

TD5 : Phénomènes ondulatoires

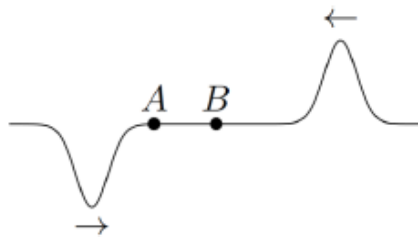
CAPACITÉS TRAVAILLÉES :

- ▷ Exprimer les conditions d'interférences constructives ou destructives : TLB2, ex2,3.
- ▷ Utiliser la relation $\theta \approx \frac{\lambda}{a}$ entre l'échelle angulaire du phénomène de diffraction et la taille caractéristique de l'ouverture : TB3, ex1.
- ▷ Utiliser l'expression reliant l'énergie d'un photon à la fréquence : ex4, RP.
- ▷ Caractériser une source lumineuse par son spectre. Relier la longueur d'onde dans le vide et la couleur : ex4, RP.
- ▷ Relever des longueurs d'onde sur un spectre : ex4.

1 Tester les bases

TLB1 : superposition d'ondes

Deux ondes progressives se propagent en sens contraire sur une corde. La situation est schématisée ci-dessous à l'instant initial.

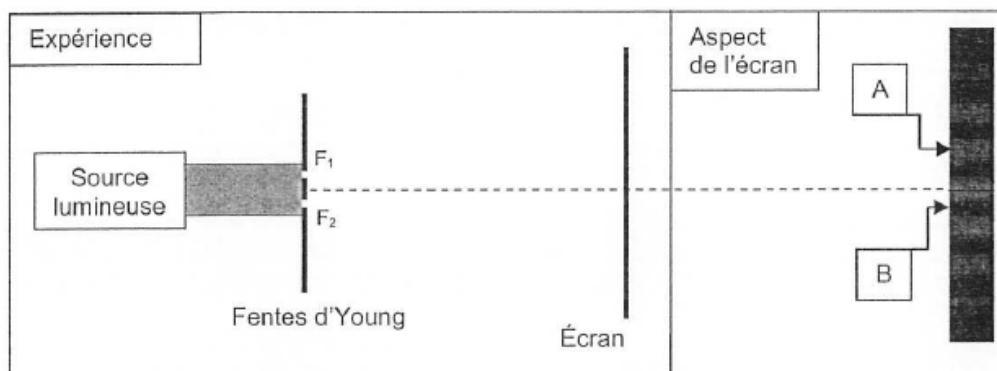


1. Justifier que ces ondes sont de nature mécanique.
2. Tracer l'allure de la corde à différents instants. Commenter.
3. Quelle grandeur physique pourrait constituer un signal pertinent aux points A et B ?
4. Représenter sur un même graphique l'allure des signaux $s_A(t)$ et $s_B(t)$ aux points A et B respectivement.

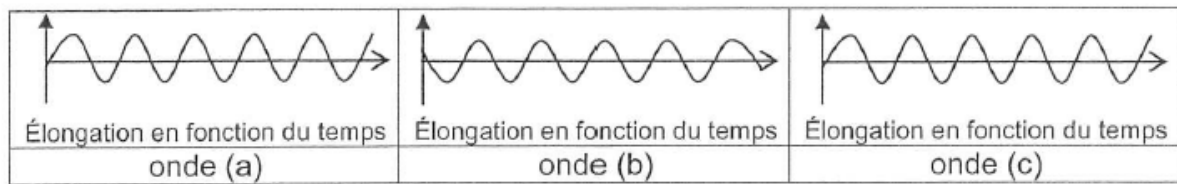
TLB2 : expérience des fentes d'Young

Dans le dispositif des fentes d'Young, on éclaire deux fentes F_1 et F_2 fines et parallèles à l'aide d'une source lumineuse monochromatique. On observe sur un écran des franges brillantes et des franges sombres.

L'aspect de l'écran vu de face, quand l'expérience est réalisée dans un environnement sombre, est représenté ci-dessous à droite :



1. Qualifier les interférences en A et B sur l'écran.
2. Ci-dessous sont représentées les évolutions temporelles de l'élongation s de trois ondes (a), (b) et (c). Choisir, en justifiant, les deux ondes qui interfèrent en A et les deux ondes qui interfèrent en B permettant de rendre compte du phénomène observé.



TLB3 : acoustique d'une salle de spectacle

Une salle de concert est généralement un espace clos. Cependant, si sa porte est ouverte, le concert peut être entendu par une personne située à l'extérieur, même lorsque l'orchestre reste hors de sa vue.

En se plaçant devant la porte, cette personne peut entendre toute la gamme des sons. Cependant, si elle se place sur le côté, elle entend surtout les sons graves, et très peu les sons aigus.

