

Exercice 1 – Le LASER au quotidien (7,5 points)

Saviez-vous que si vous regardez des DVD, naviguez sur le web, scannez les codes barre et si certains peuvent [suite à une opération] se passer de leurs lunettes, c'est grâce à l'invention du LASER, il y a 50 ans !

Intéressons-nous aux lecteurs CD et DVD qui ont envahi notre quotidien. La nouvelle génération de lecteurs comporte un laser bleu (le blu-ray) dont la technologie utilise une diode laser fonctionnant à une longueur d'onde $\lambda_B = 405 \text{ nm}$ d'une couleur bleue (en fait violacée) pour lire et écrire les données. Les CD et les DVD conventionnels utilisent respectivement des lasers infrarouges et

rouges. Les disques Blu-ray fonctionnent d'une manière similaire à celle des CD et des DVD.

Le laser d'un lecteur blu-ray émet une lumière de longueur d'onde différente de celles des systèmes CD ou DVD, ce qui permet de stocker plus de données sur un disque de même taille (12 cm de diamètre), la taille minimale du point sur lequel le laser grave l'information étant limitée par la diffraction.

Pour stocker davantage d'informations sur un disque, les scientifiques travaillent sur la mise au point d'un laser ultra violet.

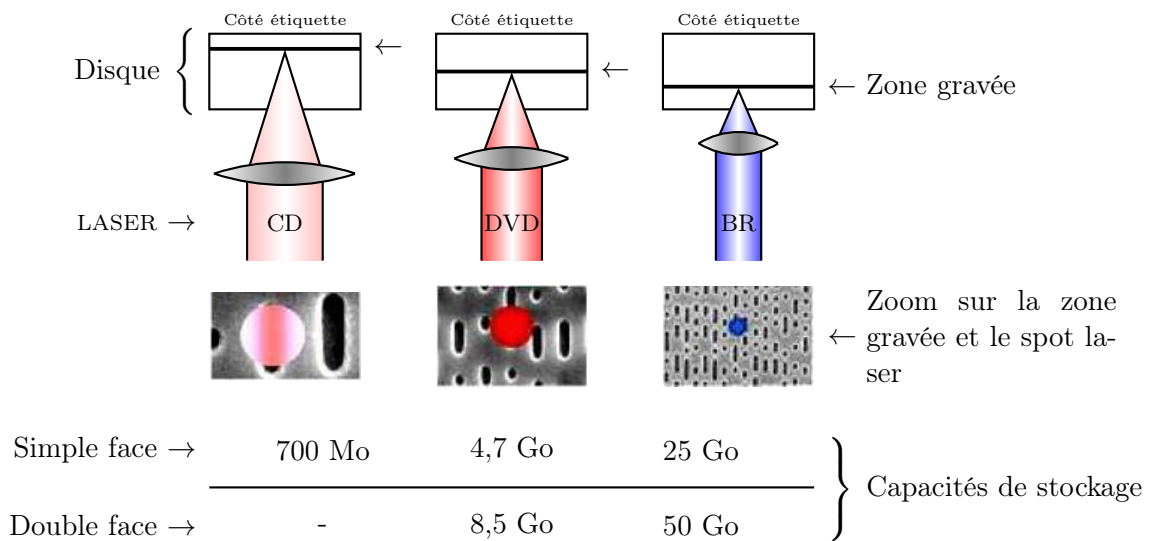


Figure 1 – Caractéristiques des disques CD, DVD et Blu-ray.

1. À propos du texte

1.1. Quel est le nom du phénomène physique responsable de l'irisation d'un CD ou d'un DVD éclairé en lumière blanche ?

1.2. Calculer la valeur de la fréquence ν_B de la radiation utilisée dans la technologie blu-ray.

Donnée : Célérité de la lumière dans le vide et dans l'air : $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

1.3. Comparer la longueur d'onde du laser blu-ray à celle des systèmes CD ou DVD.

2. Diffraction

On veut retrouver expérimentalement la longueur d'onde λ_D de la radiation monochromatique d'un lecteur DVD.

On utilise pour cela le montage de la figure 2, a étant le diamètre du fil, θ le demi-écart angulaire.

