

# Tube de Kundt

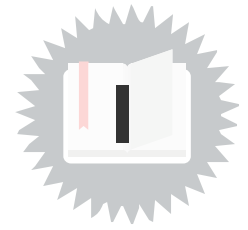
Version papier téléchargeable



# Table des matières

<b>I - Objectifs</b>	<b>3</b>
<b>II - Rappels théoriques</b>	<b>4</b>
<b>III - Manipulation virtuelle sous forme d'une animation</b>	<b>7</b>
<b>IV - Matériels</b>	<b>8</b>
<b>V - Partie expérimentale (avec vidéos)</b>	<b>11</b>
1. Montage.....	11
2. Limitations .....	12
3. Première mesure de c.....	12
4. Deuxième mesure de c .....	13
4.1. mise en évidence des fréquences de résonance du système.....	13
4.2. étude du système d'ondes stationnaires, modes propres .....	13
<b>VI - Partie expérimentale (avec images animées)</b>	<b>14</b>
1. première mesure de c.....	14
1.1. fréquence 600 Hz.....	14
1.2. fréquence 900 Hz.....	14
1.3. fréquence 1200 Hz.....	15
1.4. fréquence 1500 Hz.....	15
1.5. fréquence 1800 Hz.....	15
1.6. fréquence 2000 Hz.....	15
2. deuxième mesure de c.....	15
2.1. mise en évidence des fréquences de résonance.....	15
2.2. Etude du système d'ondes stationnaires, modes propres .....	16
<b>Conclusion</b>	<b>18</b>

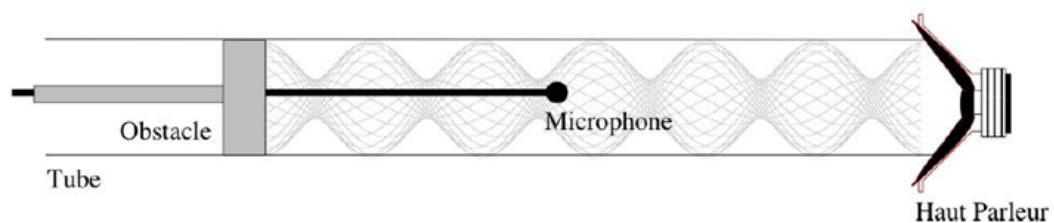
# Objectifs



- Mettre en évidence les ventres et nœuds de vibration d'une onde sonore stationnaire avec un microphone.
- Déterminer la longueur d'onde  $\lambda$  à partir de l'écartement des ventres (ou nœuds) de vibration pour différentes fréquences d'excitation  $f_{exc}$
- Mesurer la vitesse du son dans l'air,  $c$ , par différentes méthodes

Dans un tube de Kundt, on peut, à l'aide d'un haut-parleur, générer des ondes stationnaires en produisant des ondes sonores qui présentent une fréquence de résonance adéquate et qui sont réfléchies à l'autre extrémité d'une paroi.

En connaissant la longueur du tube, on peut déterminer la vitesse des ondes à partir de la fréquence de résonance et du numéro de l'harmonique.



[cf. Objectifs]



# Rappels théoriques

Dans l'air et dans d'autres gaz, les ondes sonores se propagent sous forme de modifications rapides de pression et de densité.

Le plus simple est de les décrire à l'aide de la pression acoustique, qui se superpose à la pression atmosphérique.

Comme variante à la pression acoustique  $P$ , on peut aussi se servir de la vitesse acoustique  $u$  pour décrire une onde sonore, c'est-à-dire la vitesse moyenne des particules à l'endroit  $x$  dans le fluide oscillant au temps  $t$ .

La pression et la vitesse acoustiques sont corrélées par l'équation de mouvement d'Euler :

$$-\frac{\partial P}{\partial x} = \rho_0 \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \quad eq(1)$$

( $\rho_0$ : masse volumique du gaz)

Dans le tube de Kundt, les ondes sonores se propagent le long du tube.

Elles peuvent donc être décrites par une équation d'onde unidimensionnelle qui s'applique tant à la pression qu'à la vitesse acoustique :

$$-\frac{\partial^2 P(x, t)}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 P(x, t)}{\partial x^2} \quad eq(2)$$

ou

$$-\frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2}$$

avec  $c$  : vitesse de propagation des ondes sonores.

