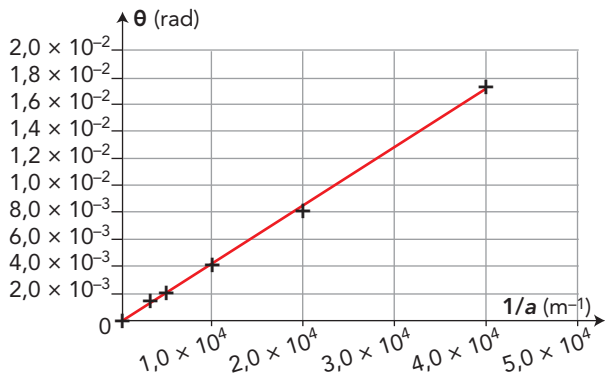
3 $\tan \theta = \frac{\ell}{2D} \approx \theta$

4 a. Le résultat des mesures est regroupé dans le tableau ci-dessous :

a ($\times 10^{-3}$ m)	0,300	0,200	0,100	0,0500	0,0250
ℓ ($\times 10^{-3}$ m)	13	19	37	73	156

Avec un tableur, on obtient les résultats suivants :

a (m)	ℓ (m)	D (m)	θ (rad)	$1/a$ (m^{-1})
3,00E-04	1,30E-02	4,50	1,4E-03	3,33E+03
2,00E-04	1,90E-02	4,50	2,1E-03	5,00E+03
1,00E-04	3,70E-02	4,50	4,1E-03	1,00E+04
5,00E-05	7,30E-02	4,50	8,1E-03	2,00E+04
2,50E-05	1,56E-01	4,50	1,7E-02	4,00E+04



La courbe obtenue est une droite qui passe par l'origine. θ est donc proportionnel à $\frac{1}{a}$: $\theta = k \cdot \frac{1}{a}$.

b. La modélisation donne $\theta = 4,2 \times 10^{-7} \times \frac{1}{a}$.

Le coefficient directeur k est homogène à une longueur.

Sa valeur correspond à la longueur d'onde λ du laser utilisé.

5 On trouve $\theta = \frac{\lambda}{a}$; θ est l'écart angulaire entre le milieu de la tache centrale et le milieu de la première extinction, en radian, λ la longueur d'onde en m et a la largeur de la fente en m.

6 On réalise la même expérience que précédemment en utilisant un laser dont on ne connaît pas la longueur d'onde et une fente dont on connaît la largeur a .
Exemple : $a = 1,00 \times 10^{-4}$ m.

On mesure la distance fente-écran, ainsi que la largeur de la tache centrale :

- distance fente-écran : $D = 4,50$ m ;
- largeur de la tache centrale : $\ell = 57$ mm.

On en déduit : $\lambda' = \frac{a \cdot \ell}{2D} = 6,33 \times 10^2$ nm.

7 a. D'après la notice :

$$U(a) = 1,5 \% \text{ de la valeur annoncée} = 1,5 \times 10^{-6} \text{ m, soit } 0,002 \text{ mm.}$$

$$U(\ell) = \sqrt{2} \times \frac{2 \times 1}{\sqrt{12}} = 0,8 \text{ mm} = 1 \text{ mm}$$

$$U(D) = \sqrt{2} \times \frac{2 \times 1}{\sqrt{12}} = 0,8 \text{ cm} = 1 \text{ cm}$$

$$\mathbf{b.} \quad U(\lambda') = \lambda' \cdot \sqrt{\left(\frac{U(a)}{a}\right)^2 + \left(\frac{U(\ell)}{\ell}\right)^2 + \left(\frac{U(D)}{D}\right)^2}$$

$$U(\lambda') = 6,33 \times 10^2 \times \sqrt{\left(\frac{0,002}{0,100}\right)^2 + \left(\frac{1}{57}\right)^2 + \left(\frac{1}{450}\right)^2}$$

$$U(\lambda') = 17 \text{ nm}$$

c. $\lambda' \in [616 \text{ nm}; 650 \text{ nm}]$. Cela est conforme à la valeur indiquée par le fabricant : 632,8 nm.

3 Interférences lumineuses (p. 64)

A Étude quantitative

Complément

Pour les fentes d'Young, on utilise du matériel Ovio pour lequel les valeurs de b sont 0,200 mm, 0,300 mm et 0,500 mm, avec une précision de 1 μm . L'écran est placé à une distance de 4,00 m.

1 On observe des franges d'interférences, alternativement sombres et brillantes sur l'écran. Ces franges sont parallèles entre elles et parallèles aux deux fentes d'Young.

2 a. Avec un tableur, on obtient :

b (m)	i (m)	$\frac{1}{b}$ (m^{-1})
2,00E-04	1,2E-02	5,00E+03
3,00E-04	8,4E-03	3,33E+03
5,00E-04	5,0E-03	2,00E+03

On trace la courbe donnant les variations de i en fonction de $\frac{1}{b}$. On obtient une droite qui passe par l'origine (voir ci-contre); i est donc proportionnel à $\frac{1}{b}$.

b. Les deux premières expressions sont à exclure, car il n'y a pas de proportionnalité entre i et $\frac{1}{b}$.

La dernière relation est également à exclure, car i n'est pas homogène à une longueur.

Seule la troisième relation est conforme : $i = \frac{\lambda \cdot D}{b}$.

3 On n'observe pas de figure d'interférences à partir de deux lasers identiques éclairant une même zone de l'écran.

$$\mathbf{4} \quad i = \frac{\lambda \cdot D}{b}$$

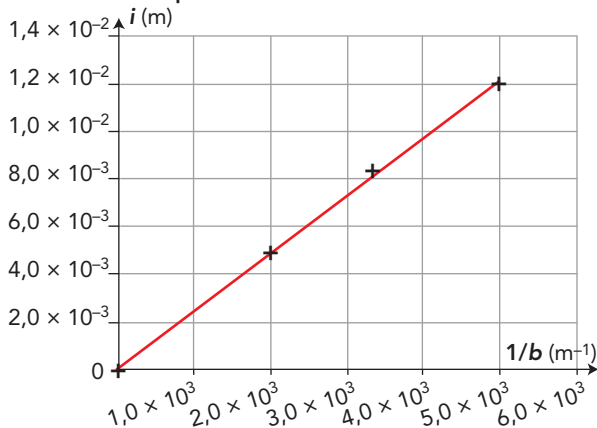
i : interfrange en m.

