⑤ Effet Doppler

1. a. Voici un exemple de tableau :

Δ*t* (en s)	1,940	2,440	2,840	3,690
Δ*f* (en Hz)	17,40	14,97	12,53	9,45
v_e (en m·s⁻¹)	0,1546	0,1230	0,1056	0,0813

b. On trace le graphique et on obtient ici k = 8,57 mm.

On a $\dfrac{c}{f_r} = \dfrac{340}{40\,000}$ = 8,50 mm. Les valeurs sont proches.

D'après la question précédente :

$$v_E = k \times \Delta f = \frac{c}{f_r} \times \Delta f = c \times \frac{f_R - f_E}{f_R}$$

2. a. Exemple de mesures :

D = 30 cm $\qquad \Delta f$ = 26,2 Hz $\qquad \Delta t$ = 2,62 s

donc $v_{mes} = \dfrac{d}{\Delta t} = \dfrac{0{,}30}{2{,}62}$ = 0,11 m·s^{-1}.

b. Par le calcul : $\quad v = \dfrac{c \times \Delta f}{2 \times f_E} = \dfrac{340 \times 26{,}2}{2 \times 40\,000}$ = 0,11 m·s^{-1}

qui est identique à v_{mes} = 0,11 m·s^{-1}.

Bilan

- On inverse la relation : $\quad f_R = \dfrac{c}{c - v_E} f_E > f_E$
- À l'éloignement, on change le signe devant v_E :

$$f_R = \frac{c}{c + v_E} f_E$$

⑥ L'effet Doppler-Fizeau

1. La sirène d'une ambulance en mouvement : le son perçu se modifie quand elle s'approche et s'eloigne. Si elle s'eloigne le son est plus grave, sa fréquence diminue car sa longueur d'onde augmente.
C'est donc cohérent.

2. La raie d'hydrogène de la galaxie a une longueur d'onde supérieure à celle mesurée sur Terre : la galaxie s'éloigne.

3. D'après le doc. 3, la vitesse est proportionnelle à la distance.

4. $H_0 = \dfrac{26\,500}{400}$ = 66,3 km·s^{-1}·Mpc^{-1}

On en déduit $\dfrac{1}{H_0}$ = 4,66 × 10^{17} s et, en divisant par 365,25 × 24 × 3 600 : $\dfrac{1}{H_0}$ = 14,8 milliards d'années.

5. À la date t, un éclat qui vole à la vitesse v a parcouru la distance $d = vt$ donc $\dfrac{d}{v}$ est indépendant de l'éclat et est égal à la date mesurée depuis l'explosion initiale. $\dfrac{1}{H_0}$ est donc l'âge de l'univers depuis le big bang.

Bilan

- C'est la relation de Doppler : $\quad \lambda_R = \lambda_E\left(1 + \frac{v}{c}\right)$
- La vitesse de la voiture est tellement petite devant la célérité de la lumière que le décalage Doppler-Fizeau est imperceptible.

Exercices

*Exercices **1** à **24** corrigés à la fin du manuel de l'élève.*

*Exercices **25** à **27** corrigés dans le manuel de l'élève.*

*Exercice **28** corrigé à la fin du manuel de l'élève.*

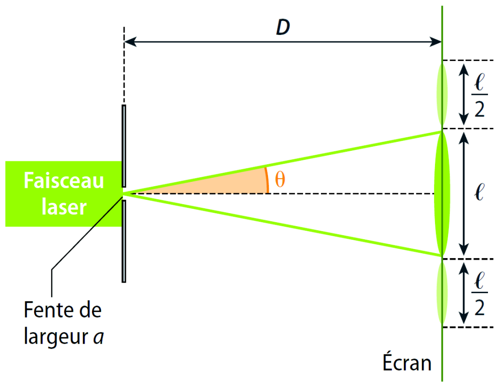
29 $I = I_0 \times 10^{L/10}$ = 1,0 × 10^{-12} × 10$^{75/10}$
I = 3,2 × 10^{-5} W·m^{-2}