Dans les questions suivantes on s'intéresse au phénomène de diffraction des ondes sonores. On modélise la situation décrite dans le document par le schéma suivant :

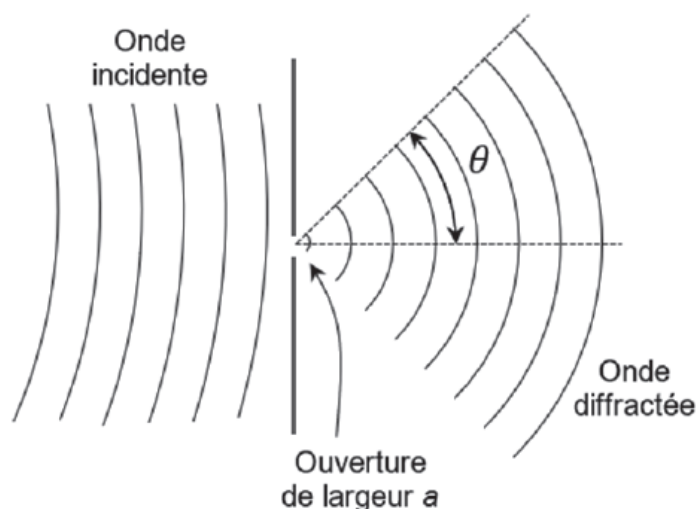


FIGURE 1 – Diffraction d'une onde sonore par une ouverture de largeur a

On rappelle que l'expression de l'angle d'ouverture θ associé au phénomène de diffraction en fonction de la largeur de l'ouverture, notée a , et de la longueur d'onde λ de la source est : $\sin(\theta) = \frac{\lambda}{a}$.

1. Montrer que l'expression de l'angle d'ouverture θ en fonction de la largeur de l'ouverture a , de la fréquence f de l'onde émise par la source et de la vitesse de propagation v de l'onde est : $\theta = \arcsin\left(\frac{c}{f \times a}\right)$, où $\arcsin$ désigne la fonction arcsinus, fonction réciproque de la fonction sinus.

Deux ondes sonores sont produites par un orchestre. Elles sont caractérisées par deux fréquences typiques : $f_1 = 440 \text{ Hz}$ et $f_2 = 4 \times f_1 = 1760 \text{ Hz}$.

2. Calculer les valeurs de θ_1 et θ_2 correspondant respectivement aux valeurs de fréquences f_1 et f_2 .

3. Schématiser de façon cohérente la situation, en représentant les angles d'ouverture correspondants θ_1 et θ_2 après passage du son par l'ouverture. Commenter la phrase : « Cependant, si elle se place sur le côté, elle entend surtout les sons graves, et très peu les sons aigus ».

Données :

- fréquences f audibles par l'oreille humaine : $20 \text{ Hz} < f < 20 \text{ kHz}$;
- célérité dans l'air d'une onde sonore ou ultrasonore $c = 343 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ à 20°C ;
- largeur de la porte de l'auditorium : $a = 1,0 \text{ m}$.

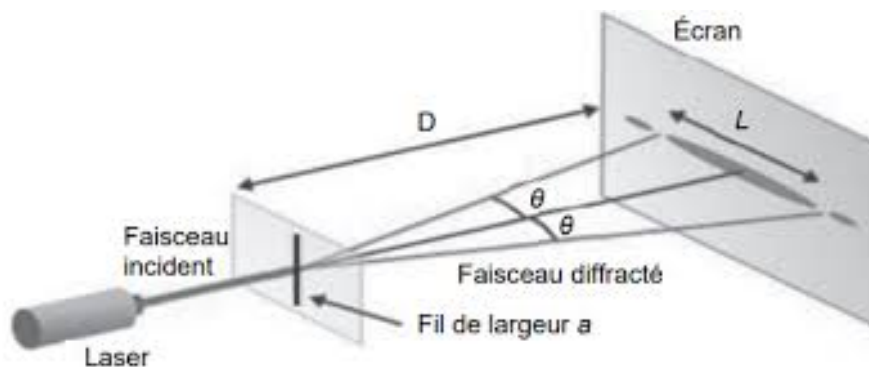
2 Exercices

Exercice 1 : diamètre d'une corde de guitare

On cherche à mesurer le diamètre d'une corde de guitare afin de vérifier l'indication portée par sa pochette : ".004 inch".

Pour ce faire, on utilise un montage de diffraction d'ondes lumineuses.

La figure ci-dessous présente le schéma du montage de diffraction par un fil.



Lors de l'expérience, on intercale successivement cinq fils calibrés (de diamètres a connus) sur le trajet d'un faisceau laser de longueur d'onde λ . Sur un écran blanc placé à une distance D du fil utilisé, on observe une figure de diffraction : L représente la largeur de la tache centrale de diffraction et θ l'angle caractéristique de diffraction.