λ : longueur d'onde de la source en m.

b : largeur de l'interfente en m.

D : distance écran-fentes en m.

Courbe de la réponse 2a



B Application à la détermination du pas d'un réseau

5 On remplace les fentes d'Young par un réseau 100 traits/mm.

On utilise un laser $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ avec une précision de $0,2 \text{ nm}$.

On se place à une distance $D = 2,00 \text{ m}$ de l'écran.

On mesure l'interfrange $i = 12,5 \text{ cm}$.

$$b = \frac{\lambda \cdot D}{i} = \frac{632,8 \times 10^{-9} \times 2,00}{12,5 \times 10^{-2}} = 1,01 \times 10^{-5} \text{ m}$$

6 a. $U(\lambda) = 0,2 \text{ nm}$

$$U(i) = \sqrt{2} \times \frac{2 \times 1}{\sqrt{12}} = 0,8 \text{ mm} = 1 \text{ mm}$$

$$U(D) = \sqrt{2} \times \frac{2 \times 1}{\sqrt{12}} = 0,8 \text{ cm} = 1 \text{ cm}$$

$$b. U(b) = b \cdot \sqrt{\left(\frac{U(\lambda)}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{U(i)}{i}\right)^2 + \left(\frac{U(D)}{D}\right)^2}$$

$$U(b) = 1,00 \times 10^{-5} \times \sqrt{\left(\frac{0,2}{632,8}\right)^2 + \left(\frac{1}{125}\right)^2 + \left(\frac{1}{200}\right)^2}$$

$$U(b) = 1 \times 10^{-7} \text{ m} = 1 \times 10^{-4} \text{ mm}$$

c. $b = (1,01 \times 10^{-2} \pm 0,01 \times 10^{-2}) \text{ mm}$

ou $b \in [1,00 \times 10^{-2}; 1,02 \times 10^{-2}]$

b est conforme à l'indication du fabricant :

$1,01 \times 10^{-2} \text{ mm}$.

4 Effet Doppler (p. 65)

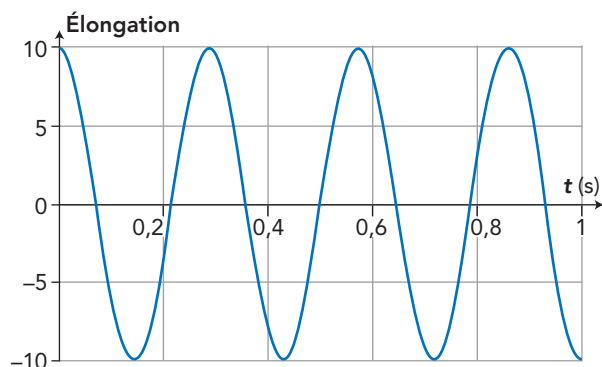
1 Il fait référence à la longueur d'onde du son.

2 a. $v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f$

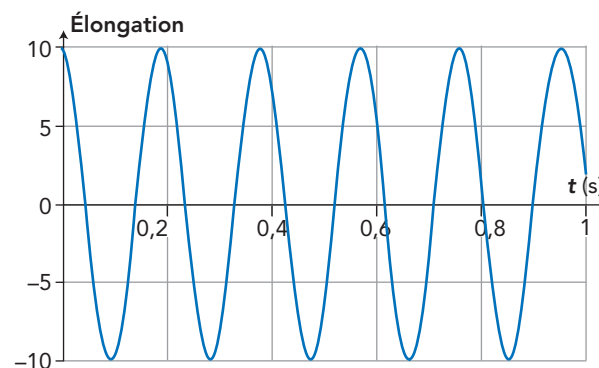
b. Un son aigu a une fréquence plus élevée qu'un son grave.

c. D'après la relation 2a, pour une même vitesse de propagation, si la longueur d'onde est plus faible, la fréquence est plus élevée, donc le son est plus aigu.

3 a. Élongation du niveau de l'eau vue par la grenouille immobile :



b. Élongation du niveau de l'eau vue par le cygne se rapprochant de la source :



4 Une onde émise avec une fréquence f_E est perçue avec une fréquence f_R différente lorsque l'émetteur et le récepteur sont en déplacement relatif : c'est l'effet Doppler.

Par exemple, le son de la sirène d'une ambulance est perçu plus aigu lorsque celle-ci se rapproche.

5 Mesure de la valeur d'une vitesse par effet Doppler (p. 66)

A Étude expérimentale

Complément

Le matériel utilisé a été développé par JCL électronique (<http://www.electrome.fr/>).

1 Pour déterminer la valeur de la vitesse du véhicule, il faut mesurer le décalage de fréquence du son émis par un émetteur lorsqu'il est immobile et lorsqu'il est en mouvement.

On dispose d'un émetteur à ultrason, jouant le rôle du véhicule, pouvant se déplacer sur un rail.

Au milieu du rail se trouve une fourche optique pouvant déclencher une acquisition (ordinateur ou oscilloscope numérique).

On réalise une première acquisition avec l'émetteur immobile afin de déterminer la fréquence f_E des ultrasons émis. Ensuite, on réalise différentes acquisitions avec l'émetteur s'approchant ou s'éloignant du récepteur afin de déterminer la fréquence f_R perçue.

2

Mesures Automatiques		Mesures Automatiques		Mesures Automatiques	
EA0		EA0		EA0	
Valeur Mini :	-0.432 V	Valeur Mini :	-0.427 V	Valeur Mini :	-0.238 V
Valeur Maxi :	0.427 V	Valeur Maxi :	0.417 V	Valeur Maxi :	0.228 V
Valeur Maxi - Mini :	0.858 V	Valeur Maxi - Mini :	0.843 V	Valeur Maxi - Mini :	0.466 V
Valeur Moyenne :	-2.217 mV	Valeur Moyenne :	-1.855 mV	Valeur Moyenne :	-3.5 mV
Décalage signal :	-2.193 mV	Décalage signal :	-2.111 mV	Décalage signal :	-2.674 mV
Période :	25 μs	Période :	25.115 μs	Période :	24.885 μs
Fréquence (Hz) :	40 kHz	Fréquence (Hz) :	39.816 kHz	Fréquence (Hz) :	40.185 kHz
Valeur Efficace :	0.303 V	Valeur Efficace :	0.294 V	Valeur Efficace :	0.161 V

Mobile à l'arrêt : $f_E = 40,000$ kHz.