Dans un gaz parfait de masse molaire  $M$  et de température  $T$  on a

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \text{ avec } \gamma = \frac{C_p}{C_v}; R = 8,315 JK^{-1} mol^{-1} \quad eq(3)$$

La détermination de la vitesse du son dans un gaz permet donc de déduire des grandeurs thermodynamiques tels que les chaleurs spécifiques à pression et volume constant,  $C_p$  et  $C_v$ .

Dans l'expérience, on observe des ondes sinusoïdales qui sont complètement réfléchies à l'extrémité du tube de Kundt.

Comme solutions de l'équation d'onde, on observe donc les superpositions d'ondes incidentes et réfléchies :

$$P = (A_i e^{j(-\frac{2\pi x}{\lambda})} + A_r e^{j(-\frac{2\pi x}{\lambda})}) e^{j(\omega t)} \quad eq(4)$$

avec  $A_i(u_i)$  et  $A_r(u_r)$  les amplitudes de l'onde incidente et réfléchie, respectivement ; la pulsation  $\omega = 2\pi f$  et  $\lambda$  la longueur d'onde telle que :

$$\lambda \cdot f = c \quad eq(5)$$

En appliquant ces solutions à l'équation (1) et en considérant séparément les ondes incidentes et réfléchies, on obtient les relations suivantes :

$$A_i = u_i Z \text{ et } A_r = u_r Z \quad eq(6)$$

La grandeur  $Z = C\rho_0$  est l'impédance acoustique caractéristique du fluide.

Elle joue un rôle important lorsqu'on observe les réflexions d'une onde sonore arrivant sous incidence normale contre un parois d'impédance  $W$ .

Le coefficient de réflexion en amplitude est donc :

$$\begin{aligned} r_u &= \frac{u_r}{u_i} = \frac{Z - W}{Z + W} && (\text{en vitesse}) && \text{et} \\ r_p &= \frac{A_r}{A_i} = \frac{W - Z}{Z + W} && (\text{en pression}) && eq(8) \end{aligned}$$

Dans notre expérience,  $W$  est beaucoup plus élevé que  $Z$  et, par conséquent,

$$r_u = -1 \text{ et } r_p = +1.$$

Si, pour des raisons de simplicité, on imagine la surface rigide à  $x = 0$ , il résulte de (4):

$$\begin{aligned} P &= A_i \left( e^{j\left(-\frac{2\pi x}{\lambda}\right)} + e^{j\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right)} \right) e^{j(\omega t)} && eq(9) \\ &= 2A_i \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) e^{j(\omega t)} \end{aligned}$$

et

$$\begin{aligned} u &= u_i \left( e^{j\left(-\frac{2\pi x}{\lambda}\right)} - e^{j\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right)} \right) e^{j(\omega t)} && eq(10) \\ &= 2u_i \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) e^{j(\omega t)} \end{aligned}$$

La réalité physique ne retient que les parties réelles de ces termes qui correspondent à des ondes sonores stationnaires (il n'y a plus de propagation) dont la pression acoustique contre la paroi (donc à  $x = 0$ ) présente un ventre, tandis que la vitesse acoustique y montre un nœud.

En outre, la vitesse précède la pression d'un déphasage de  $90^\circ$ .

On peut montrer que deux nœuds voisins sont séparés par :

$$d_{nn} = \frac{\lambda}{2}$$

et deux ventres voisins par :

$$d_{vv} = \frac{\lambda}{2}$$

Les ondes sonores sont générées par un haut-parleur placé en  $x = L$ .

Ces ondes oscillent à la fréquence  $f$ . La pression acoustique y forme également un ventre et la vitesse acoustique un nœud.

Ces conditions ne peuvent être réunies que si  $L$  constitue un multiple entier d'une demi-longueur d'onde :

$$L = n \frac{\lambda_n}{2} \quad eq(11)$$

Par conséquent, en raison de (4), les fréquences doivent remplir la condition de résonance d'onde stationnaire

$$f_n = n \cdot \frac{c}{2L} \quad eq(12)$$

On dit qu'il y a résonance pour certain modes propres d'oscillation. La fréquence la plus basse accessible est la fréquence fondamentale et les fréquences successives suivantes sont les harmoniques.