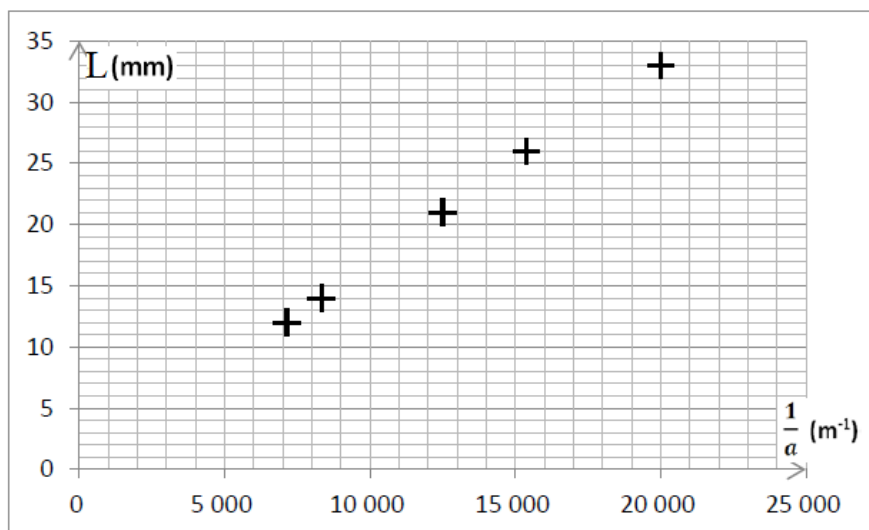
Données :

- approximations des petits angles, exprimés en radians : $\sin(\theta) \simeq \theta$ et $\tan(\theta) \simeq \theta$, où $\sin$ désigne la fonction sinus et $\tan$ la fonction tangente ;
- le résultat d'une mesure est considéré en accord avec une valeur de référence si la valeur de l'**écart normalisé** $z = \frac{|x - x_{\text{ref}}|}{u(x)}$ est inférieure ou égale à 2, avec x la valeur mesurée, x_{ref} la valeur de référence et $u(x)$ l'**incertitude-type** associée à x .

1. Rappeler l'expression approchée de l'angle de diffraction θ en fonction de la longueur d'onde λ du laser et de l'épaisseur a du fil.

2. Comme l'angle caractéristique de diffraction est petit, la largeur de la tache centrale de diffraction peut s'exprimer sous la forme : $L = k \frac{1}{a}$. Déterminer l'expression de la constante k en fonction de D et λ .

La figure ci-après représente $L = f(1/a)$, largeur de la tache centrale de diffraction en fonction de l'inverse du diamètre des fils calibrés.



3. Déterminer graphiquement la valeur de la constante k en m^2 .

Afin d'en mesurer le diamètre, l'expérience précédente a été reproduite dans les mêmes conditions expérimentales, mais avec la corde de guitare à tester.

La mesure de la largeur de la tache centrale de diffraction a donné : $L = 17,0 \text{ mm}$. L'incertitude-type sur la mesure réalisée est : $u(L) = 0,5 \text{ mm}$.

La modélisation du **nuage de points** $L = f(1/a)$ par un tableur-grapheur a fourni la valeur de la constante k avec son incertitude-type associée : $k = 1,67 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ et $u(k) = 0,04 \times 10^{-6} \text{ m}^2$.

4. Calculer la valeur expérimentale du diamètre a_g de la corde de guitare, puis son incertitude-type associée, sachant qu'elle vérifie :

$$u(a_g) = a_g \sqrt{\left(\frac{u(L)}{L}\right)^2 + \left(\frac{u(k)}{k}\right)^2}.$$

5. Comparer avec la valeur de annoncée par le fabricant, sachant qu'un pouce ("inch" en anglais) vaut 2,5 cm.

Exercice 2 : trombone de Koenig

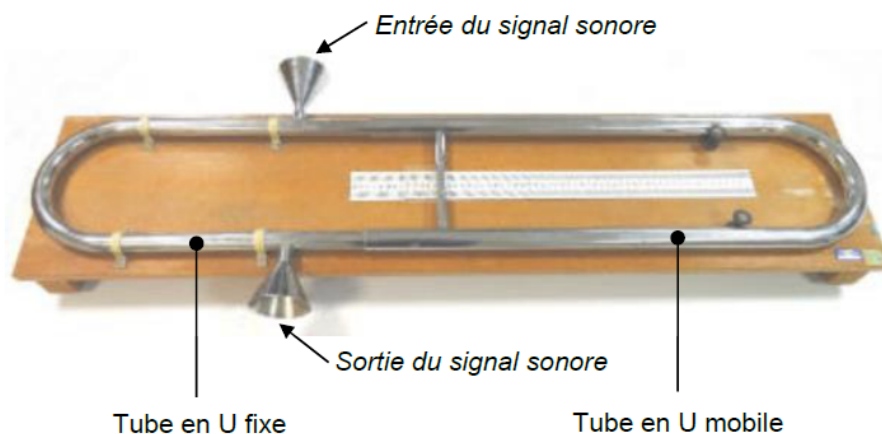


FIGURE 2 – Trombone de Koenig

Le trombone de Koenig est un dispositif permettant de déterminer la célérité des ondes acoustiques. Il est composé de deux tubes en U emboîtés l'un dans l'autre. Le premier est fixe, le second est mobile. Un haut-parleur, alimenté par un générateur de basse fréquence, émet un son de fréquence fixe. Un microphone branché sur un oscilloscope mesure le signal à la sortie du dispositif.