Mobile s'approchant du récepteur à la vitesse v_1 :

$$f_{R1} = 40,185 \text{ kHz.}$$

Mobile s'éloignant du récepteur à la vitesse v_2 :

$$f_{R2} = 39,816 \text{ kHz.}$$

On trouve :

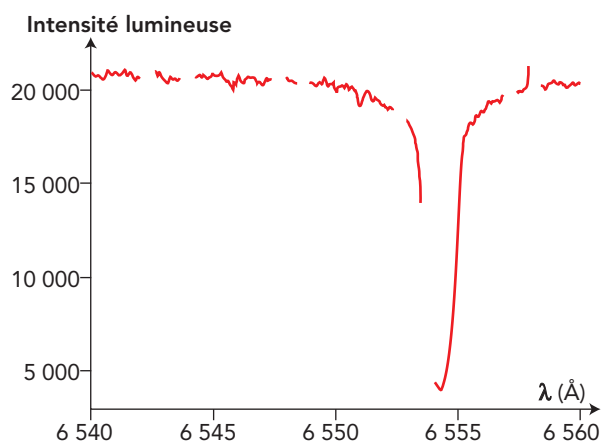
$$v_1 = 340 \times \frac{185}{40185} = 1,57 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{et } v_2 = 340 \times \frac{184}{39816} = 1,57 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Manuel numérique 2.0
Simulation : Effet Doppler.

B Application à l'astrophysique

3 Profil spectral de l'étoile HD 2665 :
J003044.7 + 570357 S 19961003/0017 OBJO 105
Entre 6540 Å et 6560 Å :



L'extremum du pic correspondant à H_α se situe à une longueur d'onde de 6554,2 Å. Ce décalage s'explique par le fait que l'étoile se rapproche de la Terre.

4 On en déduit la vitesse radiale de l'étoile :

$$v = 3,00 \times 10^8 \times \frac{|6554,2 - 6562,6|}{6562,6}$$

$$v = 384 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 384 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Cette étoile se rapproche de la Terre avec une vitesse de 384 km · s⁻¹.

5 On peut améliorer cette précision en identifiant plusieurs raies et en effectuant une moyenne à partir des valeurs calculées.

6 L'effet Doppler permet de déterminer les vitesses radiales des étoiles.

Manuel numérique 2.0
Simulation : Effet Doppler-Fizeau.

Exercices (p. 73-85)

QCM

- 1 1. A, B et C; 2. A et B; 3. B; 2 1. C; 2. B;
3. A et C; 3 1. B; 2. B.

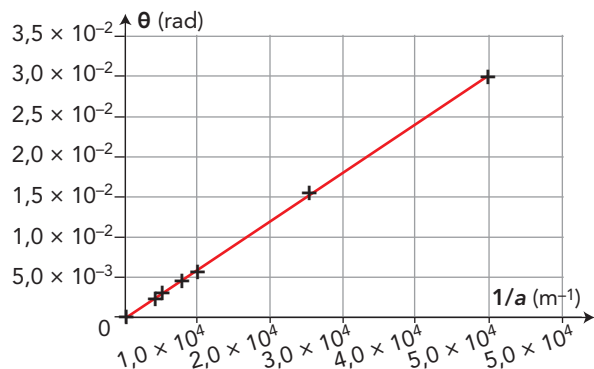
Application immédiate

4 Déterminer une longueur d'onde par interférence

- $\lambda = 635$ nm
- $U(\lambda) = 9$ nm, donc $626 \text{ nm} < \lambda < 644 \text{ nm}$.
- La valeur fournie par le constructeur est compatible avec l'encadrement obtenu.

5 Étudier expérimentalement le phénomène de diffraction

1. La représentation graphique de θ en fonction de $\frac{1}{a}$ est une droite passant par l'origine dont le coefficient directeur est 605×10^{-9} m.



2. $\lambda = 605$ nm

Pour commencer

6 Connaître le phénomène de diffraction

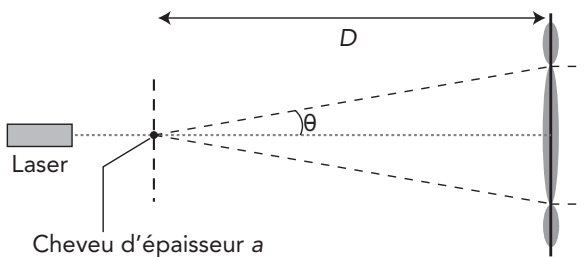
On observe une tache centrale très lumineuse entourée d'anneaux concentriques alternativement sombres et brillants.

7 Associer figure de diffraction et objet diffractant

La figure 1 est obtenue avec une fente verticale, la figure 2 avec un trou circulaire.

8 Calculer un demi-angle de diffraction

1.



$$2. \theta = \frac{\lambda}{a} = \frac{632,8 \times 10^{-9}}{50 \times 10^{-6}} = 1,3 \times 10^{-2} \text{ rad}$$

9 Connaître le phénomène d'interférences

On observe des franges d'interférences, alternativement sombres et brillantes, sur l'écran. Ces franges sont parallèles entre elles et parallèles aux deux fentes d'Young.

10 Connaître les conditions d'interférences

1. Les sources doivent être cohérentes.
2. a. $\delta = k \cdot \lambda$, avec k un nombre entier relatif.
b. $\delta = \left(k + \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda$, avec k un nombre entier relatif.

11 Illustrer le phénomène d'interférences

Dans la vie courante, on observe les phénomènes d'interférences en lumière blanche : irisation sur les bulles de savon ou sur les ailes de papillon. Ce phénomène peut s'entendre avec deux haut-parleurs identiques.

12 Illustrer l'effet Doppler

Le cinémomètre routier (radar) utilise l'effet Doppler des ondes électromagnétiques pour mesurer la valeur de la vitesse des véhicules.

L'échographie Doppler permet de mesurer la vitesse d'écoulement du sang dans les veines et les artères.

