

Exercices d'application

5 minutes chrono !

1. Mots manquants

- fréquence
- 20 Hz ; 20 kHz
- élevée
- timbre
- $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$; dB
- purs ; f ou 220 Hz ; $2f$ ou 440 Hz ; $3f$ ou 660 Hz ; le fondamental ; harmoniques
- spectrale ; harmoniques
- Doppler ; mouvement

2. QCM

- Longitudinale.
 - Son caractère grave ou aigu.
 - 30 dB.
 - $1,0\times 10^{-7} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.
 - Croît de 3 dB par rapport à celui d'un seul instrument.
 - L'amplitude relative en fonction de la fréquence.
-

Compétences exigibles

3. Les ondes ne sont pas audibles par l'homme car les infrasons ont une fréquence trop faible :
 $f < 20 \text{ Hz}$

4. a. Les oscillogrammes ① et ② correspondent à des sons ayant la même hauteur car ils ont la même période (durée d'un motif élémentaire) et donc la même fréquence.
b. Les sons correspondant aux autres oscillogrammes sont plus graves puisque leur fréquence est plus faible (période plus grande).
-

5. a. $L_1 = 10 \log \frac{I_1}{I_0} = 10 \log \frac{8,5 \times 10^{-8}}{10^{-12}} = 49 \text{ dB}$.

b. De même, $L_2 = 81 \text{ dB}$.

c. $L_3 = 1,1 \times 10^2 \text{ dB}$.

6. $L = 10 \log \frac{I}{I_0}$ donc $\frac{L}{10} = \log \frac{I}{I_0}$ soit $10^{\frac{L}{10}} = \frac{I}{I_0}$.

Ainsi :
$$I = I_0 \times 10^{\frac{L}{10}}$$

A.N. :
$$I = 10^{-12} \times 10^{\frac{140}{10}} = 1 \times 10^2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$$

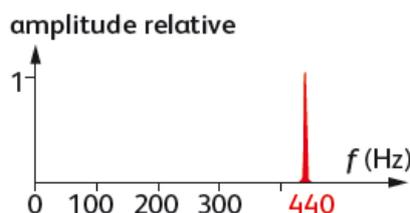
Remarque : cette question est l'occasion d'attirer l'attention sur la règle des chiffres significatifs. La présence du logarithme ou de la puissance de 10 entraîne une réflexion au cas par cas.

Exemple : un écart de 1 dB sur le niveau $L = 140$ dB correspond à une imprécision de $\frac{1}{140} = 0,7\%$, ce qui est raisonnable pour les trois chiffres significatifs donnés.

Pour la valeur $L = 141$ dB, on obtiendrait $I = 10^{-12} \times 10^{14,1} = 1,26 \times 10^2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$; l'écart relatif entre les deux valeurs de I est de l'ordre de 26 %, ce qui justifie le choix de ne garder qu'un chiffre significatif aux valeurs de I ainsi calculées.

7. a. La forme du signal est différente dans ces oscillogrammes : les timbres sont bien différents.

b. Le son émis par un diapason est pur, son spectre a l'allure suivante :



Remarque : la valeur de la fréquence peut être calculée avec l'indication de la sensibilité (1 ms en haut à gauche de l'écran) : $4 \times T = 9 \text{ ms} \rightarrow f = 4,4 \times 10^2 \text{ Hz}$.

8. Le timbre d'un son est lié non seulement à sa composition spectrale mais à l'évolution de celle-ci au cours du temps. Sur un enregistrement, deux sons de timbres différents ont alors des formes différentes et des durées de transitoires d'attaque et d'extinction différentes. C'est le cas de chaque note sur les enregistrements (a) et (b). En retournant chacune des notes, la hauteur reste inchangée (le logiciel ne modifie pas fréquence de chaque note) mais il « remplace » l'attaque par l'extinction de la note en la retournant. Ainsi, dans le cas de l'enregistrement (a) (piano) par exemple, les phases d'extinctions de chaque note sont longues relativement à celles des notes sur l'enregistrement (b) qui sont devenues très courtes lors du retournement d'où la différence de timbre.

9. a. La perception est identique car l'émetteur et le récepteur sont immobiles l'un par rapport à l'autre :

$$f_{\text{récepteur}} = f_{\text{source}}$$

b. La perception est différente car l'émetteur et le récepteur se déplacent l'un par rapport à l'autre. La différence de hauteur est due à l'effet Doppler. La fréquence de l'onde dans le référentiel de la source est différente de celle de l'onde détectée dans le référentiel du récepteur :

$$f_{\text{récepteur}} \neq f_{\text{source}}$$

Comme l'émetteur et le récepteur s'éloignent l'un de l'autre, $f_{\text{Récepteur}} < f_{\text{Source}}$: le son du klaxon perçu par le piéton est plus grave que celui perçu par le conducteur.

Compétences générales

10. a. $L = 10 \log \frac{I}{I_0}$ donc $\frac{L}{10} = \log \frac{I}{I_0}$ soit $10^{\frac{L}{10}} = \frac{I}{I_0}$

Ainsi : $I = I_0 \times 10^{\frac{L}{10}}$

b. Cas du silence :

$$I = 10^{-12} \times 10^0 = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$$

Cas du marteau-piqueur :

$$I = 10^{-12} \times 10^{\frac{110}{10}} = 10^{-12} \times 10^{11} = 10^{-12+11} = 1 \times 10^{-1} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$$

Remarque : cette question est l'occasion d'attirer l'attention sur la règle des chiffres significatifs. La présence du logarithme ou de la puissance de 10 entraîne une réflexion au cas par cas.