Lorsque le tube mobile est enfoncé au maximum (décalage nul), le dispositif est symétrique et les deux chemins suivis par les ondes ont la même longueur. Lorsque le tube mobile est tiré, les deux chemins suivis sont différents : les ondes interfèrent.

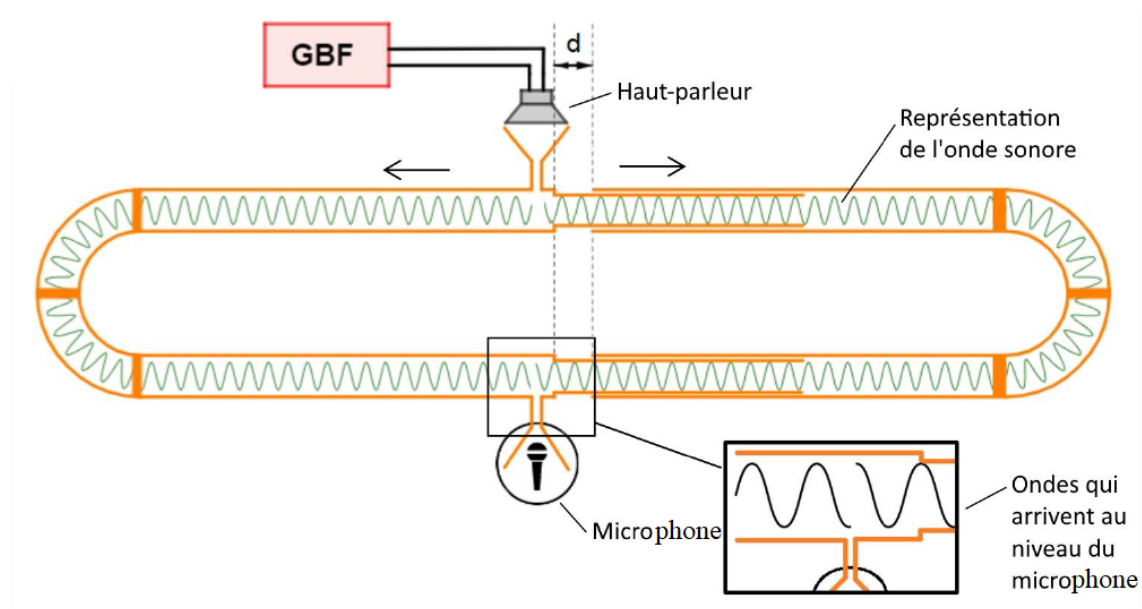


FIGURE 3 – Le tube mobile est décalé vers la droite d'une distance d (le sens de propagation des signaux est représenté par une flèche) – Expérience 1