Figure 1 : Schéma représentant la pression acoustique dans un tube (de longueur L) fermé à ses deux extrémités, pour  $n=1$ ,  $n=2$  et  $n=3$  (du haut vers le bas) :  $L = n \frac{\lambda_n}{2}$ , avec  $n = 1, 2, 3, \dots$



# Manipulation virtuelle sous forme d'une animation

---



L'animation suivante vous permet de visualiser la propagation d'une onde sonore dans un tube de Kundt à extrémité fermée :

[cf. Tube de Kundt]

Dans cette animation vous avez la possibilité:

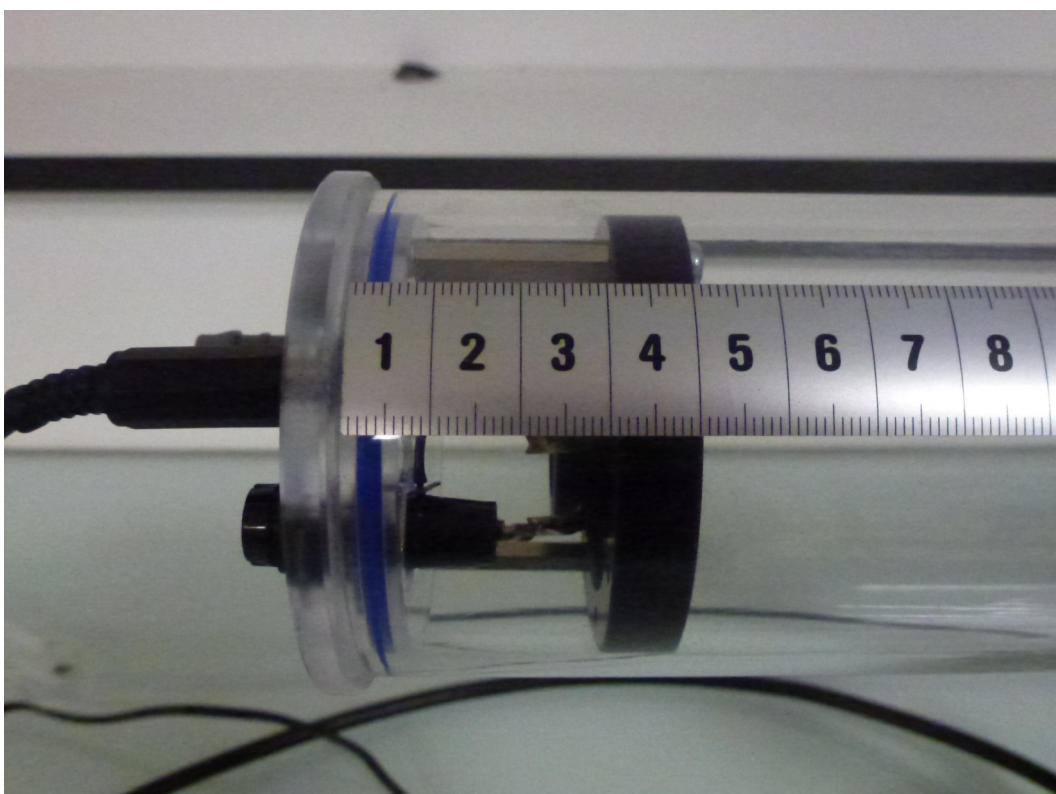
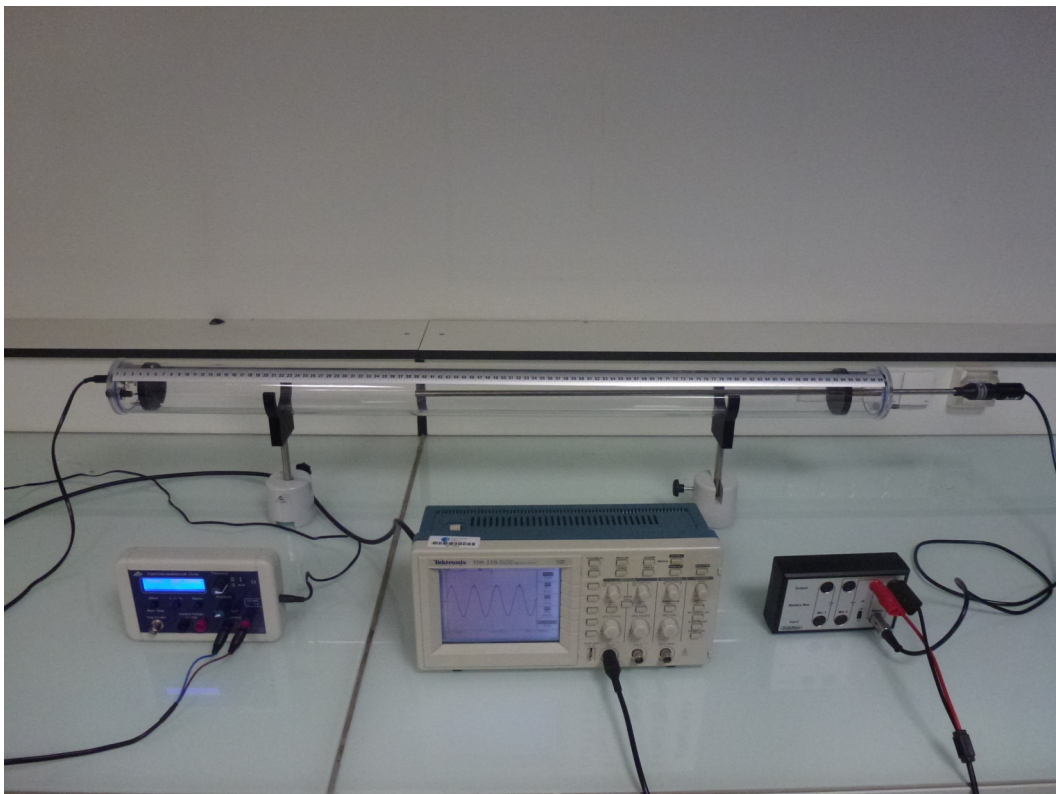
- de comprendre le phénomène des ondes stationnaires dans un tube à extrémité fermée
- de mettre en évidence le phénomène de résonance lié soit à la longueur du tube soit à la fréquence de l'onde sonore
- de vérifier la relation qui relie la longueur du tube à la longueur d'onde de l'onde acoustique