Exemple : un écart de 1 dB sur le niveau $L = 110$ dB correspond à une imprécision de $\frac{1}{110} = 0,9\%$, ce qui est raisonnable pour les trois chiffres significatifs donnés.

Pour la valeur $L_2 = 109$ dB, on obtiendrait $I = 10^{-12} \times 10^{10,9} = 7,9 \times 10^{-2} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$; l'écart relatif entre les deux valeurs de I est de l'ordre de 21 %, ce qui justifie le choix de ne garder qu'un chiffre significatif aux valeurs de I ainsi calculées.

c. La sensation auditive comme le niveau d'intensité sonore ne varie pas dans les mêmes proportions que l'intensité sonore.

Remarque : si deux sources génèrent chacune un son d'intensité sonore égale, l'intensité du son résultant double, mais la sensation auditive se traduit par une augmentation de niveau sonore de seulement 3 dB.

11. a. La forme du signal n'est pas sinusoïdale. Le son n'est donc pas pur.

b. $2T \Leftrightarrow n_H = 6 \text{ div} : T = \frac{6 \times 1}{2} = 3,0 \text{ ms}$.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{3,0 \times 10^{-3}} = 3,3 \times 10^2 \text{ Hz}$$

La guitare est accordée sur la note Mi₃.

12. a. Le son est complexe car le spectre traduit, par la présence de plusieurs bâtons, celle de plusieurs harmoniques.

b. La fréquence du fondamental caractérise la hauteur du son. Étant de 220 Hz, la note à attribuer au son est un La₂.

13. a. Ce décalage de fréquence s'explique par l'effet Doppler : l'émetteur et le récepteur se déplaçant l'un par rapport à l'autre, la fréquence de l'onde dans le référentiel de la source est différente de celle de l'onde détectée dans le référentiel du récepteur :

$$f_{\text{récepteur}} \neq f_{\text{source}}$$

b. $v = -\frac{c\Delta f}{2f} = -\frac{3,00 \times 10^8 \times (-13,0 \times 10^3)}{2 \times 34,7 \times 10^9} = 56,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} = 56,2 \times 3,6 = 202 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$

c. $f_{\text{récepteur}} = f_{\text{source}} + \Delta f$ et $\Delta f < 0$ implique : $f_{\text{récepteur}} < f_{\text{source}}$ et donc que la balle s'éloigne du pistolet radar.

Exercices de méthode

14. Exercice résolu.

15. a. $\lambda = cT$.

b. La distance d parcourue pendant T est $d = vT$.

La source s'éloignant du récepteur, la longueur d'onde de la radiation détectée est :

$$\lambda' = \lambda + d \text{ soit } \lambda' = (c + v)T$$

c. $\Delta \lambda = \lambda' - \lambda = (c + v)T - cT = vT$.

Ainsi :

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{vT}{cT} = \frac{v}{c}$$

On retrouve la relation donnée dans l'énoncée.

d. $v = \frac{\pi D}{\Delta t}$ et $\Delta \lambda = \frac{v}{c} \lambda \Rightarrow \Delta \lambda = \frac{\pi D}{c \Delta t} \lambda$

A.N. :
$$\Delta \lambda = \frac{\pi \times 1,4 \times 10^9}{3,00 \times 10^8 \times 25 \times 24 \times 3600} \times 589,0 \times 10^{-9} = 4,0 \times 10^{-12} \text{ m} = 4,0 \text{ pm}$$

16. Dans le manuel élève, la première figure du haut a été corrigée ; l'unique bâton a été déplacé à 440 Hz.

a. Le son 1 est émis par un diapason. C'est un son pur. Son spectre ne contient que le fondamental et prend donc la forme d'un diagramme ne présentant qu'un seul bâton. Le spectre du haut est donc celui du son 1.

La fréquence du fondamental du spectre du milieu est de 110 Hz. Il correspond au son émis par la corde 2 à vide accordée sur la note La. Ce spectre est donc celui du son 2.

En appuyant sur la corde 6, le musicien produit un son plus aigu donc de fréquence supérieure à celle de la note Mi « aigu » donc supérieure à 330 Hz. La fréquence du fondamental sur le dernier spectre correspond à cela puisqu'elle est égale à 440 Hz.

b. La fréquence du fondamental du son 1 et celle du son 3 sont égale : $f = 440$ Hz. Ces sons se distinguent par leur composition spectrale, le son 3 présentant des harmoniques contrairement au son 1 qui ne contient que le fondamental. Les sons 1 et 3 se distinguent donc par leur timbre.

La fréquence du fondamental du son 2 et celle du son 3 sont différente : $f = 440$ Hz pour le son 3 et $f' = 110$ Hz pour le son 2. Les sons 2 et 3 ont des hauteurs différentes.

Ces sons se distinguent également par leur timbre puisque les compositions spectrales sont différentes : l'amplitude relative des harmoniques n'est pas la même d'un spectre à l'autre. On peut citer l'harmonique de rang 3 dont l'amplitude relative est proche de 1 pour le son 2 et proche de 0 pour le son 3.

c. Les sons 2 et 3 ont des hauteurs différentes : le son 2, de fréquence plus faible, correspond à un La plus grave que le son 3.

Exercices d'entraînement

17. a. $L = 10 \log \frac{I}{I_0}$ donc $\frac{L}{10} = \log \frac{I}{I_0}$ soit $10^{\frac{L}{10}} = \frac{I}{I_0}$.