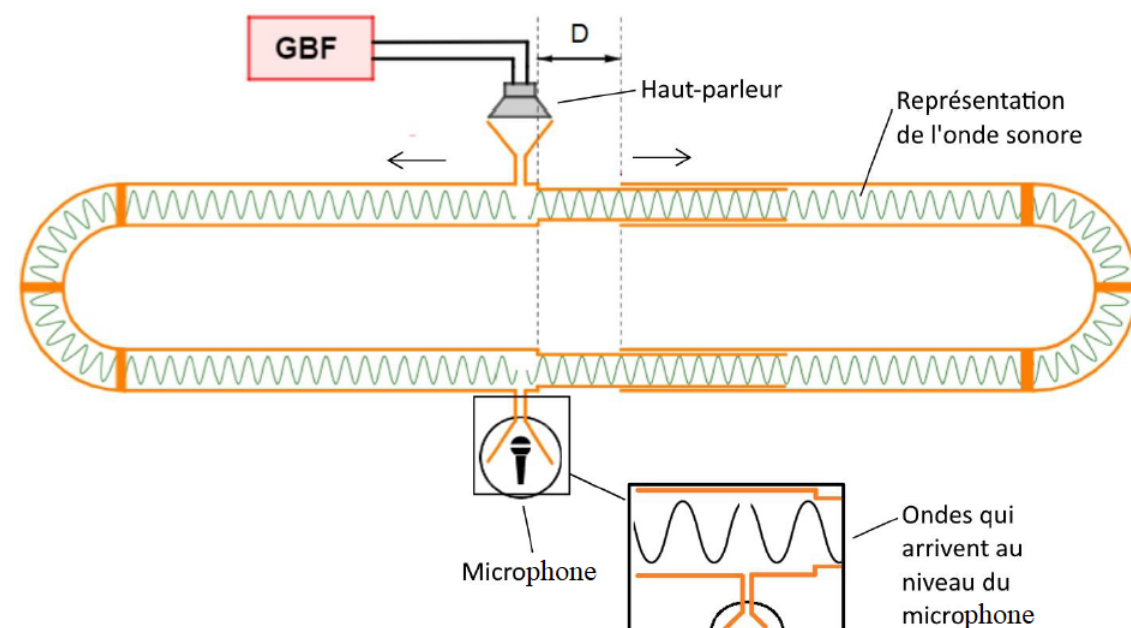


FIGURE 4 – Le tube mobile est décalé vers la droite d'une distance D (le sens de propagation des signaux est représenté par une flèche) – Expérience 2

1. Justifier en quoi le trombone de Koenig est un dispositif qui vérifie les conditions nécessaires à l'observation d'interférences au niveau du microphone.

Sur l'écran de l'oscilloscope, on observe la figure suivante :

- la voie CH1 est reliée au GBF ;
- la voie CH2 est reliée au microphone.

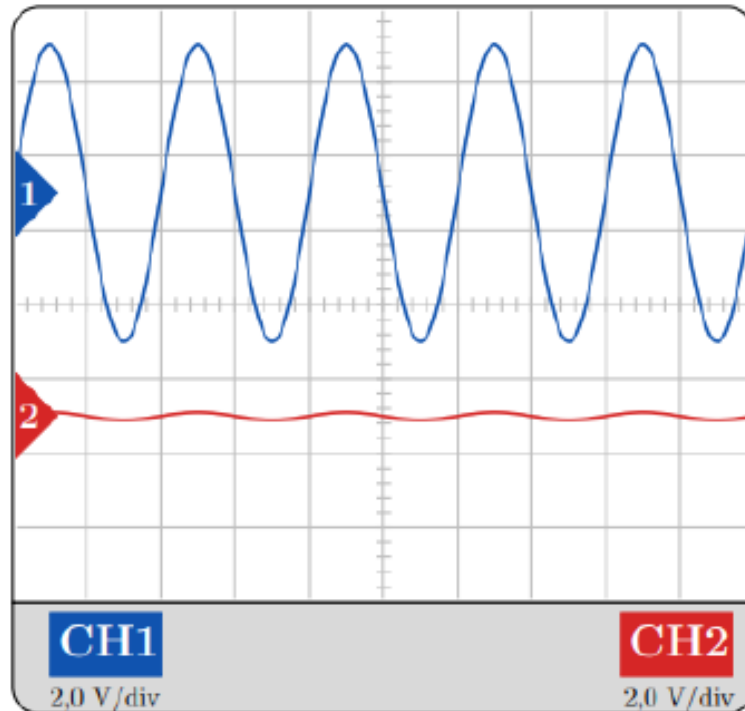


FIGURE 5 – Écran d'oscilloscope

2. Préciser le type d'interférences observé sur la figure 5 et justifier si celle-ci est associée à l'expérience 1 ou à l'expérience 2.

Pour l'expérience 2, on définit δ , la différence de marche à l'instant t entre l'onde circulant dans le tube en U fixe et l'onde circulant dans le tube en U mobile.

3. Exprimer δ en fonction de D .

4. Rappeler la relation entre δ et λ , la longueur d'onde du signal sonore, dans le cas d'interférences constructives. On introduira dans cette relation un nombre entier positif k .

5. Montrer, à l'aide des questions 3 et 4, que pour tout k entier positif, la distance de décalage correspondante D_k , conduisant à des interférences constructives, peut se mettre sous la forme :

$$D_k = \frac{kv}{2f},$$

avec v la célérité de l'onde sonore dans le trombone en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ et f la fréquence de l'onde sonore dans le trombone en Hz.

La plus petite distance de décalage D_1 permettant d'observer à l'écran des interférences constructives est $D_1 = 4,35 \text{ cm}$ pour une fréquence de l'onde sonore $f = 4032 \text{ Hz}$.

6. En déduire la valeur de la célérité de l'onde sonore se propageant dans le trombone de Koenig. Commenter.

On souhaite automatiser la détermination de la célérité v des ondes acoustiques, en exploitant toutes les valeurs D_k mesurées, à l'aide du programme écrit en langage python ci-dessous.

```

1 from statistics import mean
2
3 D=[4.32e-2,8.7e-2,13.1e-2,17.4e-2,21.6e-2]
4 k=[1,2,3,4,5]
5 f=4032
6 v=[]
7
8 for i in range(len(D)):
9     v_i=2*f*D[i]/k[i]
10    v.append(v_i)
11
12    v_son=round(mean(v))
13
14 print("La vitesse moyenne du son dans le trombone est", v_son,"m/s")
15
16 Lambda=...
17 print("La longueur d'onde de l'onde acoustique dans le trombone est", Lambda,"m")

```

FIGURE 6 – Programme permettant de déterminer la célérité et la longueur d'onde des ondes acoustiques

7. Expliquer l'intérêt des lignes 8 et 9 dans le programme.

8. Proposer à la ligne 16, à l'aide des grandeurs définies dans le programme, une formule permettant de calculer la longueur d'onde λ des ondes acoustiques.