Accès direct : <https://www.geogebra.org/m/ehavkjps>

# Matériels

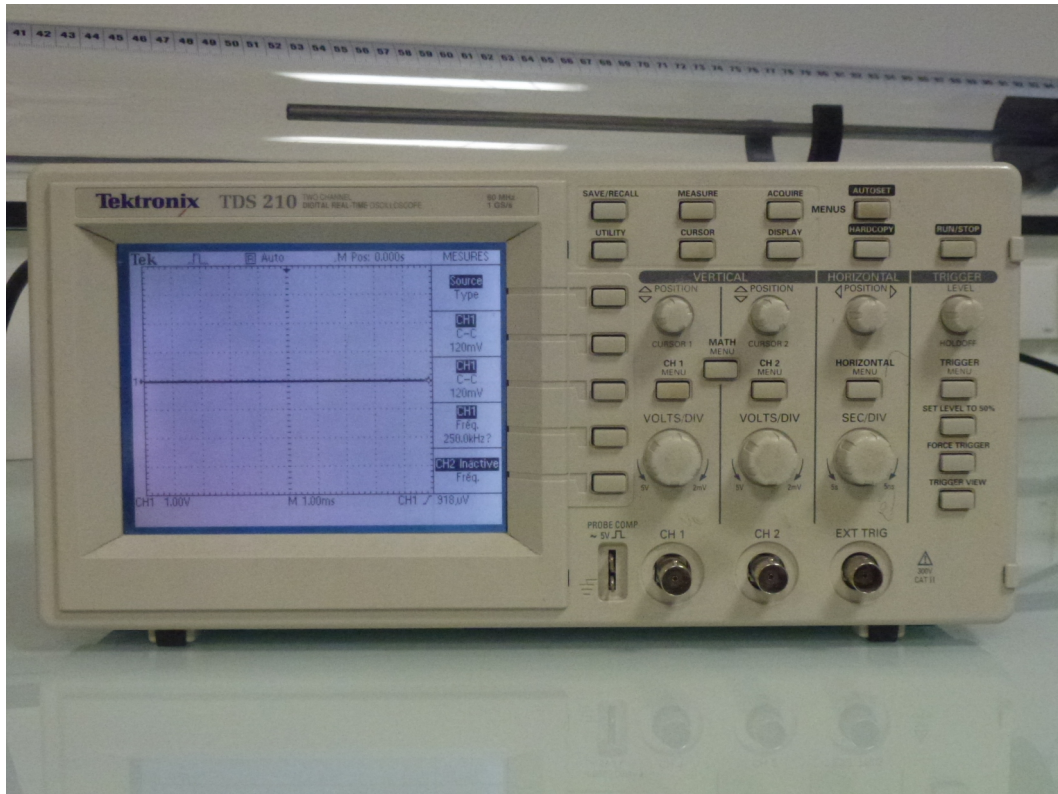


[cf. Présentation du matériel]







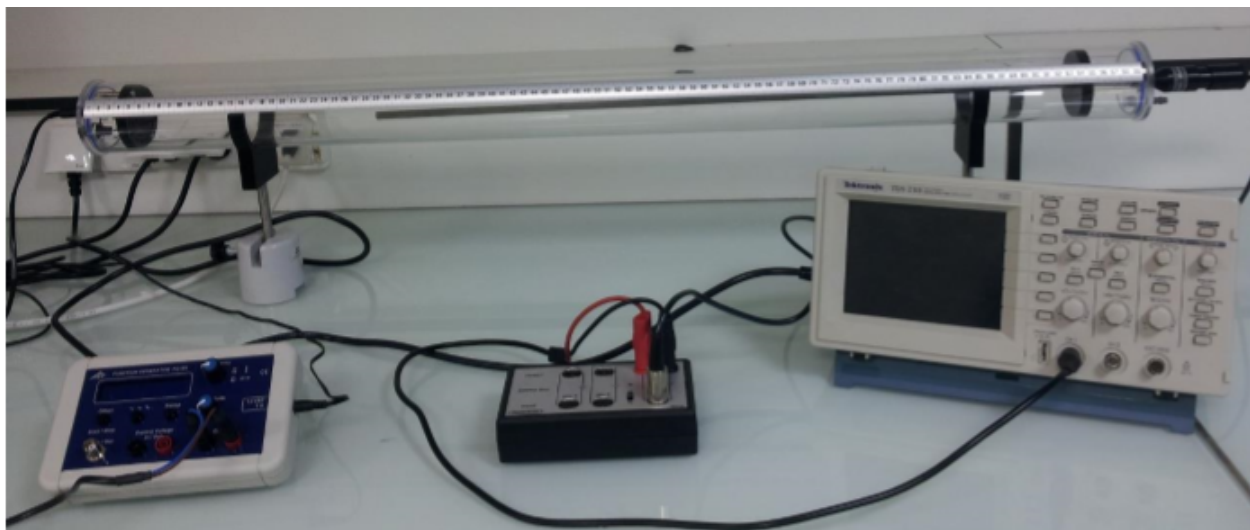


XX

# Partie expérimentale (avec vidéos)



## 1. Montage



Le tube de Kundt (figure ci-dessus) comprend un tube de verre acrylique de dimensions finies et section constante (longueur 1000 mm ; diamètre 70 mm) muni d'une échelle graduée.

Dans la configuration actuelle, ses extrémités son fermées par des terminaisons rigides et réfléchissantes.

Un haut-parleur est incorporé à une extrémité.

Le générateur de fonctions (FG100) permet de lui délivrer une tension sinusoïdale d'amplitude et fréquence ajustables.

Un microphone miniature (U20600) permettant de mesurer les variations de pression acoustique dans le tube de Kundt, est fixé à l'extrémité d'une longue tige en acier inoxydable.

Le micro est alimenté par un boîtier à pile (U20602).

Le signal détecté par le micro est observé sur la voie CH1 de l'oscilloscope.

On veille en rectifiant l'amplitude du signal délivré par le GBF à ce que le signal mesuré reste sinusoïdal et ne présente pas de distorsion.

[cf. Réalisation du montage]



Les réflexions des ondes sonores sur des objets environnants et aussi sur l'expérimentateur ainsi que l'éventuelle radiation d'ondes sonores de dispositifs expérimentaux voisins risquent d'occasionner des perturbations sur les ondes sonores stationnaires à étudier par interférence.