*Exercice **30** corrigé à la fin du manuel de l'élève.*

31 $A = L - L' = 10\log\left(\dfrac{I}{I_0}\right) - 10\log\left(\dfrac{I'}{I_0}\right)$
A = 109 – 94 = 15 dB

*Exercice **32** corrigé à la fin du manuel de l'élève.*

33 a.



b. $\theta = \dfrac{\lambda}{a} = \dfrac{532 \times 10^{-9}}{40 \times 10^{-6}}$ = 1,33 × 10^{-2} rad

34 $\theta = \dfrac{\lambda}{a} = \dfrac{d}{2D}$ donc le fil a un diamètre :

$a = \dfrac{2\lambda D}{d} = \dfrac{2 \times 473 \times 10^{-9} \times 3{,}0}{3{,}8 \times 10^{-2}}$ = 7,5 × 10^{-5} m

a = 75 × 10^{-6} m = 75 µm

Exercice ***35*** *corrigé à la fin du manuel de l'élève.*

36 On utilise la formule $i = \frac{\lambda D}{b}$ avec D = 4,0 m

Longueur d'onde	632,8 nm	589 nm	$4{,}75 \times 10^{-7}$ m = 475 nm
Écart entre les trous d'Young	100 µm	$3{,}0 \times 10^{-4}$ m	0,5 mm
Interfrange	0,025 m = 2,5 cm	7,9 mm	$3{,}8 \times 10^{-3}$ m

37 a. Figure du haut : bifentes d'Young
Figure du bas : trous d'Young.
b. Figure du haut : i = 5 mm
Figure du bas : i = 0,4 mm
c. Plus les ouvertures sont proches, plus i est grand, donc c'est dans le second cas qu'elles sont les plus proches.

Exercice ***38*** *corrigé à la fin du manuel de l'élève.*

39 $v = c_{son}\left(1 - \frac{f_E}{f_R}\right) = 340 \times \left(1 - \frac{300}{315}\right)$
$v = 16{,}2\ \text{m·s}^{-1} = 58{,}3\ \text{km·h}^{-1}$

40 $v = \frac{c\delta f}{f_E} = 1{,}3 \times 10^7\ \text{m·s}^{-1}$

Exercice ***41*** *corrigé à la fin du manuel de l'élève.*

42 a. $I = I_0 \times 10^{L/10} = 1{,}0 \times 10^{-12} \times 10^{115/10}$
$I = 0{,}316\ \text{W·m}^{-2}$
b. On peut assister à seulement 28 s de concert !
c. 115 – 30 = 85 dB, on est en dessous du seuil de danger.

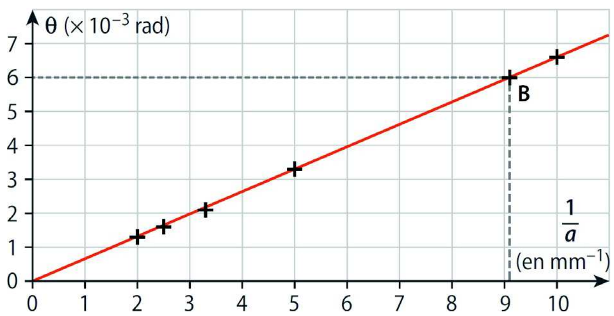
Exercice ***43*** *corrigé à la fin du manuel de l'élève.*

44 $\theta = \frac{\lambda}{a}$

donc $a = \frac{\lambda}{\theta} = \frac{632 \times 10^{-9}}{7{,}00 \times 10^{-3}} = 9{,}03 \times 10^{-5}$ m = 90,3 µm

45 a. On complète le tableau et on trace le graphique.

a (en mm)	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50
θ ($\times 10^{-3}$ rad)	6,6	3,3	2,1	1,6	1,3
$\frac{1}{a}$ (en m^{-1})	$1{,}0 \times 10^4$	$5{,}0 \times 10^3$	$3{,}3 \times 10^3$	$2{,}5 \times 10^3$	$2{,}0 \times 10^3$



b. La courbe obtenue est une droite passant par l'origine ce qui montre que θ est proportionnel à $\frac{1}{a}$.