Exercice 3 : interférences entre ondes ultrasonores

Pour étudier le phénomène d'interférences entre ondes ultrasonores, on utilise le dispositif ci-dessous, dans lequel les deux émetteurs d'ultrasons sont reliés à un même générateur (figure 7).

La distance latérale entre les deux émetteurs E_1 et E_2 a pour valeur $e = 15$ cm. La distance commune entre les émetteurs et l'axe (Ox) sur lequel se déplace le récepteur a pour valeur $D = 50$ cm.

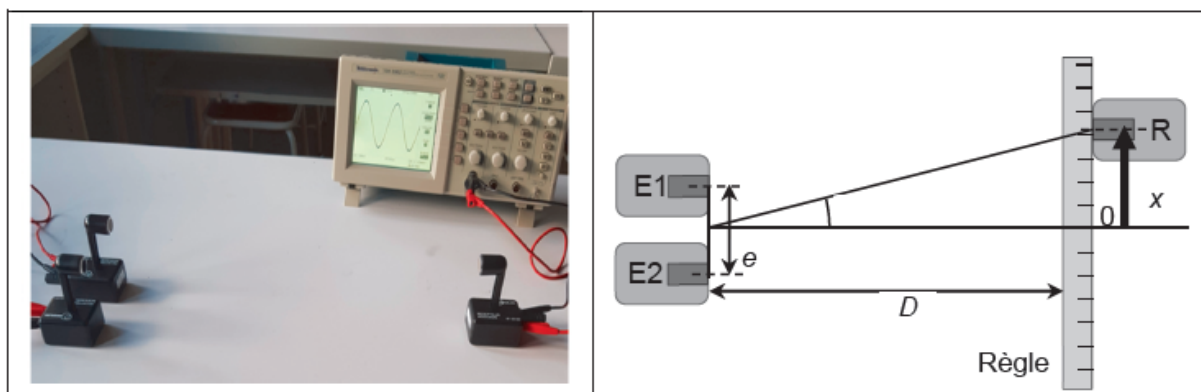


FIGURE 7 – Dispositif expérimental d'étude des interférences d'ondes ultrasonores

On relève la tension délivrée par le récepteur en fonction de la position du récepteur repérée par son abscisse x et on repère la position des maxima (figure 8).

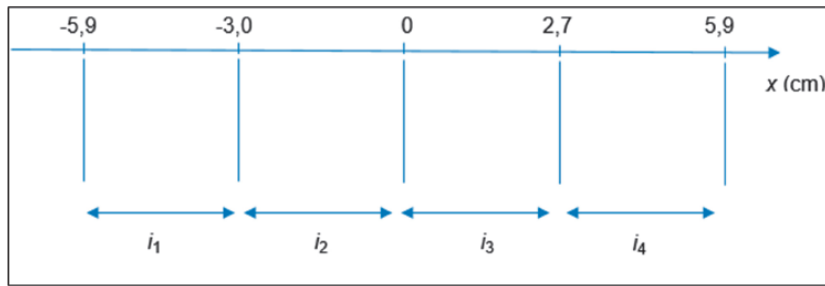


FIGURE 8 – Position expérimentale des maxima de tension ; définition des interfranges i_1 à i_4

1. Relever les valeurs des interfranges et calculer leur moyenne i .
2. Par un raisonnement géométrique et en utilisant la relation $\sqrt{1+x} \approx 1 + \frac{x}{2}$, valable pour $x \ll 1$, montrer que la différence des distances entre chaque émetteur et le récepteur vérifie :

$$E_2R - E_1R \approx \frac{ex}{D}.$$

3. Donner la condition d'interférences constructives portant sur x , et en déduire que la distance entre deux maxima d'amplitude consécutifs (interfrange) s'écrit $i = \frac{\lambda D}{e}$ avec λ la longueur d'onde des deux ondes incidentes.
4. En déduire la valeur de la fréquence des signaux délivrés par les émetteurs. Commenter.

Exercice 4 : laser néodyme-YAG

On s'intéresse au rayonnement issu d'un laser de type YAG dopé au néodyme (laser Nd-YAG), couramment utilisé dans les laboratoires de physique.

