La physique au service de l'acoustique des théâtres antiques

Bac S 2010 Antilles-Guyane (ancien programme) · Exercice 3 **4 points** **Durée conseillée 52 min**

1 Le son est une onde mécanique progressive. Définir ce terme.

Une onde mécanique progressive est la propagation d'une perturbation dans un milieu matériel, de proche en proche, avec transport d'énergie mais sans transport de matière.

PIÈGE
Oublier « milieu matériel » : c'est ce qui rend l'onde mécanique. Le son ne se propage pas dans le vide.

2 Dans un espace à combien de dimensions se propage une onde sonore ?

L'onde sonore se propage dans toutes les directions de l'air : c'est une onde à **trois dimensions**.

COMPRENDRE
Une onde le long d'une corde est à une dimension ; les rides à la surface de l'eau, à deux dimensions.

1.1 Définir en une phrase ce qu'est la longueur d'onde λ.

La longueur d'onde λ est la distance dont l'onde périodique progresse pendant une période T.

COMPRENDRE
Définition équivalente : c'est la plus petite distance séparant deux points du milieu qui vibrent en phase. C'est celle-ci qui sert à mesurer λ sur un cliché (question 3.3).

1.2 Donner la relation entre la longueur d'onde λ, la célérité v et la fréquence f d'une onde.

Pendant une période $T = \dfrac{1}{f}$, l'onde parcourt $\lambda = v\,T$, donc :

$\lambda = \dfrac{v}{f}$, avec λ en m, v en $\mathrm{m \cdot s^{-1}}$ et f en Hz.

1.3 En déduire que la longueur d'onde des ultrasons est inférieure à celle des sons moyens de la voix. Justifier précisément.

Données utiles sons audibles : $20\ \mathrm{Hz} \leqslant f \leqslant 20\ \mathrm{kHz}$; ultrasons : $f > 20\ \mathrm{kHz}$; $v = 340\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$ pour les deux

La voix est un son audible : $f_{\text{voix}} < 20\ \mathrm{kHz} < f_{\text{US}}$.

Les deux types d'ondes ont la même célérité v dans l'air, et $\lambda = \dfrac{v}{f}$: à v fixée, λ est inversement proportionnelle à f.

$f_{\text{US}} > f_{\text{voix}}$ donc $\lambda_{\text{US}} < \lambda_{\text{voix}}$.

PIÈGE
La comparaison des fréquences ne suffit pas. Il faut écrire que la célérité est la même pour les deux ondes, sinon on ne peut rien conclure sur λ .

1.4 Justifier l'intérêt d'utiliser des ultrasons pour une simulation avec une maquette.

Une maquette reproduit le théâtre à échelle réduite. Pour que l'onde s'y comporte comme le son dans le théâtre réel (réflexions, obstacles), sa longueur d'onde doit être réduite dans le même rapport que les dimensions.

La célérité étant inchangée, une longueur d'onde plus petite impose une fréquence plus grande : il faut des ultrasons.

COMPRENDRE
Le comportement d'une onde devant un obstacle dépend du rapport entre λ et la taille de l'obstacle. Garder ce rapport, c'est garder la même acoustique.

1.5 Définir ce qu'on appelle un milieu dispersif.

Un milieu est dispersif si la célérité des ondes qui s'y propagent dépend de leur fréquence.

1.6 L'air est-il un milieu dispersif pour les ondes sonores et ultrasonores ? Justifier.

Données utiles $v = 340\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ pour les sons de la voix et pour les ultrasons

D'après l'énoncé, les sons audibles et les ultrasons, de fréquences différentes, ont la même célérité dans l'air.

La célérité ne dépend pas de la fréquence : l'air n'est **pas dispersif** pour ces ondes.

COMPRENDRE
Heureusement : dans un milieu dispersif, les graves et les aigus d'une même parole n'arriveraient pas ensemble au dernier rang.

2.1 Évaluer le retard τ entre l'émission et la réception du top par le microphone.

Données utiles $D = 68\ \text{cm}$; $v = 340\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

Le top parcourt la distance D à la célérité v : $\tau = \dfrac{D}{v}$, avec $D = 0{,}68\ \text{m}$.

$$\tau = \frac{0{,}68}{340} = \frac{68 \times 10^{-2}}{34 \times 10^{1}} = 2{,}0 \times 10^{-3}\ \text{s}$$

$\tau = 2{,}0 \times 10^{-3}\ \text{s} = 2{,}0\ \text{ms}$

PIÈGE
Laisser D en centimètres : on trouverait $0{,}20$ s, cent fois trop.

