

26 Cinémomètre

On voit ci-contre un cinémomètre permettant la mesure de la vitesse de la balle lors de services, au tennis. Elle peut dépasser 250 km·h<sup>-1</sup>.

Les cinémomètres à effet Doppler comprennent un émetteur qui génère une onde électromagnétique de fréquence  $f_0 = 24,125$  GHz, un récepteur qui reçoit cette onde après réflexion sur une « cible », objet ou matière en mouvement à la vitesse  $v$ , et une chaîne de traitement électronique qui produit un signal périodique dont la fréquence  $f_D$ , appelée « fréquence Doppler », a pour expression  $f_D = \frac{2f_0v}{c}$ .



Donnée

Célérité de la lumière dans le vide :  $c = 3,00 \times 10^8$  m·s<sup>-1</sup>

Incertitudes

Pour une série de  $N$  mesures d'une grandeur  $X$ , pour lesquelles on suppose les conditions de répétabilité vérifiées, on admet que :

- la meilleure estimation de la valeur  $x$  de la grandeur  $X$  est égale à la moyenne  $\bar{x}$  des  $N$  valeurs mesurées ;
- la meilleure estimation de l'incertitude de mesure de la grandeur  $X$ , avec un niveau de confiance de 95 % s'écrit :

$$u(x) = 2 \times \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{N}}$$

où  $\sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}}$  est l'écart-type expérimental.

- a L'onde électromagnétique réfléchie est la même que celle qui serait émise par un émetteur virtuel, symétrique de l'émetteur par rapport à la cible. Quelle est la vitesse de cet émetteur virtuel ? Est-on bien dans les conditions requises pour parler d'effet Doppler ?
- b Lors de la mesure de la vitesse d'un véhicule s'approchant d'un cinémomètre immobile sur le bord de la route, on mesure  $f_D = 2\,587$  Hz. Calculer la vitesse  $v$  du véhicule.
- c Dans un processus d'homologation du cinémomètre, une série de 10 mesures a été effectuée sur une cible se déplaçant à  $v = 90,0$  km·h<sup>-1</sup>. Les résultats sont répertoriés dans le tableau ci-dessous.

Mesure n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V (en km·h <sup>-1</sup> )	92,3	89,5	90,8	91,2	88,8	93,4	91,2	88,9	90,1	89,5

Calculer la valeur moyenne  $\bar{v}$  et l'incertitude  $u(v)$ \* de cette série.

Présenter le résultat sous la forme  $v = \bar{v} \pm u(v)$ .

- d Pour le processus considéré, on souhaite disposer d'une incertitude relative inférieure ou égale à 5 %. Cette condition est-elle vérifiée pour la série de mesures précédentes ?

53 Décalage Doppler

Effectuer un calcul

Un son est émis par un émetteur avec une fréquence  $f_E$ . Il est perçu par un récepteur se déplaçant à une vitesse  $v$  par rapport à l'émetteur, avec une fréquence  $f_R = f_E - \delta f$  où le décalage Doppler a pour valeur approchée  $\delta f = \frac{v}{c_{\text{son}}} f_E$ .

- a. Le récepteur s'approche-t-il ou s'éloigne-t-il de l'émetteur ?
- b. Calculer la vitesse du récepteur si  $\frac{\delta f}{f_E} = 0,0147$ .

54 Redshift

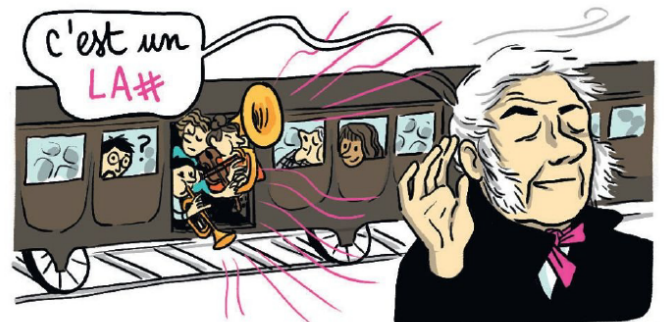
Utiliser un modèle

Une étoile émet une onde électromagnétique de fréquence  $f_E$  et de célérité  $c$ . Elle s'éloigne du système solaire avec une vitesse relative  $v$ .

La fréquence  $f_R$  de l'onde perçue vaut  $f_R = \frac{cf_E}{c + v}$ .

- a. Comparer  $f_R$  et  $f_E$ .
- b. Comparer les longueurs d'onde de l'onde émise  $\lambda_E$  et de l'onde reçue  $\lambda_R$ .
- c. On parle de « redshift » ou « décalage vers le rouge » pour les longueurs d'onde. Justifier cette appellation.

24 Exploiter l'expression du décalage Doppler



En 1845, Buys Ballot engage un groupe de musiciens, les fait monter sur un train et leur demande de jouer une note bien précise : un « La 3 » suffisamment fort pour couvrir le bruit de la locomotive. D'autres musiciens postés le long de la voie ferrée écoutent le groupe et identifient un « La# ».