Un extrait de sa notice est reproduit ci-dessous :

Caractéristiques d'un laser Nd-YAG
Mode de fonctionnement : continu ou impulsionnel
Durée de l'impulsion : 1 à 20 millisecondes
Énergie maximale par impulsion : 150 joules
Puissance de crête maximale : 30 kilowatts
Amplificateur laser : grenat d'aluminium et d'yttrium dopé au néodyme
Longueur d'onde : 1064 nanomètres

Données :

- conversion électronvolt $\rightarrow$ joule : $1\text{eV} = 1,60 \times 10^{-19}\text{J}$;
- constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34}\text{J} \cdot \text{s}$.

1. Identifier le domaine de longueurs d'onde auquel appartient le rayonnement émis par le laser Nd-YAG.
2. Avec un dispositif doubleur de fréquence, le rayonnement produit par ce laser deviendrait vert. Justifier.
3. Calculer l'énergie E d'un photon émis par le laser Nd-YAG.

Un diagramme énergétique de la partie émission du laser Nd-YAG est fourni ci-dessous.

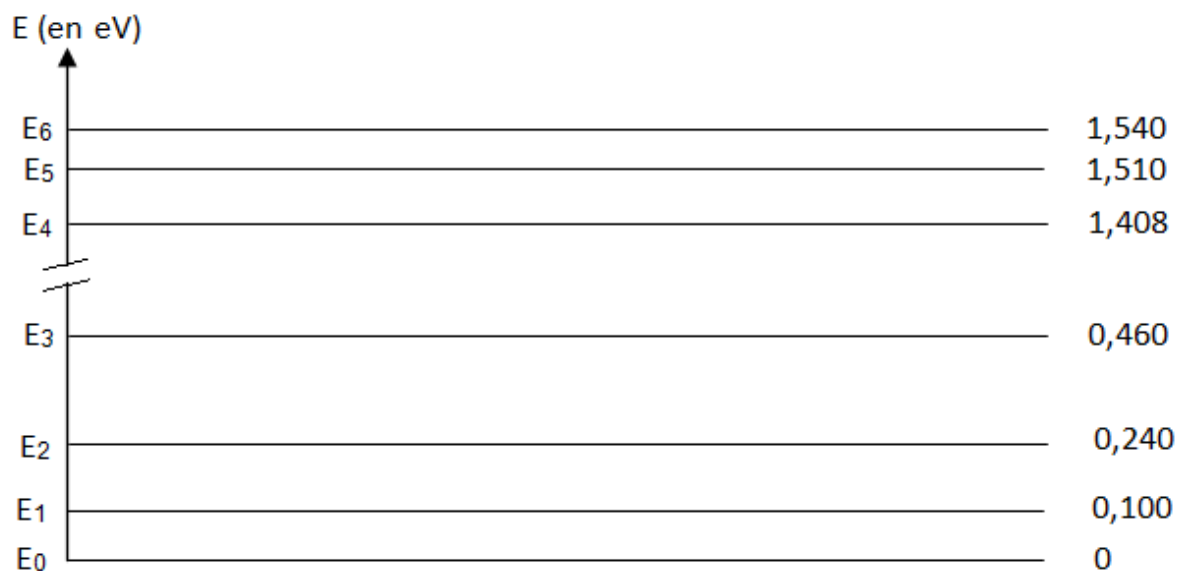


FIGURE 9 – Diagramme des niveaux d'énergie de l'ion néodyme Nd^{3+}

4. Vérifier, par un calcul, que les niveaux d'énergie mis en jeu lors de l'émission du faisceau laser sont les niveaux E_2 et E_4 . Représenter cette transition par une flèche sur le diagramme.

5. On modélise souvent un laser par une source lumineuse monochromatique. Discuter ce modèle au vu du spectre du laser, fourni ci-dessous.