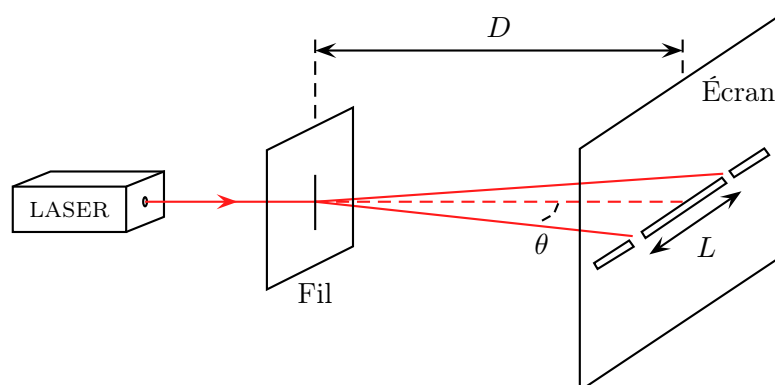


Figure 2 – Diffraction de la lumière par un fil.

2.1. Expression de λ

2.1.1. Établir la relation entre θ , L (largeur de la tache centrale de diffraction) et D (distance entre le fil et l'écran). On supposera θ suffisamment petit pour considérer $\tan \theta \simeq \theta$ avec θ en radian.

2.1.2. Donner la relation entre θ , λ_D et a , en indiquant l'unité de chaque grandeur.

2.1.3. En déduire la relation :

$$\lambda_D = \frac{La}{2D}$$

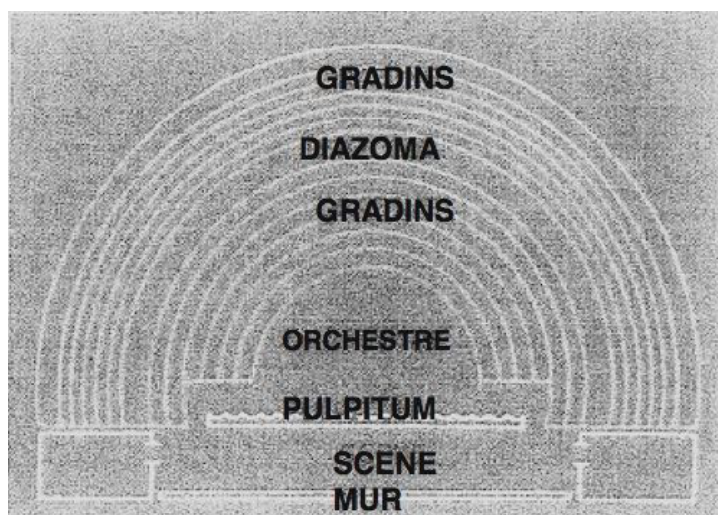
2.2. Détermination de la longueur d'onde λ_D de la radiation d'un laser de lecteur DVD.

Pour la figure de diffraction obtenue avec un laser « DVD », on mesure $L = 4,8$ cm.

On remplace alors le laser « DVD » par le laser utilisé dans le lecteur blu-ray, sans modifier le reste du montage. On obtient une tache de diffraction de largeur $L' = 3,0$ cm.

À partir de ces deux expériences, calculer la valeur de la longueur d'onde λ_D de la radiation monochromatique d'un lecteur DVD, et comparer au résultat de la question 1.3.

Exercice 2 – Acoustique des théâtres antiques (12,5 points)



Le théâtre antique d'Aspendos (50 km d'Antalya, en Turquie) est le mieux conservé de toute l'Asie Mineure. Construit au II^{ème} siècle après J.C., sa célébrité est due à son excellent état de conservation, mais aussi à son acoustique remarquable qui, comme l'ensemble des théâtres antiques, révèle la réussite de son architecte. Les spectateurs assis au dernier rang de ce théâtre, doté d'une capacité d'accueil de 15 000 personnes, peuvent en effet entendre très distinctement les paroles d'un acteur situé sur la scène à une distance de plusieurs dizaines de mètres !

Cet exercice a pour objectif de comprendre comment les architectes ont réussi, par ce type de construction, à obtenir de tels résultats acoustiques.

1. Généralités

1.1. Le son est une onde mécanique progressive. Définir le terme souligné.

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

2. Utilisation d'un émetteur ultrasonore

Un émetteur ultrasonore est utilisé pour réaliser cette simulation. On rappelle les informations suivantes :

- les sons audibles par l'oreille ont une fréquence f comprise entre 20 Hz et 20 kHz ;
- lorsque la fréquence f est supérieure à 20 kHz, on parle d'ultrasons ;
- ordre de grandeur de la célérité des sons émis par la voix et des ultrasons dans l'air dans les conditions habituelles : $v = 340$ m.s⁻¹.

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

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

2.3. Déduire, de ce qui précède, que la longueur d'onde des ultrasons est inférieure à celle des sons moyens de la voix. Justifier précisément la réponse.