On a donc $\theta = k \times \frac{1}{a}$, k étant le coefficient directeur de la droite-modèle.
c. $k = \frac{y_B - y_0}{x_B - x_0} = \frac{6{,}0 \times 10^{-3}}{9{,}1 \times 10^3}$
$k = 6{,}6 \times 10^{-7}$ m $= 6{,}6 \times 10^2$ nm
Comme $\theta = k \times \frac{1}{a}$, alors $a = \frac{k}{\theta} = \frac{6{,}6 \times 10^{-7}}{2{,}5 \times 10^{-3}}$
$a = 2{,}6 \times 10^{-4}$ m $= 0{,}26 \times 10^{-3}$ m = 0,26 mm
d. Écart relatif $= \frac{|0{,}26 - 0{,}25|}{0{,}25} = 0{,}040 = 4{,}0\ \%$
Les résultats sont bien cohérents, cette technique de mesure de l'épaisseur est assez fiable.

46 a. La longueur d'onde émise par le laser vert est inférieure à celle émise par le laser rouge. La largeur de la tache centrale est proportionnelle à la longueur d'onde qui diminue donc elle diminue.
b. La largeur de la tache centrale est proportionnelle à la distance D donc elle augmente.
c. La largeur de la tache centrale est inversement proportionnelle à la largeur de la fente. Si la largeur de la fente diminue, alors la largeur de la tache centrale augmente.

47 On peut éliminer $i = \frac{\lambda D^2}{b}$ qui est homogène à une surface et $i = \frac{D}{b}$ qui est sans unité. Comme i est proportionnel à D et λ, ils sont donc au numérateur et b est au dénominateur soit $i = \frac{\lambda D}{b}$.

48 La différence de marche entre les ondes synchrones issues des deux haut-parleurs vaut :
$\delta = H_1O - H_2O = 1$ m
Or la longueur d'onde vaut $\lambda = \frac{c}{f} = 2{,}0$ m donc $\frac{\delta}{\lambda} = 0{,}5$ qui est un demi-entier. Il y a donc interférences destructives et on ne perçoit aucun son.

49 a. L'angle θ est l'écart angulaire.
b. $\theta = \frac{\lambda}{a}$ avec a et λ en mètres et θ en radians.
c. $\tan\theta \approx \theta = \frac{\ell}{2D}$
d. $a = \frac{2\lambda D}{\ell}$
e. $d = \frac{2\lambda D}{\ell} = \frac{2 \times 632{,}8 \times 10^{-9} \times 5{,}00}{5{,}4 \times 10^{-2}} = 1{,}17 \times 10^{-4}$ m

$u(d) = 1{,}17 \times 10^{-4} \times \sqrt{\left(\frac{0{,}1}{5{,}4}\right)^2 + \left(\frac{0{,}02}{5{,}00}\right)^2} = 2 \times 10^{-6}$ m
donc $d = (1{,}17 \pm 0{,}02) \times 10^{-4}$ m.

50 a. Les sources doivent être synchrones, ce qui n'est possible qu'en divisant un faisceau laser en deux.
b. La formule $i = \frac{\lambda D}{b}$ fait apparaître la distance b entre les fentes mais pas leur largeur.
c. C'est parce qu'il y a diffraction au niveau de chaque fente que sur une certaine largeur de l'écran interfèrent les lumières issues des deux fentes.

51 a. $i = \dfrac{\lambda D}{b} = \dfrac{520 \times 10^{-9} \times 2{,}50}{300 \times 10^{-6}} = 4{,}33 \times 10^{-3}$ m

$i = 4{,}33$ mm

b. La largeur de la figure de diffraction est :

$\ell = \dfrac{2\lambda D}{a} = \dfrac{2 \times 520 \times 10^{-9} \times 2{,}50}{60 \times 10^{-6}} = 0{,}043$ m $= 4{,}3$ cm

c. On divise : $\dfrac{\ell}{i} = 9{,}9$

donc on observe 9 (presque 10) franges.