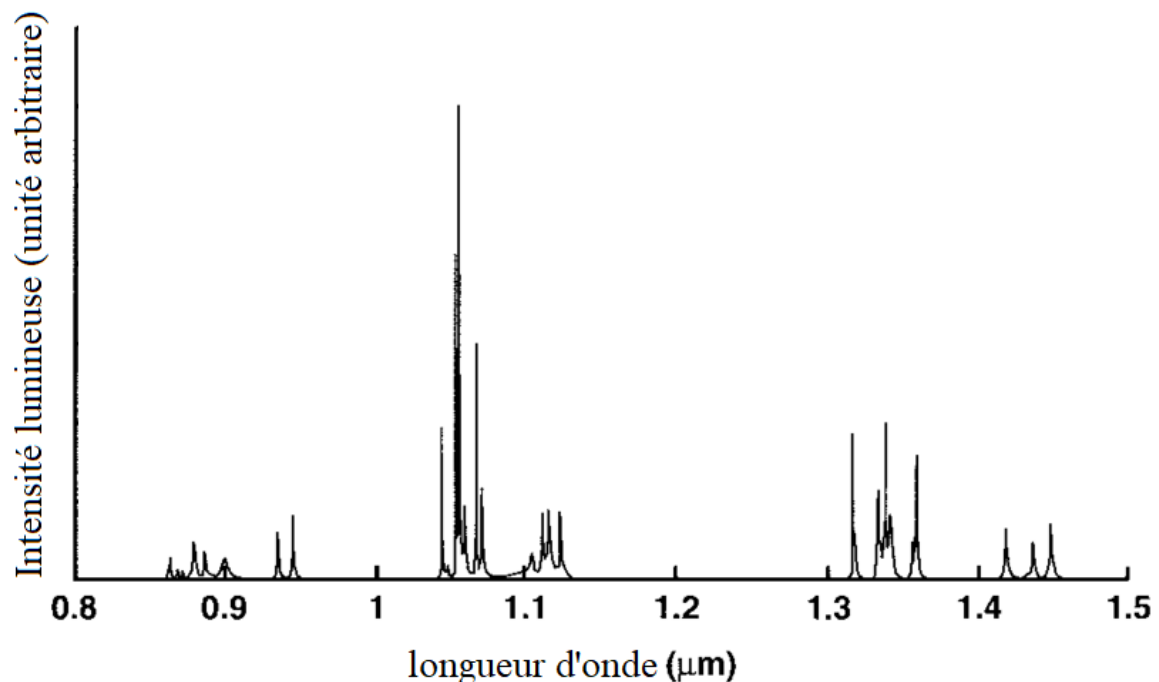


FIGURE 10 – Spectre du laser, obtenu grâce à un spectromètre à fibre optique

Exercice 5 : onde stationnaire le long d'une corde (H.P.)

Une **onde stationnaire** est le résultat de la superposition d'une onde incidente et d'une onde réfléchie de même fréquence et même célérité. Une onde stationnaire se propage dans son milieu mais ne progresse pas.

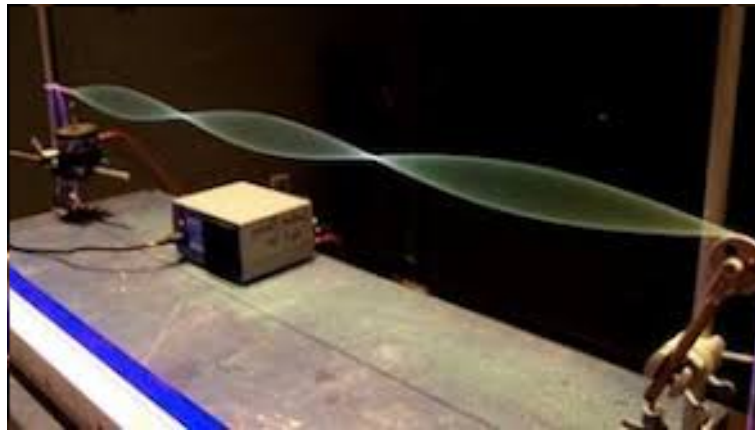


FIGURE 11 – Photographie d'un onde stationnaire le long d'une corde

Une corde AB a une extrémité B fixe et l'autre extrémité A actionnée transversalement par un vibreur de fréquence $f = 100\text{Hz}$.

La célérité des ondes transversales sur la corde est $c = 25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

1. L'onde progressive sinusoïdale se propage de A vers B, dans le sens des x croissants. Dans le repère (Ox) , d'origine O choisie en un point quelconque de la corde, l'équation horaire de O est $y_O(t) = a \cos(\omega t)$, a étant l'amplitude, supposée constante tout le long de la corde.

1.a. Donner l'équation horaire $y_M(t)$ d'un point M de la corde, d'abscisse x .

1.b. Déterminer la pulsation ω et la longueur d'onde λ .

2. L'onde se réfléchit en B en subissant un déphasage ϕ . Pour simplifier, on prendra maintenant l'origine du repère en B.

2.a. Exprimer les élongations $y_{Bi}(t)$ due à l'onde incidente et $y_{Br}(t)$ due à l'onde réfléchie, et montrer que $\phi = \pi$.

2.b. Pour un point M d'abscisse x (négative), exprimer $y_{Mi}(t)$ et $y_{Mr}(t)$, puis l'élongation $y_M(t)$ résultant de la superposition des deux ondes.

On rappelle la formule de trigonométrie : $\cos(a) - \cos(b) = -2 \sin\left(\frac{a+b}{2}\right) \sin\left(\frac{a-b}{2}\right)$.

2.c. Montrer que certains points, appelés **nœuds de vibration**, n'oscillent pas du tout. Interpréter ce fait à l'aide de la notion de déphasage entre les ondes incidente et réfléchie. Déterminer la distance qui les sépare.

2.d. Montrer que certains points, appelés **ventres de vibration**, oscillent maximalement. Interpréter ce fait à l'aide de la notion de déphasage entre les ondes incidente et réfléchie. Déterminer la distance qui les sépare.

3 Résolution de problème

Évaluer l'ordre de grandeur du nombre de photons émis chaque seconde par une lampe de puissance $P = 100\text{W}$.