2.4. Justifier alors l'intérêt d'utiliser ce type d'ondes dans le cadre d'une simulation avec une maquette.

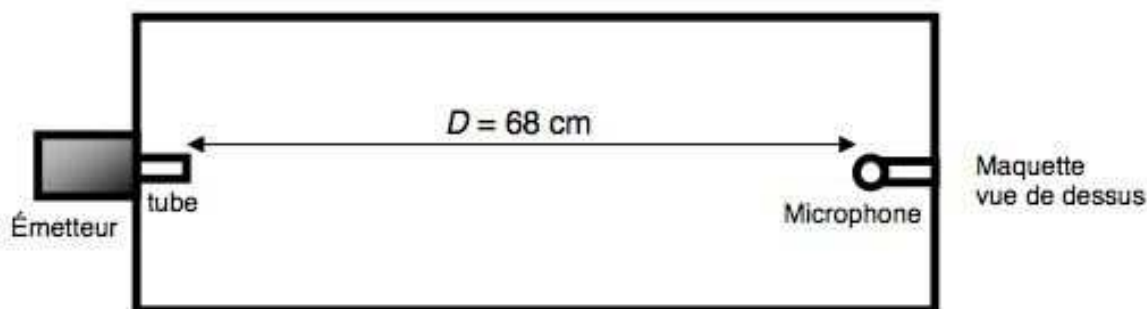
2.5. Définir ce qu'on appelle un milieu dispersif.

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

3. Influence du plafond

Les salles de concert couvertes n'ont pas la même acoustique que les théâtres en plein air. On se propose dans cette partie d'étudier l'impact d'un plafond recouvrant totalement la salle de concert sur l'acoustique de cette salle. Pour cela on utilise une maquette rectangulaire dont le couvercle est amovible.

Une des parois latérales est traversée par un tube, relié comme précédemment à un émetteur ultrasonore. La longueur d'onde du son émis est là encore réduite dans le rapport indiqué par l'échelle de la maquette. Sur la paroi opposée est disposé un microphone :



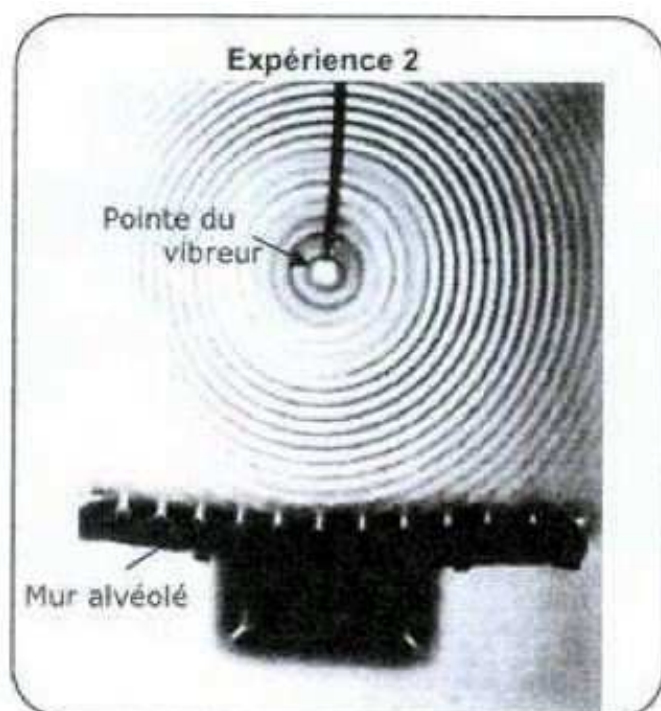
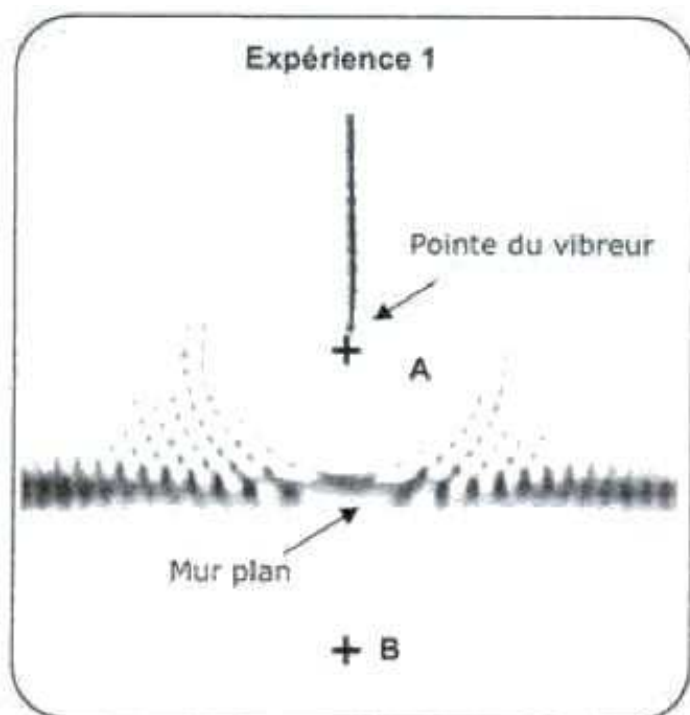
L'expérience consiste à envoyer pendant un temps très court (1 ms), un top d'émission (au niveau de l'extrémité du tube). Un microphone est situé à une distance D du tube.