13 Comparer des fréquences

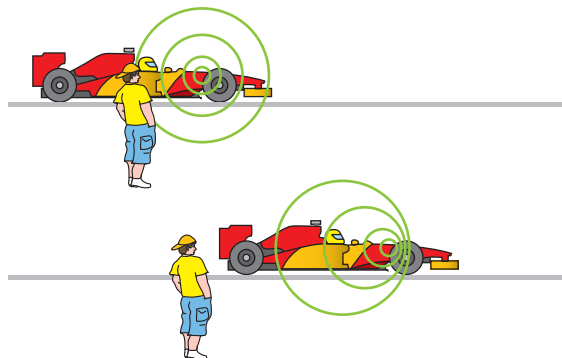
1.

Grandeur	Unité SI
f_E	s^{-1}
c et v_E	$m \cdot s^{-1}$
$\frac{c \cdot f_E}{c + v_E}$	$\frac{m \cdot s^{-1} \cdot s^{-1}}{m \cdot s^{-1}} = s^{-1}$

L'analyse dimensionnelle montre l'homogénéité de l'expression.

2. $\frac{c}{c + v_E}$ est inférieur à 1, donc la fréquence f_B est inférieure à la fréquence f_E .

14 Schématiser l'effet Doppler

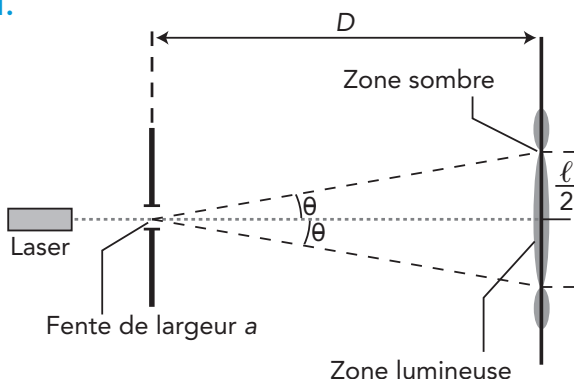


La longueur de l'onde sonore perçue par l'observateur après le passage de la voiture est plus grande, donc le son perçu sera plus grave.

Pour s'entraîner

15 Largeur d'une tache centrale

1.



2. $\theta = \frac{\lambda}{a}$

3. a. $\tan \theta = \frac{l}{2D} \approx \theta$

b. $\frac{l}{2D} \approx \frac{\lambda}{a}$, soit $l \approx \frac{2 \cdot \lambda \cdot D}{a}$

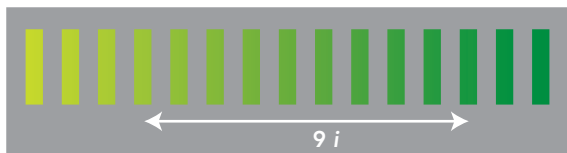
4. a. Si la largeur de la fente double, la largeur de la tache centrale est deux fois plus petite.

Si la largeur de la fente est divisée par 2, la largeur de la tache centrale double.

b. Si la distance entre la fente et l'écran double, la largeur de la tache centrale double.

16 À chacun son rythme

1. a.



La figure d'interférences est composée d'une succession de franges lumineuses équidistantes.

De la frange centrale à la dixième frange, il y a 9 interfranges :

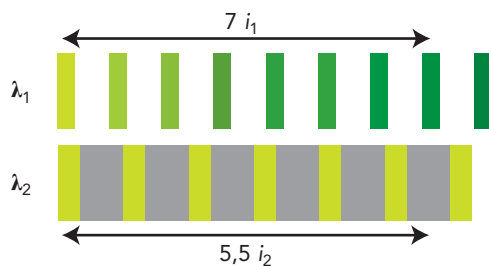
$$i_1 = \frac{9,9}{9} = 1,1 \text{ mm.}$$

b. $\lambda_1 = \frac{i \cdot b}{D} = \frac{1,1 \times 10^{-3} \times 1,0 \times 10^{-3}}{2,00} = 5,5 \times 10^{-7} \text{ m}$

2. a. De la frange centrale à la huitième frange, il y a 7 interfranges i_1 , soit 7,7 mm.

b. De la frange centrale à la sixième frange sombre, il y a 5,5 interfranges i_2 , soit :

$$i_2 = \frac{7,7}{5,5} = 1,4 \text{ mm.}$$



c. $\lambda_2 = \frac{1,4 \times 10^{-3} \times 1,0 \times 10^{-3}}{2,00} = 7,0 \times 10^{-7} \text{ m}$

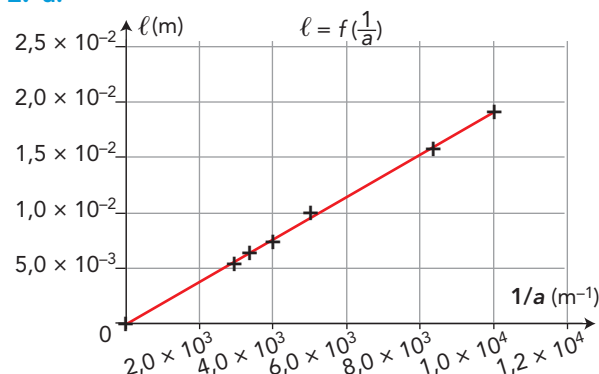
17 Mailles du voileage

1. Ce sont les interférences constructives.
2. i est l'interfrange.
3. $a = (281,3 \pm 6,5) \mu\text{m}$

18 Détermination expérimentale d'une longueur d'onde

1. On observe un phénomène de diffraction.

2. a.



b. On obtient une droite qui passe par l'origine ; l est donc proportionnel à $\frac{1}{a}$; on peut écrire :

$$l = k \cdot \frac{1}{a}$$

3. a. $\theta = \frac{\lambda}{a}$

b. L'angle étant petit, on peut écrire $\tan \theta \approx \theta \approx \frac{l}{2D}$.