Ainsi :

$$I_1 = I_0 \times 10^{\frac{L_1}{10}} = 10^{-12} \times 10^{\frac{70}{10}} = 1 \times 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

De même :

$$I_2 = 4 \times 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Remarque : cette question est l'occasion d'attirer l'attention sur la règle concernant les chiffres significatifs. La présence du logarithme ou de la puissance de 10 entraîne une réflexion au cas par cas.

Exemple : un écart de 1 dB sur le niveau $L_2 = 76$ dB correspond à une imprécision de $\frac{1}{76} = 1,3$ %, ce qui est raisonnable pour les deux chiffres significatifs donnés.

Pour la valeur $L_2 = 75$ dB, on obtiendrait $I_2 = 10^{-12} \times 10^{7,5} = 3,2 \times 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$; l'écart relatif entre les deux valeurs de I_2 est de l'ordre de 25 %, ce qui justifie le choix de ne garder qu'un chiffre significatif aux valeurs de I ainsi calculées.

b. $L = 10 \log \left(\frac{I_1 + I_2}{I_0} \right) = 10 \log \left(\frac{5 \times 10^{-5}}{10^{-12}} \right) = 77$ dB.

c. En notant n le nombre de violons, $L_1 = 70$ dB étant le niveau sonore mesuré pour un seul violon et $L_n = 90$ dB étant celui correspondant à n violons :

$$L_n = 10 \log \frac{nI_1}{I_0} \text{ donc } \frac{L_n}{10} = \log \frac{nI_1}{I_0} \text{ soit } 10^{\frac{L_n}{10}} = \frac{nI_1}{I_0}$$

Soit :

$$n = \frac{I_0 \times 10^{\frac{L_n}{10}}}{I_1} = \frac{10^{-12} \times 10^{\frac{90}{10}}}{1 \times 10^{-5}} = 1 \times 10^2$$

En multipliant le nombre de violon par cent, on augmente le niveau sonore de 20 dB.

18. a. Bien que les instruments émettent des sons de même hauteur, leur timbre est différent, ce qui permet de les distinguer.

b. Les enregistrements seront différents de par la forme du signal enregistré. Leur point commun est leur fréquence identique (220 Hz) donc leur période (durée d'un motif élémentaire : $T = 4,55$ ms).

c. La note jouée n'est pas un La_2 car la fréquence du fondamental n'est pas de 220 Hz. La fréquence du fondamental étant supérieure (0,4 kHz environ), le musicien produit un son plus aigu.

19. a. La propriété physiologique commune à ces deux sons correspondant à la même note est la hauteur. La grandeur physique associée est la fréquence.

b. Les figures (a) et (c) correspondent à des sons jouant la même note puisque la durée d'un motif élémentaire ou période est la même ($T = 7,5$ ms) donc la fréquence f est la même.

Les formes des signaux sont différentes. La propriété physiologique qui permet de distinguer ces deux sons est le timbre.

c. Pour le son (b), $2T = 7,5$ ms :

$$f = \frac{1}{T} = \frac{2}{7,5 \times 10^{-3}} = 2,7 \times 10^2 \text{ Hz}$$

La fréquence du fondamental est donc :

$$f_1 = f = 2,7 \times 10^2 \text{ Hz}$$

Celles des quatre harmoniques suivants sont :

$$f_2 = 2f_1 = 5,4 \times 10^2 \text{ Hz}$$

$$f_3 = 3f_1 = 8,1 \times 10^2 \text{ Hz}$$

$$f_4 = 4f_1 = 1,1 \times 10^3 \text{ Hz}$$

$$f_5 = 5f_1 = 1,4 \times 10^2 \text{ Hz}$$

d. Pour un son de même hauteur (même fréquence fondamentale) joué par des instruments différents, la différence est liée au spectre de chaque son (nombre et répartition des harmoniques différents) et à l'évolution dans le temps, propre à chaque instrument.

20. a. $\lambda' > \lambda \Leftrightarrow$ il s'agit bien d'un décalage vers les radiations de longueur d'onde plus élevée donc vers le rouge : l'astronome a raison de conclure à un « redshift ».

b. $\lambda' > \lambda \Leftrightarrow f' < f$ soit $f_{\text{récepteur}} < f_{\text{source}}$: l'étoile s'éloigne de l'observateur.

c. $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} \Leftrightarrow v = \frac{c\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{3,00 \times 10^8 \times (656,315 - 656,285) \times 10^{-9}}{656,285 \times 10^{-9}} = 1,37 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

21. a. À $f = 1\,000$ Hz, $L_{\min} = 0$ dB et $L_{\max} = 1,2 \times 10^2$ dB.

Or $L = 10 \log \frac{I}{I_0}$ donc $\frac{L}{10} = \log \frac{I}{I_0}$ soit $10^{\frac{L}{10}} = \frac{I}{I_0}$.

Ainsi :
$$I = I_0 \times 10^{\frac{L}{10}}$$

A.N. :
$$I_{\min} = 10^{-12} \times 10^{\frac{0}{10}} = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

et
$$I_{\max} = 1,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

b. Pour $f_1 = 100$ Hz, le seuil d'audibilité est :

$$L_{\min}(f_1) = 38 \text{ dB}$$

Un son de niveau sonore $L = 30$ dB n'est donc pas audible car $L < L_{\min}(f_1)$.