Un oscilloscope permet de recevoir d'abord l'émission arrivant directement, puis tous les échos successifs. Le TOP est reçu avec un retard τ par rapport au TOP émis. On réalise 3 expériences :

- Expérience ① avec le couvercle ;
- Expérience ② avec un couvercle recouvert de moquette ;
- Expérience ③ sans couvercle.

Les résultats obtenus sont présentés en annexe.

- 3.1. À l'aide des données de l'énoncé (la célérité v des ultrasons dans l'air n'ayant pas changé), évaluer le retard τ entre l'émission et la réception du top par le microphone.
- 3.2. Comparer les résultats des trois expériences en termes d'amortissement de l'écho.
- 3.3. Parmi les trois expériences, quelle est la situation la plus intéressante d'un point de vue acoustique ? Justifier la réponse.
- 3.4. Justifier alors que le plafond des salles de concert est toujours recouvert de dalles alvéolées constituées d'un matériau très absorbant.



4. Rôle du mur : simulation à l'aide d'une cuve à ondes

La propagation des ondes et leur comportement quand elles rencontrent une surface réfléchissante peuvent être assez bien matérialisés au moyen d'une cuve à ondes.

Un vibreur muni d'une pointe, frappe verticalement, avec une fréquence connue, la surface de l'eau contenue dans

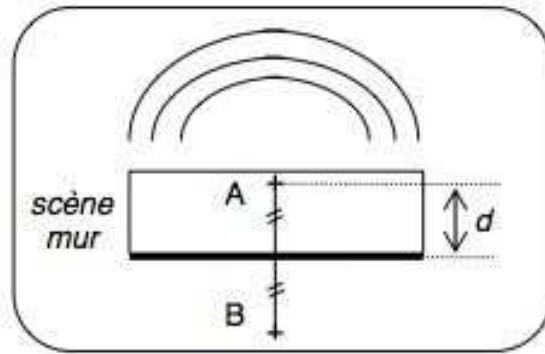
une cuve à ondes.

Expérience 1 : On réalise l'expérience en plaçant un mur plan. On constate la présence d'échos. Tout se passe comme s'il y avait une deuxième source.

Expérience 2 : On utilise cette fois-ci un mur alvéolé.

On obtient les images reproduites au bas de la page 4 (vues de dessus). Une image agrandie de l'**expérience 2** (**cliché**) est représentée en annexe.

- 4.1. Les ondes créées par le vibreur à la surface de l'eau sont-elles longitudinales ou bien transversale? Justifier.
- 4.2. Dans le cas de l'expérience 1, l'onde émise au point A rencontre le mur plan ce qui génère une onde réfléchie qui semble provenir de B, symétrique de A par rapport au plan formé par le mur. Celle-ci se superpose alors à l'onde incidente issue de A. En comparant les images de deux expériences, expliquez en quoi un mur plan est gênant pour la réception sonore dans les gradins.
- 4.3. À l'aide du cliché reproduit en annexe et en tenant compte de l'échelle du document, déterminer, le plus précisément possible, la valeur de la longueur d'onde λ en expliquant brièvement la méthode employée.
- 4.4. En analysant les expériences 1 et 2, justifier la forme du pulpitum (voir schéma 1 de l'énoncé) ainsi que la présence de niches et de colonnes dans le mur des théâtres antiques.
- 4.5. Les ondes réfléchies par le mur ne pouvant être totalement évitées, l'essentiel est que tous ces échos n'arrivent pas avec un trop grand retard. En effet, ce sont les consonnes qui forment l'armature de la parole. Leur durée d'émission est très courte ce l'ordre de $1/25^{\text{e}}$ de seconde. Pour qu'elles ne se juxtaposent pas, il faut que leur écho arrive avant la fin de leur émission.



Si l'orateur est placé en A, à une distance d du mur formant le fond de la scène, exprimer la distance AB en fonction de d .