52 a. Le bip se déplace verticalement vers le haut à la vitesse c_{son} donc $z_1(t) = c_{son}t$.

b. Au point de rencontre, le bip et le parachutiste sont à la même altitude.

En résolvant $D - vt = c_{son}t$, on obtient $t_1 = \dfrac{D}{c_{son} + v}$.

c. À la date t, le deuxième bip voyage depuis $(t - T_E)$ à la vitesse c_{son} donc $z_2(t) = c_{son}(t - T_E)$. En résolvant $D - vt = c_{son}(t - T_E)$, on obtient $t_2 = \dfrac{D + c_{son}T_E}{c_{son} + v}$.

d. À la date t, le k-ième bip voyage depuis $(t - kT_E)$ à la vitesse c_{son} donc $z_k(t) = c_{son}(t - kT_E)$. En résolvant $D - vt = c_{son}(t - kT_E)$, on obtient $t_k = \dfrac{D + c_{son} \times kT_E}{c_{son} + v}$.

e. $T_R = \dfrac{c_{son}}{c_{son} + v}T_E$

et $f_R = \dfrac{c_{son} + v}{c_{son}}f_E = \dfrac{340 + \frac{150}{3{,}6}}{340} \times 115 = 129$ Hz

f. $f_R > f_E$, il y a bien mouvement relatif d'approchement.

53 a. $f_R < f_E$, la fréquence reçue est inférieure à la fréquence émise. Cela correspond à un éloignement.

b. Comme $\dfrac{\delta f}{f_E} = 1{,}47 \times 10^{-2}$, on a :

$v = c\dfrac{\delta f}{f_E} = 340 \times (1{,}47 \times 10^{-2}) = 5{,}8$ m·s^{-1}

54 a. $\dfrac{c}{c + v} < 1$ donc $f_R < f_E$.

b. La fréquence diminue donc la longueur d'onde augmente et $\lambda_R > \lambda_E$.

c. La valeur de la longueur d'onde augmente, elle se décale vers les grandes longueurs d'onde, c'est-à-dire le rouge, d'où le terme de redshift.

55 a. C'est l'effet Doppler.

b. $v = c_{son}\left(1 - \dfrac{f_E}{f_R}\right) = 340 \times \left(1 - \dfrac{440}{466}\right) = 19$ m·s^{-1}

c. Quand le train se déplace, la fréquence apparente est plus petite que celle du *la*.

56 a. $v = \dfrac{f_{r,ap} - f_E}{f_E}c = 41{,}6$ m·s^{-1} = 150 km·h^{-1}.

La moto est en infraction.

b. On entre les valeurs de v et de f_E et on vérifie que $f_{r,ap} = 440$ Hz.

c. On entre les valeurs de v et de f_E et on obtient $f_{R,ap} = 344$ Hz. En musique, diminuer la hauteur d'un son revient à diviser sa fréquence par la racine douzième de 2, soit 1,0595. En partant du *fa* # de fréquence 392 Hz, on obtient que le *fa* a pour fréquence 370 Hz, le *mi* 349 Hz. On entend donc un *mi* un peu grave.

57 a. Les taches d'Airy se superposent et on ne peut pas distinguer les deux étoiles.

b. Il faut augmenter le diamètre du miroir.

58 a. À 4,0 kHz, sans implant, Francis reçoit le son avec une perte de 80 dB donc avec un niveau d'intensité sonore L = 100 dB – 80 dB = 20 dB.

Avec implant, il reçoit le son avec une perte de 55 dB donc avec un niveau d'intensité sonore :

$L_{implant}$ = 100 dB – 55 dB = 45 dB

b. Calcul de l'intensité sonore : $I = I_0 \times 10^{L/10}$

Sans implant : $I = 1{,}0 \times 10^{-12} \times 10^{20/10}$

$I = 1{,}0 \times 10^{-10}$ W·m^{-2}

Avec implant : $I_{implant} = 1{,}0 \times 10^{-12} \times 10^{45/10}$

$I_{implant} = 3{,}2 \times 10^{-8}$ W·m^{-2}

59 a. $\lambda = \dfrac{v}{f} = \dfrac{336}{1\,600} = 0{,}210$ m = 21,0 cm

b. On a $H_1M = x$ et $H_2M = d - x$

donc $\delta = d - x - x = d - 2x$.

c. Les interférences sont constructives si :

$\delta = k\lambda = 0{,}21k$ (avec k entier relatif).