On en déduit :

$$\frac{\lambda}{a} \approx \frac{l}{2D}$$

c. $\lambda \approx a \cdot \frac{l}{2D} \approx \frac{k}{2D}$

Graphiquement, on détermine que $k = 1,9 \times 10^{-6} \text{ m}^2$.

$$\lambda \approx \frac{1,9 \times 10^{-6}}{2 \times 1,50} \approx 6,34 \times 10^{-7} \text{ m}$$

19 Est-ce que ça diffracte ?

1. Le phénomène de diffraction sera d'autant plus important que $\frac{\lambda}{a}$ sera grand : la diffraction sera donc plus importante pour $\lambda_1 = 1850 \text{ m}$.

2. C'est un phénomène d'interférences destructives, les ondes émises par le casque étant en opposition de phase avec celles du bruit.

3. C'est le phénomène de diffraction de la houle par l'ouverture du port.

4. Elle a une longueur d'onde inférieure à λ_1 .

20 Caractère ondulatoire de la lumière

1. On observe un phénomène de diffraction.

2. $\tan \theta = \frac{l}{2D} = 3,15 \times 10^{-3}$

$$\theta \approx \tan \theta, \text{ donc } \theta \approx 3,15 \times 10^{-3} \text{ rad.}$$

3. a. $\theta = \frac{\lambda}{a}$

b. $\lambda = a \cdot \theta$

$$\lambda = 0,200 \times 10^{-3} \times 3,15 \times 10^{-3} = 6,30 \times 10^{-7} \text{ m}$$

c. $U(\lambda) = \lambda \cdot \sqrt{\left(\frac{U(a)}{a}\right)^2 + \left(\frac{U(l)}{l}\right)^2 + \left(\frac{U(D)}{D}\right)^2}$

$$U(\lambda) = 630 \times \sqrt{\left(\frac{0,005}{0,2}\right)^2 + \left(\frac{0,1}{12,6}\right)^2 + \left(\frac{0,01}{2}\right)^2}$$

$$U(\lambda) = 17 \text{ nm}$$

d. $613 \text{ nm} < \lambda < 647 \text{ nm}$

4. $\lambda = \frac{c}{\nu}$, avec λ en m, c en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ et ν en Hz.

5. a. $\frac{\ell}{2D} \approx \frac{\lambda}{a}$, soit $\ell \approx \frac{2 \cdot \lambda \cdot D}{a}$

b. Longueurs d'onde dans le vide :

– des radiations bleues : $\lambda_B \approx 400 \text{ nm}$;

– des radiations rouges : $\lambda_R \approx 800 \text{ nm}$.

c. En lumière bleue, la longueur d'onde diminue, θ aussi, donc ℓ également.

Si on diminue la largeur de la fente, θ augmente et ℓ aussi.

21 Contrôle de vitesse

1. a. L'émetteur d'ondes ultrasonores et le récepteur sont fixes.

b. On utilise la réflexion des ondes ultrasonores.

c. La mesure est faite lorsque le véhicule s'approche.

d. La fréquence f_R de l'onde reçue sera supérieure à la fréquence f_E de l'onde émise.

2. $f_R = 40,280 \text{ kHz}$ et $f_E = 40,000 \text{ kHz}$.

3. a. (A) $f_E = f_R \cdot \left(2V - \frac{V}{V_S}\right)$, ce qui revient à écrire :

$$\text{Hz} = \text{Hz} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} - \text{Hz} ;$$

cette relation ne convient pas.

(B) $f_R = V \cdot \left(f_E - \frac{2V}{V_S}\right)$, ce qui revient à écrire :

$$\text{Hz} = \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz} - \text{m} \cdot \text{s}^{-1} ;$$

cette relation ne convient pas.

(C) $f_E = f_R \cdot \left(1 - \frac{2V}{V_S}\right)$, ce qui revient à écrire :

$$\text{Hz} = \text{Hz} - \text{Hz} ;$$

cette relation peut convenir.

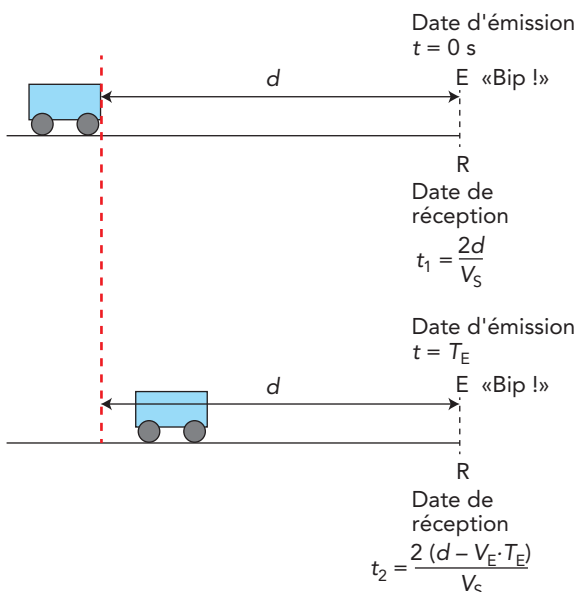
(D) $f_E = f_R \cdot \left(1 + \frac{2V}{V_S}\right)$, ce qui revient à écrire :

$$\text{Hz} = \text{Hz} + \text{Hz} ;$$

cette relation peut convenir.

La question 1d a montré que $f_R > f_E$; c'est donc la relation (C) qui convient.

b.



Deux signaux consécutifs sont reçus avec un intervalle de temps T_R tel que :

$$T_R = t_2 - t_1 = T_E + \frac{2(d - V \cdot T_E)}{V_S} - \frac{2d}{V_S} = T_E - \frac{2V \cdot T_E}{V_S}$$

$$T_R = T_E \cdot \left(1 - \frac{2V}{V_S}\right)$$

$$\frac{T_R}{T_E} = \frac{f_E}{f_R} = \left(1 - \frac{2V}{V_S}\right), \text{ soit } f_E = f_R \cdot \left(1 - \frac{2V}{V_S}\right)$$

Le nombre 2 vient du fait que la mesure se fait par réflexion.

$$c. f_E = f_R \cdot \left(1 - \frac{2V}{V_S}\right), \text{ soit } V = \frac{V_S}{2} \cdot \left(1 - \frac{f_E}{f_R}\right)$$

$$V = \frac{340}{2} \times \left(1 - \frac{40,000}{40,280}\right) = 1,18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

4. a. La vitesse ayant une valeur constante, il suffit de déterminer la pente de la droite $x = f(\text{temps})$.