COMPRENDRE
Deux chiffres significatifs, comme D. Sans calculatrice, écrire les nombres avec des puissances de dix : $68 \div 34 = 2$ se fait de tête.

2.2 Comparer les résultats des trois expériences en termes d'amortissement de l'écho.

Expérience 1 (couvercle) : les échos gardent longtemps une grande amplitude, ils sont peu amortis.

Expérience 2 (couvercle avec moquette) : l'amplitude des échos décroît plus vite.

Expérience 3 (sans couvercle) : après le signal direct, il ne reste presque plus d'échos.

L'amortissement des échos augmente de l'expérience 1 à l'expérience 3.

MÉTHODE
« Comparer » des enregistrements : décrire chacun avec le même critère (ici l'amplitude des échos et sa décroissance), puis les classer.

2.3 Quelle est la situation la plus intéressante d'un point de vue acoustique ? Justifier.

Les échos se superposent au son direct et le brouillent : le son est d'autant plus net qu'ils sont amortis.

La situation la plus intéressante est l'expérience 3, sans couvercle, où les échos sont les plus faibles.

COMPRENDRE
C'est le cas du théâtre antique, à ciel ouvert : le son qui part vers le haut ne revient pas.

2.4 Justifier que le plafond des salles de concert est toujours recouvert de dalles alvéolées constituées d'un matériau très absorbant.

Une salle de concert a un plafond, comme la maquette avec couvercle : il renvoie des échos (expérience 1). Un revêtement absorbant les atténue (expérience 2).

Les dalles absorbantes amortissent les ondes réfléchies par le plafond, pour se rapprocher de la situation sans couvercle.

3.1 Les ondes créées par le vibreur à la surface de l'eau sont-elles longitudinales ou transversales ? Justifier.

La pointe frappe verticalement : la perturbation de la surface est verticale. L'onde se propage horizontalement, à la surface de l'eau.

La direction de la perturbation est perpendiculaire à la direction de propagation : l'onde est **transversale**.

COMPRENDRE
L'onde sonore, elle, est longitudinale : les tranches d'air vibrent dans la direction de propagation. La cuve à ondes est un modèle commode, pas une copie exacte du son.

3.2 En comparant les images des deux expériences, expliquer en quoi un mur plan est gênant pour la réception sonore dans les gradins.

Expérience 2 (mur alvéolé) : les rides circulaires centrées sur la pointe sont nettes et régulières, comme s'il n'y avait pas de mur.

Expérience 1 (mur plan) : l'onde réfléchie, qui semble venir de B, se superpose à l'onde issue de A. Les rides circulaires ne sont plus nettes : la surface est brouillée.

Avec un mur plan, le spectateur reçoit le son direct mêlé à un écho marqué, renvoyé par le mur : le son perçu est brouillé.

COMPRENDRE
Deux ondes de même fréquence qui se superposent se renforcent en certains points et s'annulent en d'autres : ce sont des interférences. La réception dépendrait alors de la place occupée.

3.3 À l'aide du cliché de l'annexe et de son échelle, déterminer le plus précisément possible la longueur d'onde λ, en expliquant la méthode.

Données utiles sur le cliché, un segment représente 10 cm

Deux rides sombres consécutives sont séparées par une longueur d'onde. Pour être précis, on mesure à la règle, le long d'un rayon, la distance occupée par 10 longueurs d'onde (11 rides), puis la longueur du segment d'échelle.

On constate que 10 longueurs d'onde occupent 1,5 fois la longueur du segment de 10 cm :

$$10\,\lambda = 1{,}5 \times 10\ \text{cm} = 15\ \text{cm}$$

$$\lambda = \frac{15}{10} = 1{,}5\ \text{cm}$$

PIÈGE
Compter les rides au lieu des intervalles : 11 rides délimitent 10 longueurs d'onde.

COMPRENDRE
Les longueurs en centimètres sur la feuille dépendent de l'impression ; seul leur rapport compte. Une valeur entre 1,4 et 1,6 cm, issue d'une mesure soignée, est correcte.

MÉTHODE
Mesurer plusieurs longueurs d'onde d'un coup divise l'incertitude de lecture par le nombre d'intervalles. Mesurer loin de la pointe, là où les rides sont régulières.

3.4 En analysant les expériences 1 et 2, justifier la forme du pulpitum ainsi que la présence de niches et de colonnes dans le mur des théâtres antiques.