Par contre, à $f_2 = 500$ Hz, le seuil d'audibilité est :

$$L_{\min}(f_2) = 8 \text{ dB}$$

$L > L_{\min}(f_2)$: le son est audible.

c. En imaginant par interpolation la courbe d'égale sensation auditive passant par le point de coordonnées (500 Hz ; 40 dB), on constate que le point d'abscisse 100 Hz a pour ordonnée 60 dB environ.

Un son de fréquence 100 Hz, et de niveau d'intensité sonore 60 dB, donne la même sensation auditive qu'un son de fréquence 500 Hz à 40 dB.

Sirius T^{erm} S - Livre du professeur
Chapitre 3. Ondes sonores

d. On note n le nombre de machine produisant un son de niveau d'intensité $L_1 = 40$ dB à 500 Hz et d'intensité sonore :

$$I_1 = I_0 \times 10^{\frac{L_1}{10}} = 1,0 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Le seuil de douleur à 500 Hz est $L_{\max} = 1,23 \times 10^2$ dB.

Pour atteindre ce niveau, il faut :

$$L_{\max} = 10 \log \frac{nI_1}{I_0} \text{ donc } \frac{L_{\max}}{10} = \log \frac{nI_1}{I_0} \text{ soit } 10^{\frac{L_{\max}}{10}} = \frac{nI_1}{I_0}$$

Soit :

$$n = \frac{I_0 \times 10^{\frac{L_{\max}}{10}}}{I_1} = \frac{10^{-12} \times 10^{12,3}}{1,0 \times 10^{-8}} = 2,0 \times 10^8$$

Il faut près de 200 millions de machines produisant un son de niveau d'intensité $L_1 = 40$ dB à 500 Hz pour atteindre le seuil de douleur à cette fréquence.

e. La réponse à la question c. apporte un élément d'explication. Un son de fréquence 100 Hz et de niveau d'intensité sonore 62 dB donne la même sensation auditive qu'un son de fréquence 500 Hz à 40 dB. Pour une fréquence inférieure à 1 000 Hz environ, l'oreille humaine est plus sensible aux sons aigus qu'aux sons graves. Ainsi, utilisant des sons plus aigu, une publicité paraît plus sonore qu'un documentaire sonore d'égale niveau sonore mais plus grave. En s'appuyant la réponse à la question c., un son de fréquence 500 Hz à 40 dB donne une sensation auditive supérieure à un son de fréquence 100 Hz de niveau d'intensité 40 dB.

En produisant des sons plus aigus, une publicité peut ainsi apparaître plus sonore tout en respectant la législation en terme de niveau d'intensité sonore.

Remarque : l'article 14 du décret du 27 mars 1992, prévoit que le niveau sonore de la publicité ne doit pas excéder le niveau sonore moyen du reste du programme. En 2005, l'avènement de nouveaux modes de gestion des pistes audio en numérique, ont permis aux annonceurs de trouver la parade augmentant les fréquences des signaux utilisés pour diffuser leur message et en relevant l'amplitude de ceux-ci juste en dessous du niveau maximal autorisé. L'encadrement règlementaire a été modifié en 2010 et précise que, dorénavant, le niveau sonore de la publicité, y compris le traitement de la dynamique sonore, ne doit pas excéder le niveau sonore moyen du reste du programme.

22. a. Pour $v = 98 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$:

$$|\Delta f| = \frac{2v \cos \alpha}{c} \times f = \frac{2 \frac{98}{3,6} \cos 25}{3,00 \times 10^8} \times 34,0 \times 10^9 = 5,6 \times 10^3 \text{ Hz} = 5,6 \text{ kHz}$$

Pour $v = 90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$:

$$|\Delta f| = 5,1 \text{ kHz}$$

b. Avec $\alpha = 9,0^\circ$ au lieu de 25° pour $v = 90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$:

$$|\Delta f| = \frac{2 \frac{90}{3,6} \cos 9,0}{3,00 \times 10^8} \times 34,0 \times 10^9 = 5,6 \text{ kHz}$$

Cette valeur est identique à celle obtenue pour $v = 98 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ avec un radar correctement réglé. Bien que l'automobiliste ne dépasse pas la limite de vitesse autorisée, le radar incorrectement positionné peut déclencher la prise de vue et relever, à tort, une infraction.

23. a. Si la voiture se rapproche de l'auto-stoppeur fixe :

$$v_R = 0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \quad \text{et} \quad f_R = \frac{v}{v - v_E} f_E$$

A.N. :
$$v_E = 90 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1} = \frac{90,0 \times 10^3}{3600} = 25,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Alors :
$$f_R = \frac{340}{340 - 25,0} \times 400 = 432 \text{ Hz}$$
 mettre

b. Si la voiture se rapproche de l'autostoppeur :

$$f_R = \frac{v}{v + v_E} f_E = \frac{340}{340 + 25,0} \times 400 = 373 \text{ Hz}$$

c. La variation relative de la fréquence est au minimum de 13,5 %, ce qui est supérieur à l'écart de 6 % correspondant à un demi-ton entre deux notes. La différence est perceptible.

24. *Dans le manuel élève, la figure (e) a été corrigée ; en effet, elle doit être semblable à la figure (c).*

1. a. Pour augmenter la précision sur la mesure de la période, on mesure la durée de plusieurs motifs élémentaires.

Exemple : $3,5T = 4,0 \text{ ms}$.
$$f = \frac{1}{T} = \frac{3,5}{4,0 \times 10^{-3}} = 8,8 \times 10^2 \text{ Hz}$$

b. La fréquence de l'harmonique de rang 2 est $f_2 = 2f = 1,8 \times 10^3 \text{ Hz}$.