Choix de deux points de la droite :

$$(2,89 ; 0) \text{ et } (3,11 ; 0,24)$$

$$V_{\text{vidéo}} = \frac{0,24 - 0}{3,11 - 2,89} = 1,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

b. Calcul de l'erreur relative en pourcentage :

$$\left| \frac{V_{\text{vidéo}} - V}{V} \right| \times 100 = \left| \frac{1,1 - 1,18}{1,18} \right| \times 100 = 6,7 \%$$

Aux imprécisions de mesure près, les deux valeurs sont les mêmes.

22 « niiaiiian »

1. Une onde électromagnétique ou mécanique émise avec une fréquence f_E est perçue avec une fréquence f_R différente lorsque l'émetteur et le récepteur sont en déplacement relatif : c'est l'effet Doppler.

2. Les rayures verticales peuvent évoquer la propagation d'une onde plane. Les couleurs peuvent évoquer un état vibratoire. Ainsi les points des lignes d'une même couleur sont supposés être dans le même état vibratoire (comme sur une cuve à ondes) :

– les lignes noires peuvent évoquer des minima de vibration ;

– les lignes blanches des maxima.

L'écart entre les lignes d'une même couleur évoque donc la longueur d'onde.

Celle-ci diminue de gauche vers le centre, puis augmente du centre vers la droite.

Ceci évoque l'effet Doppler dans lequel une onde émise par une source en mouvement a une fréquence apparente plus grande (donc une longueur d'onde plus faible) lorsqu'elle s'approche d'un observateur fixe et une fréquence apparente plus petite (donc une longueur d'onde plus grande) lorsqu'elle s'éloigne d'un observateur fixe.

Le point blanc au centre peut suggérer l'observateur.

23 Différence de marche

1. a. En O, la différence de marche est nulle.

b. On observe une frange brillante sur l'écran.

$$2. a. \delta = \frac{0,20 \times 10^{-3} \times 6,1 \times 10^{-3}}{1,00} = 1,2 \times 10^{-6} \text{ m}$$

b. $\delta = \left(k + \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda = 1,2 \times 10^{-6} \text{ m}$, avec $k = 2$;
on observe donc une frange sombre en P.

24 Calcul d'une longueur d'onde

1. À l'aide du schéma, on compte 10 interfranges pour la distance d .

Ainsi, $i = \frac{d}{10} = \frac{30}{10} = 3,0 \text{ mm}$.

2. a. Seule la relation (B) convient :

$$i = \frac{\lambda \cdot D}{b}, \text{ car } m = \frac{m \cdot m}{m}$$

b. On en déduit que $\lambda = \frac{i \cdot b}{D}$.

$$\lambda = \left(\frac{3,0 \times 10^{-3} \times 0,20 \times 10^{-3}}{1,00}\right) = 6,0 \times 10^{-7} \text{ m},$$

soit 600 nm.

3. i est très petit, donc on mesure d plutôt que i , car cela réduit l'erreur systématique due à la méthode de mesure.

25 The Speed of Galaxy Q2125-431

Traduction du texte :

« L'effet Doppler est un phénomène physique important que les astronomes utilisent pour mesurer les vitesses de déplacement des étoiles et des galaxies. La formule de base pour des mouvements de faible vitesse (ce qui signifie des vitesses beaucoup plus faibles que celle de la lumière) est :

$$\text{vitesse} = 299\,792 \times \frac{\lambda_0 - \lambda_r}{\lambda_r}$$

La vitesse d'un objet en km/s s'obtient à partir de la mesure de la longueur d'onde du signal que vous observez (λ_0) et à partir de la longueur d'onde au repos du signal (λ_r), les longueurs d'onde étant mesurées en angström.

Le spectre ci-dessous est une petite partie du spectre de la galaxie Seyfert Q2125-431 dans la constellation Microscopium. Un astronome a identifié les raies spectrales de l'hydrogène alpha et bêta. »

$$1. \lambda_{0\alpha} = 7\,345 \text{ \AA}; \lambda_{0\beta} = 5\,435 \text{ \AA}.$$

$$2. V_\alpha = 299\,792 \times \frac{7\,345 - 6\,563}{6\,563} = 3,572 \times 10^4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{et } V_\beta = 299\,792 \times \frac{5\,435 - 5\,007}{5\,007} = 2,563 \times 10^4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1},$$

soit en moyenne $3,067 \times 10^4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

3. La vitesse radiale étant positive, cette galaxie s'éloigne de la Terre (ce qui confirme l'expansion de l'Univers).

26 Expérience historique

1. a. Il s'agit de l'effet Doppler.

$$b. f_R = f_{\text{La dièse}} = 466 \text{ Hz}$$

$$2. f_E = f_{\text{La3}} = 440 \text{ Hz}$$

$$V_{\text{train}} = V_S \cdot \left(1 - \frac{f_E}{f_R}\right) = 340 \times \left(1 - \frac{440}{466}\right) = 19,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1},$$

soit $68,3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

Pour aller plus loin

27 Détermination par effet Doppler de la vitesse d'un émetteur sonore qui s'approche

$$1. t_1 = \frac{d}{V}$$

$$2. a. d_E = V_E \cdot T_E$$

$$b. EA = d - V_E \cdot T_E$$

$$c. t_2 = T_E + \frac{d - V_E \cdot T_E}{V}$$

$$3. T_A = t_2 - t_1 = T_E + \frac{d - V_E \cdot T_E}{V} - \frac{d}{V}$$

$$T_A = T_E - \frac{V_E \cdot T_E}{V} = T_E \cdot \left(1 - \frac{V_E}{V}\right)$$

T_A est la durée entre deux signaux consécutifs captés par le récepteur; c'est donc la période de l'onde captée par le récepteur.

$$4. a. f_A = \frac{1}{T_A} = \frac{1}{T_E \cdot \left(1 - \frac{V_E}{V}\right)} = f_E \cdot \frac{V}{V - V_E}$$

$$b. V_E = V \cdot \frac{f_A - f_E}{f_A}$$

28 Détermination par effet Doppler de la vitesse d'un émetteur sonore qui s'éloigne

$$1. t_1 = \frac{d}{V}$$

$$2. a. d_E = V_E \cdot T_E$$

$$b. EB = d + V_E \cdot T_E$$

$$c. t_2 = T_E + \frac{d + V_E \cdot T_E}{V}$$

$$3. T_B = t_2 - t_1 = T_E + \frac{d + V_E \cdot T_E}{V} - \frac{d}{V}$$

$$T_B = T_E + \frac{V_E \cdot T_E}{V} = T_E \cdot \left(1 + \frac{V_E}{V}\right)$$

T_B est la durée entre deux signaux consécutifs; c'est la période de l'onde captée par le récepteur.

$$4. a. f = \frac{1}{T}$$

$$\frac{T_B}{T_E} = \frac{f_E}{f_B} = \left(1 + \frac{V_E}{V}\right)$$

$$b. V_E = V \cdot \left(\frac{f_E}{f_B} - 1\right)$$

29 L'Univers et l'effet Doppler-Fizeau

1. f_E est la fréquence d'une radiation émise par la galaxie.

f_R est la fréquence de la radiation reçue sur Terre.