- 4.6. En déduire l'expression en fonction de d et de v du retard Δt entre l'onde sonore émise par l'orateur au point A et l'onde réfléchie par le mur, qui semble issue du point B.
- 4.7. En utilisant les informations du texte d'introduction de la question 5, déterminer la profondeur maximale d_{max} de la scène qui permet à la parole de rester nettement compréhensible. Pour faciliter le calcul numérique, on considèrera une célérité des ondes sonores égale à 350 m.s^{-1} .

5. Conclusion (sans questions)

Une condition importante est aussi que les rayons n'arrivent pas affaiblis. Si les spectateurs étaient disposés dans un plan horizontal, leurs rangées successives absorberaient les ondes sonores et une faible énergie arriverait au dernier rang. Une inclinaison des gradins de 30° environ et croissante vers le haut empêche cette absorption.

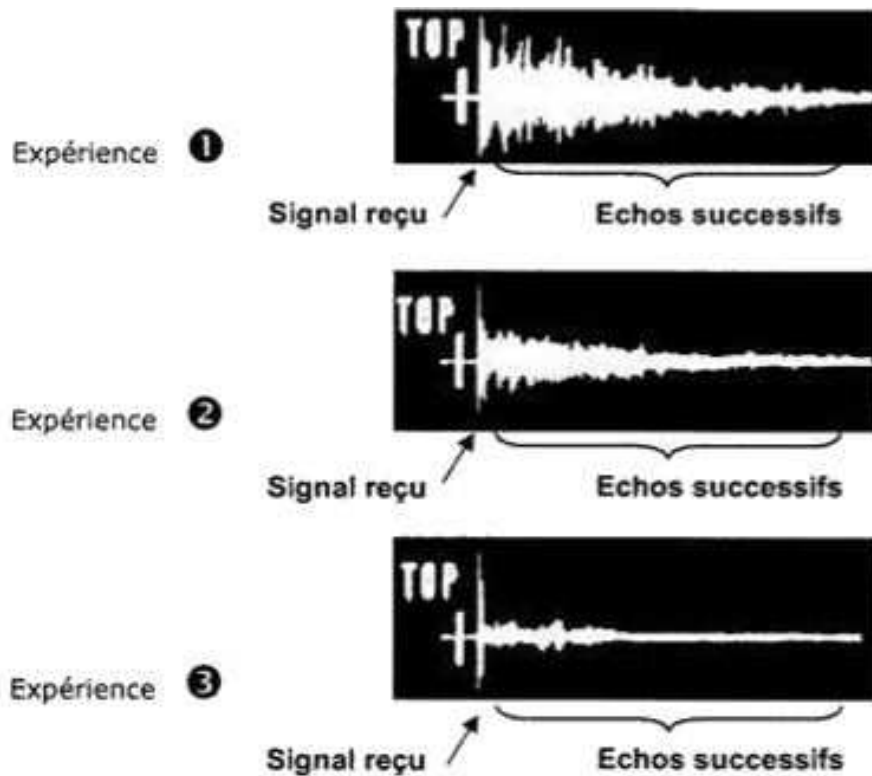
Toutes ces remarques imposent les conditions suivantes :

- Orchestre réfléchissant et bien dégagé ;
- Hauteur faible de la scène et profondeur généralement inférieure à $6,50 \text{ m}$;
- Inclinaison moyenne des gradins de 30° environ.