La fréquence de l'harmonique de rang 3 est $f_3 = 3f = 2,6 \times 10^3 \text{ Hz}$.

2. a. L'atténuation est inférieure à 25 dB dans le cas de port de bouchons moulés uniquement.

b. L'atténuation due aux bouchons en mousse augmente lorsque la fréquence augmente. L'atténuation est donc d'autant plus élevée que le son est aigu et d'autant plus faible que le son est grave. Les bouchons en mousse restituent les sons grave, appelés sons « sourds » dans le document.

3. a. La hauteur du son est conservée par les deux types de bouchons puisque la fréquence du fondamentale reste inchangée. Par contre, le port de bouchons en mousse modifie la composition spectrale du son (voir figures (c) et (d) : amplitude relative des harmoniques différentes d'un spectre à l'autre) et donc le timbre, contrairement à celui des bouchons moulés en silicone (voir figures (c) et (e)).

b. Le port de bouchons moulés n'altérant ni le timbre ni la hauteur d'un son, on peut effectivement dire qu'ils conservent les qualités du son.

Exercices de synthèse

25. Réponses aux questions intermédiaires de l'exercice apprendre à chercher

a. Les raies a et g sont à utiliser comme référence pour obtenir une échelle du spectre la plus précise possible.

b. On peut remplir le tableau ci-dessous :

Distance sur le papier	Différence de longueur d'onde en réalité
entre les raies de référence $d_0 = 48,5$ mm	entre les raies de référence $\Delta\lambda_0 = 112,7$ nm
correspondant au décalage Doppler subi par la raie K, matérialisé par la flèche $d = 36$ mm	correspondant au décalage Doppler de longueur d'onde recherché $\Delta\lambda = ?$

c. Ainsi :

$$\Delta\lambda = \frac{d \times \Delta\lambda_0}{d_0} = \frac{36 \times 112,7}{48,5} = 84 \text{ nm}$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} \Leftrightarrow v = \frac{c\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{3,00 \times 10^8 \times 84 \times 10^{-9}}{396,85 \times 10^{-9}} = 6,3 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

26. 1. a. $3T_1 = 3,4$ ms soit :

$$T_1 = \frac{3,4}{3} = 1,13 \text{ ms} \quad \text{et} \quad f_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{3}{3,4 \times 10^{-3}} = 8,82 \times 10^2 \text{ Hz}$$

L'axe des abscisses est gradué toutes les à 0,5 ms. L'incertitude-type sur la mesure de $3T_1$ peut être estimée à :

$$s = \frac{0,5}{\sqrt{12}} = 0,14 \text{ ms}$$

Ainsi, sans tenir compte de l'incertitude élargie :

$$\Delta T_1 = \frac{0,14}{3} = 0,047 \text{ ms, que l'on arrondie à } 0,05 \text{ ms}$$

Or : $\frac{\Delta T_1}{T_1} = \frac{\Delta f_1}{f_1}$ soit $\Delta f_1 = \frac{\Delta T_1}{T_1} f_1 = \frac{0,047}{1,13} \times 8,82 \times 10^2 = 0,37 \times 10^2 \text{ Hz}$, arrondie à $0,4 \times 10^2 \text{ Hz}$.

Finalement, on peut écrire :

$$T_1 = 1,13 \pm 0,05 \text{ ms} \quad \text{et} \quad f_1 = (8,8 \pm 0,4) \times 10^2 \text{ Hz}$$

b. Un encadrement de la valeur de la fréquence f_1 du fondamental est :

$$0,75 \text{ kHz} \leq f_1 \leq 1,0 \text{ kHz}$$

La valeur donnée en **1.a.** est comprise dans cet intervalle.

Valeurs approchées des harmoniques de rang 2 et 3 :

$$f_2 \approx 1,7 \text{ kHz} \text{ et } f_3 \approx 2,5 \text{ kHz}$$

c. $f_2 = 2f_1 = 2 \times 8,8 \times 10^2 = 1,8 \times 10^3 \text{ Hz} \approx 1,7 \text{ kHz}$.

De même, $f_3 = 3f_1 = 3 \times 8,8 \times 10^2 = 2,6 \times 10^3 \text{ Hz} \approx 2,5 \text{ kHz}$.

2. a. Les signaux ont même fréquence (même période) ce que confirme la lecture des spectres : la fréquence du fondamental est la même sur les figures **(b)** et **(d)**. La hauteur du son est identique dans les deux cas.

b. Les formes des signaux sont différentes, ce que confirme la lecture des spectres : les compositions spectrales sont différentes. Par exemple, l'amplitude de l'harmonique de rang 3 est d'environ 0,4 sur le spectre **(b)** et de 0,1 sur le spectre **(d)**.

Les sons se distinguent par leur timbre.