Les interférences sont destructives si :

$\delta = \left(k + \frac{1}{2}\right)\lambda = 0{,}21\left(k + \frac{1}{2}\right)$ (avec k entier relatif).

d. • Pour x = 39 cm, on calcule δ = 0,42 m = 0,21k avec k = 2 qui est entier. On est dans le cas d'interférences constructives et le signal est donc à une amplitude maximale.

• Pour x = 86,25 cm, δ = –0,525 m = 0,21k avec k = –2,5 qui est demi-entier, il y a interférences destructives.

• Pour x = 63,5 cm, δ = –0,07 m = 0,21k avec k = –0,33 qui n'est ni entier ni demi-entier, il n'y a donc pas interférence constructive ni destructive.

• Pour x = 107 cm, δ = –0,94 m = 0,21k avec $k \approx$ –4,5 qui est demi-entier, il y a interférences (presque) destructives.

60 a. Télécharger le programme *superpo_corrige.py* accessible via le manuel numérique **enseignant**.

```
# début des lignes à modifier
abscisse=float(input('x = '))
delta=abscisse-(1.20-abscisse)
# fin des lignes à modifier
```

b. On entre la valeur de x et on voit si la courbe rouge a une amplitude double (interférences constructives) ou nulle (destructives).

61 a. On a $\sin\alpha \approx \alpha = \dfrac{\lambda}{a}$ et $\tan\alpha \approx \alpha = \dfrac{L}{D}$.

On en déduit que $\dfrac{\lambda}{a} = \dfrac{L}{D}$ soit $L = \dfrac{\lambda D}{a}$.

b. On a $\lambda_{rouge} > \lambda_{bleu}$ donc $L_{rouge} > L_{bleue}$.

Les franges rouges seront plus décalées par rapport à la tache centrale que les franges bleues. En partant du centre, on verra d'abord les franges bleues, puis les rouges.

62 La lumière blanche est polychromatique. Au centre de la tache centrale, on observe du blanc, par superposition de toutes les taches centrales brillantes pour chaque radiation.

Comme la largeur de la tache est proportionnelle à la longueur d'onde, la tache la plus étroite est la violette et sur les bords de la tache blanche, on a disparition du violet, puis du bleu, du vert, du rouge. Cela explique l'irisation, ou iridescence, par décomposition de la lumière blanche.

63 a. Le maillage est carré, donc la figure est invariante quand on échange les axes x et y.

b. $i = \frac{d}{10}$ d'où $i = (5{,}8 \pm 0{,}1)$ mm.

c. $b = \frac{\lambda D}{i} = \frac{632{,}8 \times 10^{-9} \times 4{,}00}{5{,}8 \times 10^{-3}} = 4{,}36 \times 10^{-4}$ m

$u(b) = 4{,}36 \times 10^{-4} \times \sqrt{\left(\frac{0{,}01}{4{,}00}\right)^2 + \left(\frac{0{,}1}{5{,}8}\right)^2} = 8 \times 10^{-6}$ m

$b = (436 \pm 8) \times 10^{-6}$ m

d. La figure serait, à l'inverse, formée de points deux fois plus espacés verticalement qu'horizontalement.

64 a. C'est la diffraction.

b. $r = 1{,}22 \times \frac{550 \times 10^{-9} \times 19{,}4}{1{,}02} = 1{,}28 \times 10^{-5}$ m

c. $r' = 2 \times r = 2 \times 1{,}28 \times 10^{-5} = 2{,}56 \times 10^{-5}$ mm

Il faut doubler le diamètre de la lentille soit 2,04 m, ce qui n'est pas facilement réalisable.

d. Le rayon est une fonction croissante de la longueur d'onde, donc Bételgeuse donne une tache plus large que Rigel.

e. La tache d'Airy est blanche au centre. La plus petite étant la bleue et la plus grande la rouge, on aura d'abord la disparition de la couleur bleue, et la dernière couleur qui disparaîtra sera le rouge.