Expérience 1 : une paroi plane renvoie un écho net, comme une seconde source, qui perturbe l'onde directe.

Expérience 2 : une paroi alvéolée disperse l'onde réfléchie dans de nombreuses directions ; l'onde directe reste nette.

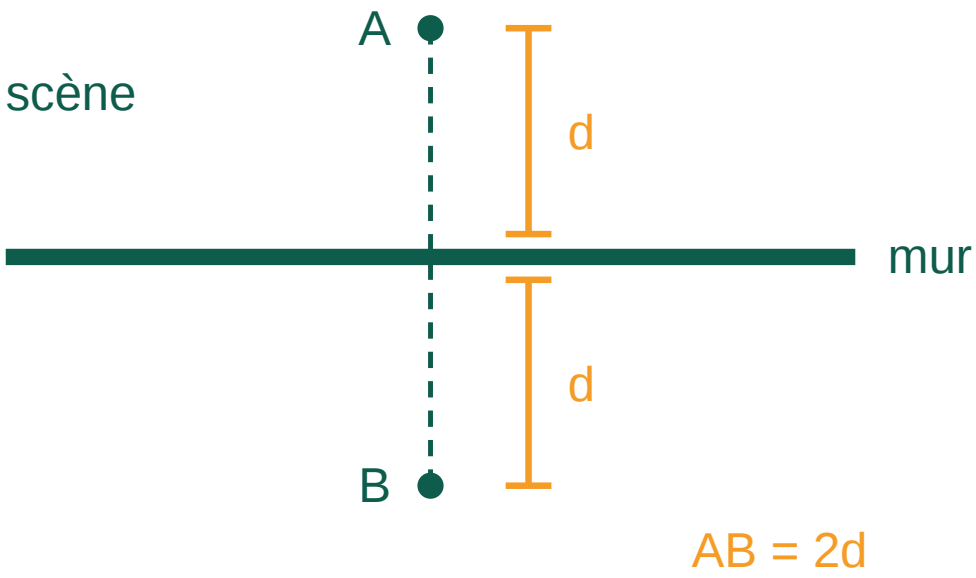
Sur le schéma 1, le pulpitum n'est pas une simple paroi plane : il présente des renfoncements. Les niches et les colonnes font de même du mur de scène une surface irrégulière.

Pulpitum, niches et colonnes jouent le rôle des alvéoles : ils évitent les échos nets qui brouilleraient le son dans les gradins.

3.5.1 L'orateur est en A, à la distance d du mur de fond de scène. Exprimer la distance AB en fonction de d.

B est le symétrique de A par rapport au mur : B est aussi à la distance d du mur, de l'autre côté.

$$AB = 2d$$



3.5.1 · L'orateur A et la source fictive B, symétriques par rapport au mur

3.5.2 En déduire l'expression, en fonction de d et de v, du retard Δt entre l'onde émise par l'orateur en A et l'onde réfléchie par le mur, qui semble issue de B.

Données utiles $AB = 2d$ (3.5.1)

L'onde réfléchie semble partir de B en même temps que l'onde directe part de A. Pour un spectateur, elle parcourt donc la distance $AB = 2d$ en plus, à la célérité v.

$$\Delta t = \frac{AB}{v} = \frac{2d}{v}$$

COMPRENDRE
En réalité, le son va de A au mur puis revient : un aller-retour de longueur $2d$. La source fictive B donne le même résultat.

3.5.3 Déterminer la profondeur maximale $d_{\max}$ de la scène qui permet à la parole de rester nettement compréhensible.

Données utiles durée d'une consonne : $\frac{1}{25}$ s ; $v = 350 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $\Delta t = \frac{2d}{v}$ (3.5.2)

L'écho doit arriver avant la fin de l'émission de la consonne : $\Delta t \leqslant \frac{1}{25}$ s.

$$\frac{2d}{v} \leqslant \frac{1}{25} \iff d \leqslant \frac{v}{50}$$

$$d_{\max} = \frac{350}{50} = 7{,}0 \text{ m}$$

$d_{\max} = 7{,}0$ m, en accord avec la conclusion de l'énoncé (profondeur généralement inférieure à 6,50 m).

PIÈGE
Écrire $\Delta t = \frac{d}{v}$ en oubliant le facteur 2 : on trouverait 14 m, une scène deux fois trop profonde.

MÉTHODE
Terminer par une confrontation avec une valeur du sujet quand il en donne une : ici 6,50 m, juste sous la limite calculée.