27. Dans le manuel élève, la donnée en fin d'exercice a été corrigée. Le décalage Doppler-Fizeau respecte bien la relation :

$$\frac{|\Delta\lambda|}{\lambda} = \frac{v}{c}$$

a. O se rapprochant de l'observateur terrestre :

$$f_{\text{récepteur}} > f_{\text{source}} \quad \text{et donc} \quad \lambda_{\text{récepteur}} < \lambda_{\text{source}}$$

La partie correspondant à O est donc décalée vers les courtes longueurs d'onde. La partie supérieure de la raie correspond à O. Celle du centre, qui ne subit donc pas de décalage, correspond à S car ce point n'a pas de mouvement relatif par rapport à la terre suivant la direction de visée :

$$f_{\text{récepteur}} = f_{\text{source}}$$

La raie en bordure supérieure est décalée de 3 pixels vers la gauche ($\lambda' < \lambda$) : ainsi, le décalage de longueur d'onde est telle que :

$$\lambda' = \lambda + \Delta\lambda \quad \text{avec} \quad \Delta\lambda = -3 \times 0,099 = -0,30 \text{ nm}$$

$$\lambda' = \lambda + \Delta\lambda = 658,4 - 0,30 = 658,1 \text{ nm}$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} \Leftrightarrow v = \frac{c\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{3,00 \times 10^8 \times 0,30 \times 10^{-9}}{658,4 \times 10^{-9}} = 1,4 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

28. Cet exercice est également proposé dans le dossier Objectif BAC, page 549, en exemple de sujet ECE n°2.

Le fichier image indiqué dans l'énoncé est disponible sur le site élève :

www.nathan.fr/siriuslycee/eleve-termS

Les fiches techniques des logiciels sont à fournir au candidat. Elles sont données ci-après mais sont également disponibles sur le site élève avec l'exercice. Deux exemples de fiche technique sont données ici : une pour le logiciel de traitement d'image SalsaJ et l'autre pour le logiciel de traitement de données Regressi.

FICHE TECHNIQUE DU LOGICIEL SALSALJ (TRAITEMENT D'IMAGES)

- Pour lancer SalsalJ

Cliquer l'icône de raccourci « SalsalJ » :



- Quelques boutons et fonctions associées



Ouvrir un
fichier image



Annuler la dernière
opération



Tracer un trait



Zoom
avant/arrière



Déplacement
dans le cadre
de l'image

- Pour ouvrir un fichier image

- 4) Effectuer « Fichier » puis « Ouvrir » ou cliquer sur le bouton adapté (voir tableau ci-dessus).
- 5) Rechercher le fichier en se déplaçant dans l'arborescence.
- 6) Cliquer sur le fichier désiré puis « Ouvrir ».

- Pour étalonner l'échelle d'une image

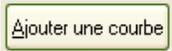
- 1) Tracer un trait entre deux points séparés d'une distance connue. Pour cela, cliquer sur le bouton adapté (voir tableau ci-dessus) puis cliquer et glisser entre les deux points. Penser à utiliser le zoom avant (voir tableau ci-dessus) au préalable pour gagner en précision.
- 2) Dans la barre de menu du logiciel, cliquer « Analyse » et « Indiquer l'échelle... ».
- 3) Compléter ou modifier les informations dans la fenêtre qui apparaît, cocher « Global » puis cliquer « OUI ».

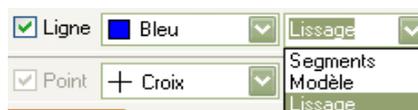
- Pour obtenir le graphe donnant l'intensité des pixels d'une image le long d'une ligne

- 1) Tracer un trait le long de la ligne désiré. Pour cela, cliquer sur le bouton adapté (voir tableau ci-dessus) puis cliquer et glisser entre les deux points. Penser à utiliser le zoom avant (voir tableau ci-dessus) au préalable pour gagner en précision.
- 2) Dans la barre de menu du logiciel, cliquer « Analyse » et « Coupe ».
- 3) Déplacer le pointeur sur le graphe qui apparaît pour accéder au coordonnées des points.
- 4) Cliquer le bouton « Liste » dans la fenêtre du graphique permet d'accéder aux coordonnées de chaque pixel de la ligne tracée.

Remarque : la valeur de l'abscisse tient compte de l'étalonnage de l'échelle de l'image si celui-ci a été réalisé au préalable.

FICHE TECHNIQUE DU LOGICIEL *REGRESSI* (TRAITEMENT DE DONNÉES)

- Pour lancer *Regressi*
Cliquer l'icône de raccourci « *Regressi* » : 
- Pour préparer un tableau de données saisies au clavier
 - 1) Effectuer « Fichier » puis « Nouveau » et « Clavier »
 - 2) Renseigner chaque ligne de la fenêtre qui apparaît :
 - nom des grandeurs, dont les valeurs seront saisies au clavier ;
 - unité. Choisir celle du système international et pas un sous multiple. Exemple : m et non km ;
Remarque : les lettres grecs sont accessibles par la touche Ctrl.
Exemple : Ctrl + Maj + w permet d'écrire Ω .
 - ne pas indiquer de minimum et de maximum.
 - 3) Cliquer « OK » une fois le nom de chaque grandeur et unité bien définies.
 - 4) Saisir les valeurs au clavier. La puissance de 10 se note « E ». Exemple : pour $2,0 \times 10^{-3}$, taper « 2E-3 ».
- Pour créer une grandeur
 - 1) Dans la fenêtre du tableur, cliquer sur l'icône « Y+ ».
 - 2) Choisir le type de grandeur (expérimentale, calculée, dérivée...) puis entrer le nom de la grandeur et son unité, pas de commentaire sauf si cela est demandé.
 - 3) Entrer la formule permettant le calcul de la nouvelle grandeur (la puissance de 10 se note "E"). Valider.
- Pour supprimer ou modifier l'expression d'une grandeur créée
 - 1) Dans la fenêtre du tableur, mettre l'intercalaire « Expressions » au premier plan.
 - 2) Supprimer ou modifier l'expression de la grandeur.
 - 3) Effectuer une mise à jour en cliquant sur l'icône  qui clignote.
- Pour afficher une courbe
 - 1) Dans la fenêtre du grapheur, cliquer sur l'icône « Coordonnées ». 
 - 2) Choisir la grandeur à placer en abscisse puis la grandeur à placer en ordonnée.
Cliquer sur  si plusieurs grandeurs doivent être en ordonnée.
 - 3) Choisir le type de tracé (points et/ou lignes : segments, modèle, lissage) et valider.