Le centre est donc blanc, cerclé de la couleur complémentaire du bleu, c'est-à-dire le jaune, et le bord extérieur est rouge.

*Exercice **65** corrigé à l'adresse* hatier-clic.fr/pct484

66 1. La différence de chemin optique vaut :

$\delta = c \times \frac{T}{2} = \frac{\lambda}{2}$ donc il y a interférences destructives pour les faisceaux issus de l'étoile.

2. Le retard est la somme du retard réel et du retard artificiel $\frac{T}{2}$. On aura des interférences constructives si $\delta = c\tau'$ est un multiple entier de la longueur d'onde

donc si $d\sin\alpha + c \cdot \times \frac{T}{2} = k\lambda$ soit $d\sin\alpha = \left(k - \frac{1}{2}\right)\lambda$

où k est un entier naturel non nul.

3. En remplaçant $\sin\alpha$ par son expression, on trouve bien la condition donnée.

4. La plus petite valeur possible pour l'entier est $k = 1$ donc $d = \frac{D\lambda}{2r} = 1{,}3$ m.

67 1. 1,0 cm sur le schéma correspondent à 1,0 m. Pour l'onde perçue lorsque l'hélicoptère est immobile, cinq longueurs d'onde soit $5\lambda_0$ correspondent à 21 mm sur le schéma donc à 2,1 m

et $\lambda_0 = \frac{2{,}1}{5} = 0{,}42$ m.

Lorsque l'hélicoptère est en mouvement, de même, $\lambda' = \frac{1{,}75}{5} = 0{,}35$ m.

2. $c_{son} = \lambda_0 f_E = 0{,}42 \times 810 = 3{,}4 \times 10^2$ m·s^{-1}

3. $f_R = \frac{c_{son}}{\lambda'} = \frac{3{,}4 \times 10^2}{0{,}35} = 9{,}7 \times 10^2$ Hz

La fréquence augmente, ce qui signifie que l'hélicoptère s'approche.

4. La relation donnée par l'énoncé s'écrit :

$\frac{1}{f_R} = \frac{1}{f_E}\left(1 - \frac{v}{c_{son}}\right)$ donc $(c_{son} - v)f_R = f_E$

donc $v = c_{son}\left(1 - \frac{f_E}{f_R}\right) = 56$ m·s^{-1} soit $v \approx 200$ km·h^{-1}.

68 1.1. La lumière visible a une longueur d'onde comprise entre 400 et 800 nm soit un ordre de grandeur de 10^{-6} m. Le miroir, pour avoir un pouvoir diffractant, doit avoir une dimension comparable à la longueur d'onde, soit 10^{-6} m.

1.2. $\theta = \frac{\lambda}{a}$ avec θ en radians, λ et a en mètres.

1.3. L'écart angulaire est proportionnel à la longueur d'onde. La largeur de la tache centrale est proportionnelle à l'écart angulaire. Sur l'image, pour le vert, $L = 1{,}5$ cm et pour le rouge, $L = 1{,}8$ cm

d'où $\lambda_{vert} = \frac{1{,}5 \times 632{,}8}{1{,}8} = 5{,}3 \times 10^2$ nm.

2.1. Sur l'écran $6i = 9$ cm d'où $i = \frac{9}{6} = 1{,}5$ cm.

2.2. $b = \frac{\lambda D}{i} = \frac{632{,}8 \times 10^{-9} \times 1{,}74}{1{,}5 \times 10^{-2}} = 7{,}34 \times 10^{-5}$ m

$b = 73{,}4$ µm ce qui est proche de 75 µm.

2.3. $N = \frac{6 \times 10^{-2} \times 11 \times 10^{-2}}{(75 \times 10^{-6})^2} = 1{,}2$ millions