Note	Fa	Fa#	Sol	Sol#	La	La#	Si
f (Hz)	349	370	392	415	440	466	494

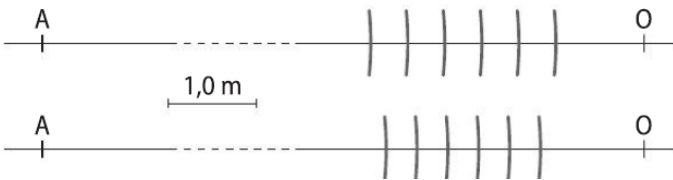
1. L'expérience a-t-elle été réalisée lors de l'approche du train ou lorsque celui-ci s'éloigne ? Justifier.
2. Déterminer la valeur de la vitesse à laquelle le train circule.

## 67 Détermination de la vitesse d'un hélicoptère par effet Doppler

La valeur de la fréquence d'une onde sonore émise par un hélicoptère est  $f_E = 8,1 \times 10^2$  Hz. Pour un observateur immobile sur Terre, la période  $T_R$  de l'onde sonore perçue dépend de la vitesse  $v$  de l'hélicoptère :

$$T_R = T_E \left( 1 - \frac{v}{c_{\text{son}}} \right)$$

Dans les figures suivantes, on représente à un instant donné, la position A de l'hélicoptère, celle O de l'observateur immobile, et des arcs de cercles. Ceux-ci correspondent aux lieux géométriques où la surpression sonore est maximale. La distance qui sépare deux arcs voisins est donc égale à la longueur d'onde, mesurée dans le référentiel du sol. Dans la figure du haut, l'hélicoptère est immobile. Dans la figure du bas, il se déplace à la vitesse  $v$  sur l'axe (AO).



1. Déterminer les longueurs d'onde  $\lambda$  et  $\lambda'$  de l'onde sonore perçue lorsque l'hélicoptère est immobile, puis en mouvement.

2. Calculer la célérité de l'onde sonore.

3. Déterminer la fréquence  $f_R$  du son perçu par l'observateur lorsque l'hélicoptère est en mouvement. Le son perçu est-il plus grave ou plus aigu que le son émis ? L'hélicoptère s'approche-t-il ou s'éloigne-t-il de l'observateur ?

4. Calculer la vitesse  $v$  de l'hélicoptère.

Adapté du sujet de Bac Métropole, 2016.



### DES CLÉS POUR RÉUSSIR

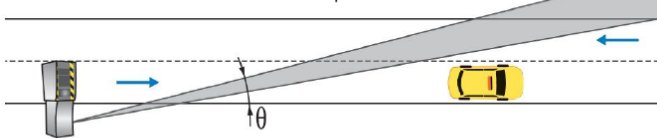
1. On augmente la précision de la mesure de  $\lambda$  en mesurant plusieurs longueurs d'onde.
2. Lorsque l'hélicoptère est immobile, la fréquence perçue est égale à  $f_E$ .
3. Lorsqu'il est en mouvement, la relation entre les périodes donne une relation sur les fréquences.

## 28 Radar automobile

Exploiter la relation du décalage Doppler

Un radar fixe est installé au bord de la route pour contrôler la vitesse des voitures. Pour cela, il utilise l'effet Doppler, il émet des ondes électromagnétiques de fréquence  $f_e = 24,1$  GHz qui sont réfléchies par toute cible se trouvant dans la direction pointée.

Fonctionnement des radars fixes classiques



L'écart de fréquence est donné par la relation  $\Delta f = \frac{2 \times \cos \theta \times f_e \times v}{c}$  où  $\Delta f$  est le décalage en fréquence entre l'onde émise et l'onde réfléchie,  $v$  est la vitesse du véhicule,  $c$  est la célérité des ondes et  $\theta$  l'angle défini sur la figure ci-dessus.

1. Donner un encadrement de la vitesse du véhicule sachant que  $\theta$  peut varier de  $25^\circ$  à  $29^\circ$  et que l'écart de fréquence entre l'onde émise et l'onde réfléchie vaut 5,87 kHz.
2. Expliciter pourquoi lors d'un contrôle radar on réduit la vitesse mesurée de  $5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ .

## 27 Avion de chasse

Tracer un graphique ; effectuer des calculs.

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



À l'instant  $t_0 = 0 \text{ s}$ , un point de l'avion est à la position  $M_0$  de sa trajectoire. À  $t_1 = 0,1 \text{ s}$ , il est en  $M_1$  ; à  $t_2 = 0,2 \text{ s}$ , 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  $t_6 = 0,6 \text{ s}$  : l'avion est en  $M_6$ .

a. Si, aux positions  $M_5, M_4, \dots, M_0$  ont été créées des ondes sphériques acoustiques, quelles distances  $d_5, d_4, \dots, d_0$  ont été franchies par ces ondes à la date  $t_6 = 0,6 \text{ s}$  ?

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  $\lambda'$  et  $\lambda''$ .

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  $\lambda$  la longueur d'onde acoustique dans le référentiel du pilote et  $f$  la fréquence correspondante.

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

Données

$$\lambda' = \lambda - \frac{v}{f} \text{ et } \lambda'' = \lambda + \frac{v}{f}$$