- Pour modéliser une courbe

- 1) Dans la fenêtre du grapheur, afficher uniquement la courbe à modéliser
- 2) Cliquer sur l'icône « Modélisation » (icône ci-contre) pour ouvrir l'encadré destiné à saisir l'expression du modèle.
- 3) Il y a alors deux possibilités :
 - 1^{re} possibilité : dans l'encadré blanc de la fenêtre de modélisation qui apparaît, saisir au clavier l'expression du modèle. Effectuer une mise à jour en cliquant sur l'icône  qui clignote ;
 - 2^e possibilité : dans la fenêtre de modélisation qui apparaît, cliquer sur l'icône « Modèle prédéfini » et choisir parmi les neuf modèles proposés celui qui convient le mieux à la courbe que l'on souhaite modéliser puis valider.
- 4) Ajuster.
- 5) Les paramètres de la modélisation apparaissent (expression du modèle, valeurs numériques des coefficients, erreurs...).

- Pour accéder aux coordonnées d'un point du graphe

Dans la fenêtre du grapheur, cliquer sur la flèche  « Outils gr. » en haut à gauche pour dérouler le menu « Outils graphiques » ou « Curdeur » et choisir  Réticule .
Les coordonnées du curseur sont indiquées en bas à gauche de la fenêtre graphique.

Remarques

Pour affiner le déplacement, appuyer sur les flèches du clavier plutôt que de déplacer la souris.

Pour accéder à l'écart horizontal (de durée par exemple, si l'axe des abscisses est un axe des temps t) entre deux points, cliquer sur le point de départ, et sans relâcher la pression sur le clic gauche de la souris, aller jusqu'au deuxième point. Sans relâcher la pression, lire l'écart en bas à gauche de la fenêtre graphique (exemples : « $\delta t = \dots$ » ou « $\Delta t = \dots$ »).

Résultats du travail à effectuer par le candidat

1. a. Protocole 1

Lancer le logiciel de traitement d'images *SalsaJ* puis ouvrir le fichier contenant l'image du spectre présenté dans les documents au format jpeg. Agrandir la fenêtre.

Étalonner l'échelle du spectre d'Hydra en utilisant les raies de longueurs d'onde connues. Pour gagner en précision, penser à utiliser les raies les plus éloignées : ici, a et g avec :

$$\lambda_g - \lambda_a = 112,7 \text{ nm}$$

Mesurer le décalage Doppler $\Delta\lambda$ de longueur d'onde de la raie H. Pour cela, obtenir le graphe donnant l'intensité lumineuse de chaque pixel le long d'une ligne passant par-dessus la flèche matérialisant ce décalage et l'utiliser pour déterminer la longueur de cette flèche.

En déduire les valeurs de $\lambda' = \lambda + \Delta\lambda$ (avec $\lambda = 396,85 \text{ nm}$ d'après l'énoncé) et $v = \frac{c\Delta\lambda}{\lambda}$.

b. $\lambda' = \lambda + \Delta\lambda = 396,85 + 83 = 469,85 \text{ nm}$.

c. Vitesse v de la récession d'Hydra :

$$v = \frac{c\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{3,00 \times 10^8 \times 83 \times 10^9}{396,85 \times 10^9} = 6,3 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

2. a. Protocole 2

Renouveler le protocole 1 dans le cas des quatre autres galaxies.

Consigner les résultats dans le tableau.

Utiliser le logiciel de traitement de données pour tracer la courbe $v = f(D)$ et la modéliser.

b. Résultats obtenus après la mise en œuvre du protocole :

Galaxie	Hydra	Bootes	Corona Boréalis	Ursa Major	Virgo
$D \text{ (m)}$	$2,4 \times 10^{25}$	$1,4 \times 10^{25}$	$1,0 \times 10^{25}$	$4,5 \times 10^{24}$	$1,3 \times 10^{24}$
$v \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$	$6,3 \times 10^7$	$4,0 \times 10^7$	$2,5 \times 10^7$	$1,7 \times 10^7$	$0,4 \times 10^7$

NB : valeurs de $\Delta\lambda$

83 nm

53 nm

33 nm

22 nm

5 nm

v en ordonnée et D en abscisse. $v = H_0 \times D$.

c. Le modèle convient. L'écart relatif est de 7,4 %. Il est inférieur à 15 %.

$$H_0 = (2,69 \pm 0,27) \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}$$

D'après le document, $H_0 = 77 \text{ (km/s)/Mpc}$ avec une incertitude de 15 %.

Dans le système d'unité international :

$$H_0 = \frac{77 \times 10^3}{3,086 \times 10^{16} \times 10^6} = 2,5 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1} \text{ avec une incertitude de 15 \%}$$

ce qui signifie que : $2,1 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1} \leq H_0 \leq 2,9 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}$

La valeur que nous avons obtenue appartient à cet encadrement. Elle est donc compatible avec la valeur de la constante Hubble du texte introductif.