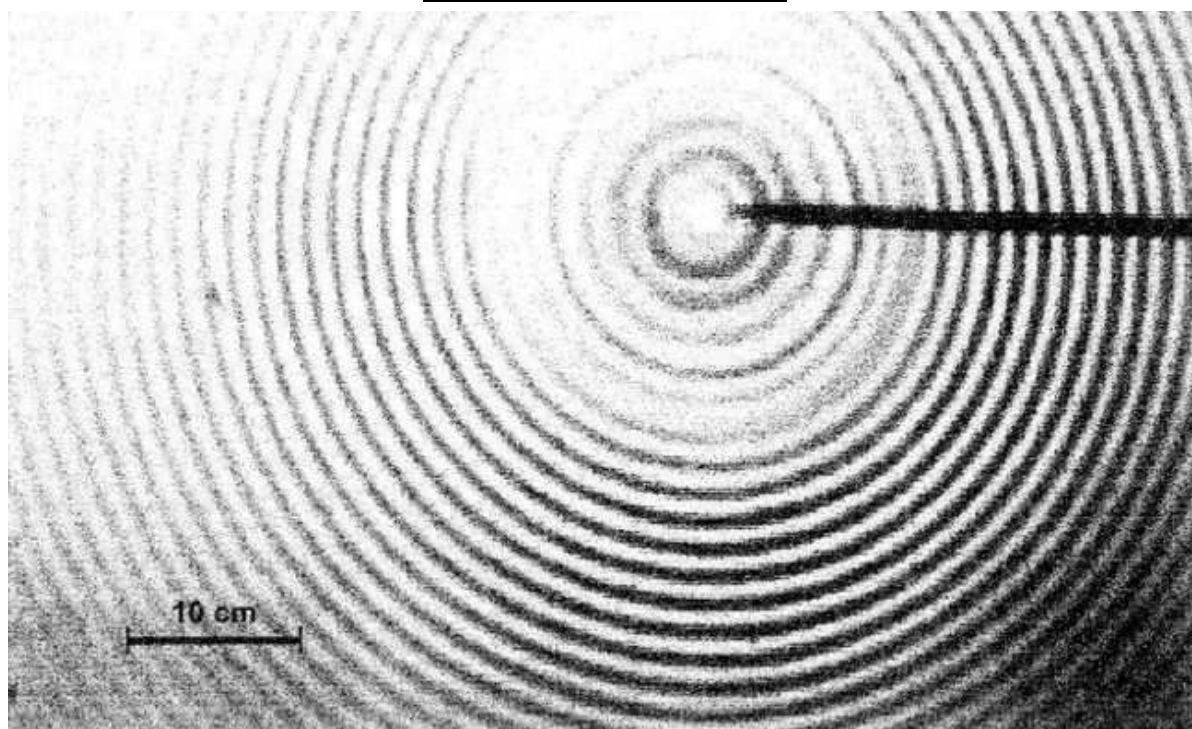
Ainsi, la bonne audition en ces points n'avait pas échappé aux architectes de l'époque, et il est remarquable que tout cela a été fait sans l'emploi des moyens modernes d'investigation (microphones, haut-parleurs, oscilloscopes...), mais uniquement en utilisant l'oreille et la géométrie.

ANNEXE — À rendre avec la copie

Exercice 2, questions 3.2 et 3.3



Exercice 2, question 4.3



Exercice 1 – Le laser au quotidien

1.1. Il s'agit de la diffraction de la lumière blanche sur les petits orifices de la zone gravée. Ces orifices sont tellement petits qu'ils sont de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de la lumière visible ($a \sim \lambda$), d'où une diffraction bien visible.

1.2.

$$\lambda_B = \frac{c}{\nu_B} \Leftrightarrow \nu_B = \frac{c}{\lambda_B}$$

Application numérique :

$$\nu_B = \frac{3,00 \times 10^8}{405 \times 10^{-9}} = 7,41 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

1.3. $\lambda_B < \lambda_D < \lambda_{CD}$: en passant de l'infrarouge (λ_{CD} pour le CD), au rouge (λ_D pour le DVD) et finalement au bleu (λ_B pour le Blu-ray), la longueur d'onde diminue.

2.1.1. Dans le triangle rectangle contenant l'angle θ :

$$\tan \theta = \frac{L}{D}$$

L'angle θ étant petit, et exprimé en radians :

$$\tan \theta \simeq \theta \Rightarrow \theta \simeq \frac{L}{2D}$$

2.1.2. En exprimant θ en radians (rad), λ_D en mètres (m) et a en mètres (m) :

$$\theta = \frac{\lambda_D}{a}$$

2.1.3. En regroupant les deux formules précédentes :

$$\frac{L}{2D} = \frac{\lambda_D}{a} \Leftrightarrow \lambda_D = \frac{La}{2D} \quad \text{c. q. f. d.}$$

2.2. Utilisons la relation précédente :

$$\lambda_D = \frac{La}{2D} \quad \text{et} \quad \lambda_B = \frac{L'a}{2D}$$

Isolons les termes constants : diamètre a du fil, distance fil-écran D :

$$\frac{\lambda_D}{L} = \frac{a}{2D} \quad \text{et} \quad \frac{\lambda_B}{L'} = \frac{a}{2D}$$

L'égalité entre les deux équations nous offre la possibilité d'exprimer λ_D en fonction des données à notre disposition :

$$\frac{\lambda_D}{L} = \frac{\lambda_B}{L'} \Leftrightarrow \lambda_D = \lambda_B \frac{L}{L'}$$

Pour l'application numérique, on peut laisser la longueur d'onde du Blu-ray en nanomètres, et les largeurs des taches centrales de diffraction en centimètre (puisqu'il s'agit de calculer un rapport de longueur) :

$$\lambda_D = 405 \times \frac{4,8}{3,0} = 648 \text{ nm}$$

Le respect des chiffres significatifs impose d'exprimer le résultat avec seulement deux chiffres significatifs (on rappelle λ_B pour comparer) :

$$\lambda_D = 0,65 \text{ } \mu\text{m} \quad \text{et} \quad \lambda_B = 0,405 \text{ } \mu\text{m}$$

On vérifie bien que le laser utilisé pour les DVD est dans le rouge. Par rapport à la question **1.3**, on vérifie bien que la longueur d'onde utilisée pour le DVD est supérieure à celle utilisée pour le Blu-ray.