V_E est la vitesse radiale de la galaxie.

V est la vitesse de la lumière.

2. Si l'émetteur s'éloigne, $\frac{f_E}{f_R} > 1$, la fréquence perçue est inférieure à celle émise.

Si l'émetteur se rapproche, $\frac{f_E}{f_R} < 1$, la fréquence perçue est supérieure à celle émise.

3. La mesure dans le spectre d'émission de la galaxie de la longueur d'onde de la radiation d'un élément connu, par exemple l'hydrogène, permet en la

comparant à la longueur d'onde de la radiation de ce même élément dans le spectre du Soleil de déterminer le mouvement de la galaxie.

La relation $\lambda = \frac{c}{f}$ permet d'écrire :

$$\frac{\lambda_R}{\lambda_E} = 1 + \frac{V_E}{V} \quad \text{ou} \quad \frac{\lambda_R}{\lambda_E} = 1 - \frac{V_E}{V}$$

Si $\frac{\lambda_R}{\lambda_E} > 1$, la galaxie s'éloigne de la Terre.

Si $\frac{\lambda_R}{\lambda_E} < 1$, la galaxie s'approche de la Terre.

4. Si les galaxies s'éloignent les unes des autres, elles doivent initialement provenir d'un même point. L'effet Doppler-Fizeau est en accord avec le Big Bang.

30 Couleurs interférentielles des colibris

1. Les interférences sont constructives si $\delta = k \cdot \lambda$, avec k un nombre entier relatif.

Elles sont destructives si $\delta = \left(k + \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda$, avec k un nombre entier relatif.

2. • Pour la radiation rouge :

$$\delta_R = 2 n_R \cdot e \cdot \cos r + \frac{\lambda_R}{2}$$

$$\delta_R = 2 \times 1,33 \times 0,15 \times 10^{-6} \times \cos 20 + \frac{750 \times 10^{-9}}{2}$$

$$\delta_R = 7,5 \times 10^{-7} \text{ m}$$

$$\delta_R = k \cdot \lambda_R, \text{ avec } k = 1,$$

donc les interférences sont constructives.

• Pour la radiation violette :

$$\delta_V = 2 n_V \cdot e \cdot \cos r + \frac{\lambda_V}{2}$$

$$\delta_V = 2 \times 1,34 \times 0,15 \times 10^{-6} \times \cos 20 + \frac{380 \times 10^{-9}}{2}$$

$$\delta_V = 5,7 \times 10^{-7} \text{ m}$$

$$\delta_V = \left(k + \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda_V, \text{ avec } k = 1,$$

donc les interférences sont destructives.

3. $\delta_V = 2 n_V \cdot e \cdot \cos r + \frac{\lambda_V}{2} = k \cdot \lambda_V$

$$\cos r = \frac{1}{2 n_V \cdot e} \cdot \left[\lambda_V \cdot \left(k - \frac{1}{2}\right) \right]$$

$$\cos r = \frac{1}{2 \times 1,34 \times 0,15 \times 10^{-6}} \times \left[380 \times 10^{-9} \times \frac{1}{2} \right]$$

$$\cos r = 0,473,$$

soit $r \approx 62^\circ$.

Remarque : pour $k = 2$, le rapport est supérieur à 1.

4. Lorsque l'angle d'incidence augmente, d'après la loi de Descartes, l'angle de réfraction augmente, donc la différence de marche change et la longueur d'onde pour laquelle les interférences sont constructives aussi. La couleur observée change donc quand l'angle d'incidence est modifié.

Une couleur interférentielle change lorsque l'on change l'angle d'observation. Une couleur pigmentaire est toujours identique quel que soit l'angle d'observation.

31 Exoplanètes

1. Les astrophysiciens mesurent la longueur d'onde de certaines raies d'absorption sur le spectre de la lumière émise par l'étoile.

2. La vitesse radiale moyenne est de $33,11 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Elle représente la vitesse radiale de l'étoile par rapport à la Terre.

3. a. On mesure 7 périodes en 30 jours, soit :

$$T = 4,3 \text{ j.}$$

b. Cette période semble très faible par rapport à celle de la Terre qui est de 365 jours. Cette planète est donc très proche de son étoile.

32 Spectre d'une étoile lointaine

1. Ils correspondent aux pics d'absorption des différents éléments présents dans l'atmosphère de l'étoile.

2. $\lambda = 4344,9 \text{ \AA}$

$$3. v = 3,00 \times 10^8 \times \frac{4344,9 - 4340,47}{4340,47}$$

$$v = 3,06 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 306 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$$

4. a. On observe un *redshift*, décalage vers le rouge.

b. L'étoile s'éloigne de la Terre.

33 Diffraction par un fil

$$1. \theta \approx \tan \theta = \frac{L}{2D}$$

2. $\theta = \frac{\lambda}{a}$, avec θ en radian, et λ et a en mètre.

3. La courbe $\theta = f\left(\frac{1}{a}\right)$ est une droite passant par l'origine. Or l'expression précédente montre que θ et $\frac{1}{a}$ sont proportionnels (coefficient de proportionnalité λ). La figure 2 est donc bien en accord avec la relation.

4. Le coefficient directeur de la droite représentative de $\theta = f\left(\frac{1}{a}\right)$ est égal à la longueur d'onde λ .