FICHE D'ÉVALUATION

Compétences expérimentales	Exemples de compétences contextualisées	Question	Évaluation A, B, C ou D
S'approprier	Extraire et exploiter les informations présentes dans l'énoncé du sujet afin de comprendre les objectifs fixés	2.c.	
Analyser	Concevoir un protocole	1.a.* et 1.b.*	
Réaliser	Suivre un protocole, utiliser le matériel (dont l'outil informatique) de manière adaptée, effectuer des mesures avec précision (zoom, pointage précis...)	Mise en œuvre des protocoles	
Valider	Exploiter des résultats expérimentaux et valider le choix du modèle, commenter, porter un jugement critique sur le résultat de la mesure de H_0	1.b., 1.c., 2.b. et 2.c.	
Communiquer	Utiliser les notions et le vocabulaire scientifique adaptés, présenter et formuler une argumentation de manière cohérente complète et compréhensible	Cette compétence est transversale : elle est mobilisée sur l'ensemble de l'épreuve sans être nécessairement évaluée	
Être autonome et faire preuve d'initiative	Travailler seul avec discernement et responsabilité, prendre des initiatives, demander une aide pertinente	Cette compétence est transversale : elle est mobilisée sur l'ensemble de l'épreuve en participant à la définition du niveau de maîtrise des autres compétences	

Niveau A : le candidat a réalisé l'ensemble du travail demandé de manière satisfaisante selon les critères précisés dans le sujet ou avec une ou deux interventions de l'examineur, concernant des difficultés identifiées et explicitées par le candidat et auxquelles il apporte une réponse quasiment de lui-même.

Niveau B : le candidat a réalisé l'ensemble du travail demandé de manière satisfaisante selon les critères précisés dans le sujet mais avec quelques interventions de l'examineur concernant des difficultés ou erreurs non identifiées par le candidat mais résolues par celui-ci :

- après avoir réfléchi suite à un questionnement ouvert mené par l'examineur ;
- ou par l'apport d'une solution partielle dans le cas d'une compétence affectée d'un fort coefficient.

Niveau C : le candidat reste bloqué dans l'avancement de la tâche demandée, malgré les questions posées par l'examineur. Des éléments de solutions lui sont apportés, ce qui lui permet de poursuivre la tâche.

Niveau D : le candidat a été incapable de réaliser la tâche demandée malgré les éléments de réponses apportés par l'examineur. Cette situation conduit l'examineur à fournir une solution complète de la tâche : par exemple un protocole à réaliser ou des valeurs à exploiter pour permettre l'évaluation des autres compétences du sujet.

29. Rédiger une synthèse de documents

Rédiger une synthèse de documents (ou de connaissances) consiste à extraire des informations de documents ou de connaissances et à les mettre en relation pour répondre à une problématique. Elle est parfois guidée, comme c'est le cas ici, mais le guide ne donne que certains éléments attendus. Les réponses apportées en suivant le guide ne sont pas forcément les seules à fournir et surtout, elles doivent être liées les unes aux autres pour constituer la rédaction de la synthèse.

La rédaction d'une synthèse ne fait pas appel à d'autres sources, comme le dictionnaire ou Internet. Les documents, le cours et la culture générale suffisent à sa rédaction.

Eléments attendus	Exemples	
<p>Réponses à l'aide à aux questions du guide « aide à la rédaction »</p>	<p>1. Deux difficultés pour la détection directe</p> <p>2. Objectif de la synthèse</p> <p>3. Observation concernant la position de raies</p> <p>4. Utilisation de l'effet Doppler</p> <p>5. Confirmation</p> <p>6. Mise en relation : connaissances + docs 2 et 3</p> <p>7. Interprétation des observations précédentes en utilisant le document 4</p> <p>8. Éléments permettant de détecter la présence de l'exo-planète</p>	<p>Doc 1 : petite taille et faible luminosité par rapport à l'étoile</p> <p>Expliquer comment l'effet Doppler permet de mettre en évidence la présence d'une exo-planète autour de l'étoile étudiée</p> <p>Doc 2 : déplacement (périodique) des raies d'absorption</p> <p>Connaissances : mouvement (périodique) de la source par rapport au récepteur</p> <p>Doc 3. : évolution périodique de v</p> <p>La mesure du décalage Doppler de longueur d'onde permet de calculer la valeur v de la vitesse radiale de l'étoile dans la direction de visée.</p> <p>Doc 4. : le caractère périodique de l'évolution de v peut-être associée au mouvement de révolution de l'étoile causée par la présence d'une exoplanète en révolution autour de l'étoile</p> <p>La détection d'une exoplanète s'appuie sur l'observation du spectre de la lumière provenant de l'étoile. La présence d'une exoplanète de masse suffisamment grande et à proximité d'une étoile entraîne un mouvement de révolution de l'étoile et un décalage Doppler périodique de longueur d'onde des raies</p>
<p>Rédaction</p>	<p>Structure et documents cités</p> <p>Extraction des informations : pertinence exactitude intégralité</p> <p>Expression :</p> <p>lien</p> <p>réponse à la problématique</p>	<p>Introduction avec réponses 1 et 2 Développement avec réponses 3 à 7 Conclusion avec 8</p> <p>Absence d'information non nécessaire et place correcte de l'information utile dans l'argumentation</p> <p>Pas de déformation de l'information (ne pas lui faire dire autre chose et encore moins le contraire)</p> <p>Toutes les informations à extraire sont présentes (ici 1,2, 3, 4, 7)</p> <p>Orthographe, formulation, argumentation (cause → conséquence), paraphrase évitée (ou copier/coller), concision (30 lignes max)</p> <p>Liaison logique entre les différentes parties (pas de 1, 2, 3...) + mise en relation des informations pour répondre à la problématique</p> <p>Réponse claire mettant en évidence la compréhension du sujet traité</p>