Exercice 2 – L'acoustique des théâtres antiques

1.1. Une onde mécanique est une perturbation d'un milieu matériel élastique.

Une onde progressive est une perturbation qui se déplace dans le milieu, elle *progress*e.

1.2. Les ondes sonores se déplacent dans toutes les directions de l'espace, donc trois dimensions.

2.1. La longueur d'onde est la plus petite distance entre deux points en phase (les autres définitions sont moins générales).

2.2. $\lambda = v/f$.

2.3. La fréquence f des ondes intervient au dénominateur de la formule précédente ; puisque les fréquences des ultrasons sont supérieures à celles d'un son audible, les longueurs d'onde λ des ultrasons seront plus faibles que celles d'un son audible.

2.4. En plus d'être inaudibles, et donc plus agréables

à manipuler, les ultrasons permettent de réduire la taille de la maquette d'un facteur identique aux rapports des longueurs d'onde du son sur celle des ultrasons. On travaille par *simultanéité*, sur une maquette entièrement à l'échelle, y inclus les ondes utilisées.

2.5. Un milieu dispersif est un milieu dans lequel la célérité des ondes dépend de leur fréquence.

2.6. L'air est un milieu non dispersif : la célérité des sons et des ultrasons, de fréquences différentes, est constante.

3.1. Retard τ pour une distance D et une célérité v :

$$v = \frac{D}{\tau} \Leftrightarrow \tau = \frac{D}{v}$$

Application numérique (simple!) :

$$v = \frac{68 \times 10^{-2}}{34,0 \times 10^1} = 2,0 \times \frac{10^{-2}}{10^{-1}}$$

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

3.2. Dans l'expérience ①, l'écho est fort et persistant. Dans l'expérience ②, l'écho est plus faible, et quasiment nul dans l'expérience ③.

3.3. La situation la plus intéressante du point de vue de l'acoustique est la situation ③ : l'écho est minimale, les voix seront bien plus compréhensibles par l'ensemble des spectateurs. Le défaut de cette situation est l'absence de toit pour l'éventuelle salle de concert. Les conditions climatiques peuvent donc imposer la situation ②, qui est un pis-aller.

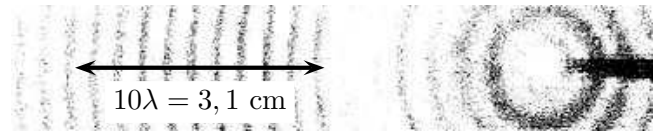
3.4. Le plafond des salles de concert est recouvert de dalles alvéolées formées d'un matériau absorbant afin d'amortir et d'absorber le maximum d'ondes sonores, et ainsi d'éviter les échos au maximum. La cantine du lycée est un bon exemple d'un tel aménagement.

4.1. Les ondes créées par le vibreur sont transversales; en effet dans le texte il est indiqué que la pointe du vibreur frappe la surface de l'eau verticalement, les ondes *de gravité* formées se propagent horizontalement, à deux dimensions, à la surface de l'eau.

4.2. On constate sur l'image de l'expérience 1 que les ondes sont peu visibles, car très atténuées : la réflexion ou écho sur le mur plan crée une onde réfléchie qui se superpose à l'onde incidente, en l'annulant partiellement. Cette situation est très défavorable à une écoute dans de bonnes conditions : le mur plan est très gênant.

À contrario sur l'image de l'expérience 2, les ondes sont bien visibles, le mur alvéolé améliore l'écoute.

4.3. On mesure la longueur entre onze crêtes, donc dix longueurs d'ondes (plus simple à calculer que tout autre nombre, et suffisamment précis) :



Il faut de plus tenir compte de l'échelle du document, pour lequel 2 cm mesurés correspondent en fait à 10 cm :

$$10\lambda = 3,1 \times \frac{10}{2} = 15,5 \text{ cm} \Rightarrow \lambda = 1,55 \text{ cm}$$

4.4. Le pulpitem est alvéolé côté orchestre pour minimiser les échos, et plan côté scène, bordée quant à elle par un mur alvéolé (les niches et les colonnes, qui n'ont pas qu'un rôle décoratif). Cette configuration élimine idéalement l'écho en direction des spectateurs, tout en permettant aux artistes d'entendre correctement l'orchestre.

4.5. $AB = 2d$.