5. Soit le point de la droite de coordonnées $(5,0 \times 10^4 \text{ m}^{-1}; 2,8 \times 10^{-2} \text{ rad})$.

Le coefficient directeur de la droite est :

$$\lambda = \frac{2,8 \times 10^{-2}}{5,0 \times 10^4} = 5,6 \times 10^{-7} \text{ m.}$$

La valeur à retenir est $\lambda = 560 \text{ nm}$.

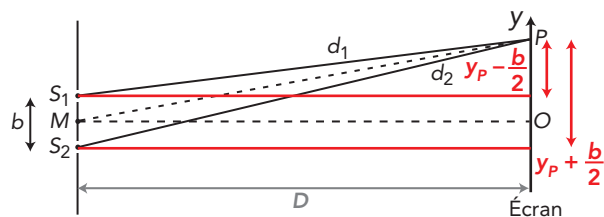
6. La lumière blanche est polychromatique, donc elle contient des radiations de longueurs d'onde différentes qui donneront des taches de largeurs et de positions différentes sur l'écran.

Au centre de l'écran, juste en face du fil, toutes les radiations colorées se superposent; on obtient du blanc.

À l'extérieur de cette tache blanche, seules certaines radiations se superposent; cela crée des zones colorées : des irisations.

34 Les lambdamètres

1. a. On note $\delta = d_2 - d_1$ la différence de marche entre les deux rayons lumineux.



d_1 et d_2 exprimés à l'aide du théorème de Pythagore dans les triangles rectangles correspondants donnent :

$$d_1 = \sqrt{D^2 + \left(y_P - \frac{b}{2}\right)^2}$$

$$d_2 = \sqrt{D^2 + \left(y_P + \frac{b}{2}\right)^2}$$

$$\text{d'où } d_2 - d_1 = \sqrt{D^2 + \left(y_P + \frac{b}{2}\right)^2} - \sqrt{D^2 + \left(y_P - \frac{b}{2}\right)^2}$$

b. On obtient :

$$\delta = D \cdot \left(\sqrt{1 + \left(\frac{y_P + \frac{b}{2}}{D}\right)^2} - \sqrt{1 + \left(\frac{y_P - \frac{b}{2}}{D}\right)^2} \right)$$

avec $y_P \pm \frac{b}{2} \ll D$, donc $\varepsilon = \left(\frac{y_P + \frac{b}{2}}{D}\right)$ et $\varepsilon' = \left(\frac{y_P - \frac{b}{2}}{D}\right)$ très petits.

c. En appliquant l'approximation, on obtient :

$$\delta = D \cdot \left[1 + \left(\frac{y_P + \frac{b}{2}}{D}\right)^2 - 1 - \left(\frac{y_P - \frac{b}{2}}{D}\right)^2 \right]$$

$$\delta = \frac{1}{D} \cdot \left(y_P + \frac{b}{2} - y_P + \frac{b}{2}\right) \cdot \left(y_P + \frac{b}{2} + y_P - \frac{b}{2}\right)$$

$$\delta = \frac{b \cdot y_P}{D}$$

2. Il y a interférences constructives si δ est égal à un nombre entier de longueurs d'onde λ .

On observe donc des franges brillantes pour $y_P = 0$, c'est-à-dire sur l'axe optique du système, puis pour :

$$y_1 = \frac{\lambda \cdot D}{b}; \quad y_2 = 2 \frac{\lambda \cdot D}{b}; \quad y_3 = 3 \frac{\lambda \cdot D}{b}; \quad \text{etc.}$$

Il y a interférences destructives si δ est égal à un nombre impair de demi-longueurs d'onde. On observe alors des franges sombres pour :

$$y_1' = \frac{\lambda \cdot D}{2b}; \quad y_2' = 3 \frac{\lambda \cdot D}{2b}; \quad y_3' = 5 \frac{\lambda \cdot D}{2b}; \quad \text{etc.}$$

D'après ce qui précède, la distance entre deux franges brillantes ou entre deux franges sombres consécutives, appelée interfrange i , s'écrit :

$$i = \frac{\lambda \cdot D}{b}$$

La mesure de i à partir de D et b permet de déterminer expérimentalement la longueur d'onde de la lumière monochromatique utilisée :

$$\lambda = \frac{i \cdot b}{D}$$

Retour sur l'ouverture du chapitre

35 Bulles de savon et iridescence

1. Les ondes sont cohérentes, car elles sont issues de la même source.

2. Pour qu'il y ait interférences constructives, la différence de marche δ doit être un nombre entier de longueurs d'onde :

$$\delta = 2n \cdot e + \frac{\lambda}{2} = k \cdot \lambda,$$

soit : avec $k = 1$, $e = \frac{\lambda}{4n}$

3. a. $e = \frac{1}{2} \times \frac{633 \times 10^{-9}}{2 \times 1,35} = 1,17 \times 10^{-7} \text{ m} = 117 \text{ nm}$

b. $e = \frac{1}{2} \times \frac{488 \times 10^{-9}}{2 \times 1,35} = 9,04 \times 10^{-8} \text{ m} = 90,4 \text{ nm}$

4. Les couleurs dépendent de l'épaisseur du film.

5. À cause de la pesanteur, l'épaisseur est plus fine au-dessus de la bulle que sur le bas de la bulle.

Comprendre un énoncé

36 Radar... et effet Doppler

1. $\lambda' = \lambda - v \cdot T$ et $\lambda = \frac{c}{f}$

Par suite :

$$\frac{c}{f'} = \frac{c}{f} - \frac{v}{f'} \quad \text{soit } f' = f \cdot \frac{c}{c - v}$$

2. $\frac{c}{c - v} > 1$, donc $f' > f$:

le son perçu est donc plus aigu que le son émis.

3. D'après la relation de la question 1 :

$$f' \cdot (c - v) = f \cdot c$$

$$f' \cdot c - f \cdot c = f' \cdot v$$

$$v = \frac{c \cdot (f' - f)}{f'}$$

$$v = \frac{340 \times (716 - 680)}{716} = 17,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 61,5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$$

4. a. $\lambda'' = \lambda + v \cdot T$ et $f'' = f \cdot \frac{c}{c + v}$

b. $\frac{c}{c + v} < 1$, donc $f'' < f$:

le son perçu est donc plus grave que le son émis.