4.6. Expression du retard Δt de l'écho sur l'onde incidente :

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

4.7. Afin que les consonnes soient compréhensibles, il est nécessaire que le retard de l'écho ne dépasse pas $1/25^{\text{e}}$ de seconde :

$$\Delta t_{\text{max}} = \frac{1}{25} \text{ s}$$

On en déduit la profondeur maximale de la scène :

$$\Delta t_{\text{max}} = \frac{2d_{\text{max}}}{v} \Leftrightarrow d_{\text{max}} = \frac{\Delta t_{\text{max}} v}{2}$$

Application numérique :

$$d_{\text{max}} = \frac{\frac{1}{25} \times 350}{2} = \frac{350}{50} = 7,0 \text{ m}$$

Conventions : = 1 point
 = 1/2 point
+ = Bonus 1/4 point
- = Malus 1/4 point
 = 0 point

Conventions : = 1 point
 = 1/2 point
+ = Bonus 1/4 point
- = Malus 1/4 point
 = 0 point

1 – Le Laser

.../11

- Diffraction
- $\nu_B = c/\lambda_B = 7,41 \times 10^{14}$ Hz, tor
- $\nu_B = c/\lambda_B = 7,41 \times 10^{14}$ Hz, tor
- $\lambda_B < \lambda_D < \lambda_{CD}$
- $\theta \simeq L/2D$, démontré
- $\theta \simeq L/2D$, démontré
- $\theta = \lambda_D/a$ + unités
- $\lambda_D = La/2D$, démontré
- $\lambda_D = \lambda_B L/L'$ ou méthode équivalente
- $\lambda_D = 0,65 \mu\text{m}$
- On a bien $\lambda_B < \lambda_D$

2 – Acoustique des théâtres antiques

.../19

- Mécanique = milieu, progressive = déplacement
- Trois dimensions
- λ plus petite distance entre des points en phase
- $\lambda = v/f$
- Même célérité, fréquence ↗, donc λ ↘
- Maquette de petites dimensions !
- Dispersif : célérité qui dépend de la fréquence
- Air non dispersif, justifié
- $\tau = D/v = 0,68/340 = 2,0$ ms
- $1 > 2 > 3$ en terme d'échos
- 3 meilleure car pas de plafond = pas d'échos
- Alvéoles pour diminuer l'écho
- Ondes transversales car vibreur vertical
- Ondes moins visibles = son moins fort
- $\lambda = 1,45$ cm, sur 10λ ou plus
- $\lambda = 1,45$ cm, sur 10λ ou plus
- Écho amorti car alvéolé sauf pour artistes
- $AB = 2d$
- $\Delta t = 2d/v$
- $\Delta t_{\text{max}} < 1/25$ s $\Rightarrow d_{\text{max}} = 7,0$ m

Total 1 + 2

.../30

Note

.../20

1 – Le Laser

.../11

- Diffraction
- $\nu_B = c/\lambda_B = 7,41 \times 10^{14}$ Hz, tor
- $\nu_B = c/\lambda_B = 7,41 \times 10^{14}$ Hz, tor
- $\lambda_B < \lambda_D < \lambda_{CD}$
- $\theta \simeq L/2D$, démontré
- $\theta \simeq L/2D$, démontré
- $\theta = \lambda_D/a$ + unités
- $\lambda_D = La/2D$, démontré
- $\lambda_D = \lambda_B L/L'$ ou méthode équivalente
- $\lambda_D = 0,65 \mu\text{m}$
- On a bien $\lambda_B < \lambda_D$

2 – Acoustique des théâtres antiques

.../19

- Mécanique = milieu, progressive = déplacement
- Trois dimensions
- λ plus petite distance entre des points en phase
- $\lambda = v/f$
- Même célérité, fréquence ↗, donc λ ↘
- Maquette de petites dimensions !
- Dispersif : célérité qui dépend de la fréquence
- Air non dispersif, justifié
- $\tau = D/v = 0,68/340 = 2,0$ ms
- $1 > 2 > 3$ en terme d'échos
- 3 meilleure car pas de plafond = pas d'échos
- Alvéoles pour diminuer l'écho
- Ondes transversales car vibreur vertical
- Ondes moins visibles = son moins fort
- $\lambda = 1,45$ cm, sur 10λ ou plus
- $\lambda = 1,45$ cm, sur 10λ ou plus
- Écho amorti car alvéolé sauf pour artistes
- $AB = 2d$
- $\Delta t = 2d/v$
- $\Delta t_{\text{max}} < 1/25$ s $\Rightarrow d_{\text{max}} = 7,0$ m

Total 1 + 2

.../30

Note

.../20