## 2. Limitations

Les limitations de la méthode du tube de Kundt sont dues au fait que:

1. La longueur d'onde  $\lambda$  de l'onde sonore doit être inférieure à 2 fois la longueur du tube, pour que le phénomène d'ondes stationnaires puisse s'établir.
2. La longueur d'onde  $\lambda$  doit être supérieure à environ 1,7 fois le diamètre du tube, pour qu'un régime d'ondes planes, ou presque planes, puisse s'établir, en évitant les effets de guide d'onde

Calculs préliminaires :

A partir des dimensions du tube, déterminer la bande de fréquence sur laquelle le tube est utilisable

Note :

Vous pouvez calculer la vitesse du son dans l'air à l'aide de la relation

$$c = 20.16 \sqrt{T} , \text{ avec } T = \text{température en Kelvin}$$

## 3. Première mesure de c

Le principe consiste à mesurer la longueur d'onde pour différentes fréquences à partir de la position des ventres et des nœuds.

- Régler une fréquence d'excitation  $f = 400\text{Hz}$  sur le générateur de fonctions.
- Mettre en marche le microphone et l'oscilloscope puis chercher un maximum de tension avec le microphone.
- Par variation de l'amplitude de sortie du générateur de fonctions, régler le volume de manière à que le microphone ne sature pas (ne pas dépasser un affichage de  $2V$  crête-à crête).

Observer l'alternance de nœuds et de ventres en déplaçant le microphone.

- Noter les positions des maxima et minima de tension – on cherchera à être précis.

Expliquer comment procéder pour mesurer la longueur d'onde  $\lambda \pm \Delta\lambda$ , en minimisant l'incertitude.

[cf. Première mesure de c ; fréquence 400 Hz]

- Répéter l'opération pour 6 fréquences excitatrices entre 600 et 2000Hz.

fréquence : 600 Hz

[cf. Première mesure de c : 600 Hz]

fréquence : 900 Hz

[cf. première mesure de c ; fréquence : 900 Hz]

fréquence : 1200 Hz

[cf. Première mesure de c : fréquence 1200 Hz]

fréquence : 1500 Hz

[cf. Première mesure de c : fréquence 1500 Hz]

fréquence : 1800 Hz

[cf. première mesure de c : fréquence 1800 Hz]

fréquence : 2000 Hz

[cf. première mesure de c : fréquence 2000 Hz]

En portant sur un graphe  $\lambda$  en fonction de  $\frac{1}{f_{exc}}$  déduire la vitesse du son,  $c \pm \Delta c$ .

Commenter.

## 4. Deuxième mesure de $c$

### 4.1. mise en évidence des fréquences de résonance du système

- Imposer un signal sinusoïdal de fréquence  $200\text{Hz}$ .
- Placer le microphone au voisinage du plan réfléchissant situé au bout du tube : il se trouve sur un ventre de pression.
- Faire varier la fréquence du générateur, en partant de  $200\text{Hz}$  sans dépasser  $2500\text{Hz}$ , et repérer les 10 premières fréquences de résonance ( $f_n \pm \Delta f_n$  en fonction de l'ordre d'apparition  $n$ ) : on observe alors sur la voie **CH1** de l'oscilloscope une amplitude maximale.

[cf. deuxième mesure de  $c$  : fréquences de résonance]

Tracer  $f_n(n)$  et en déduire une nouvelle valeur de vitesse du son,  $c \pm \Delta c$ .

Confronter les deux valeurs de  $c$  et déduire la valeur du coefficient  $\gamma$  de l'air.

### 4.2. étude du système d'ondes stationnaires, modes propres

On cherche à étudier l'allure du signal acoustique dans le tube.

Mesurer l'amplitude du signal en différents points du tube pour les cinq premières fréquences de résonance  $f_n$  déterminées dans la partie précédente du TP.

En particulier relever les diverses positions des maxima et minima du signal observé à l'oscilloscope.

Tracer l'amplitude du champ d'onde à l'intérieure du tube.

Commenter les résultats et conclure.

[cf. 1ère fréquence de résonance]

[cf. 2ème fréquence de résonance]

[cf. 3ème fréquence de résonance]

[cf. 4ème fréquence de résonance]

[cf. 5ème fréquence de résonance]

[cf. 6ème fréquence de résonance]

[cf. 7ème fréquence de résonance]

[cf. 8ème fréquence de résonance]

[cf. 9ème fréquence de résonance]

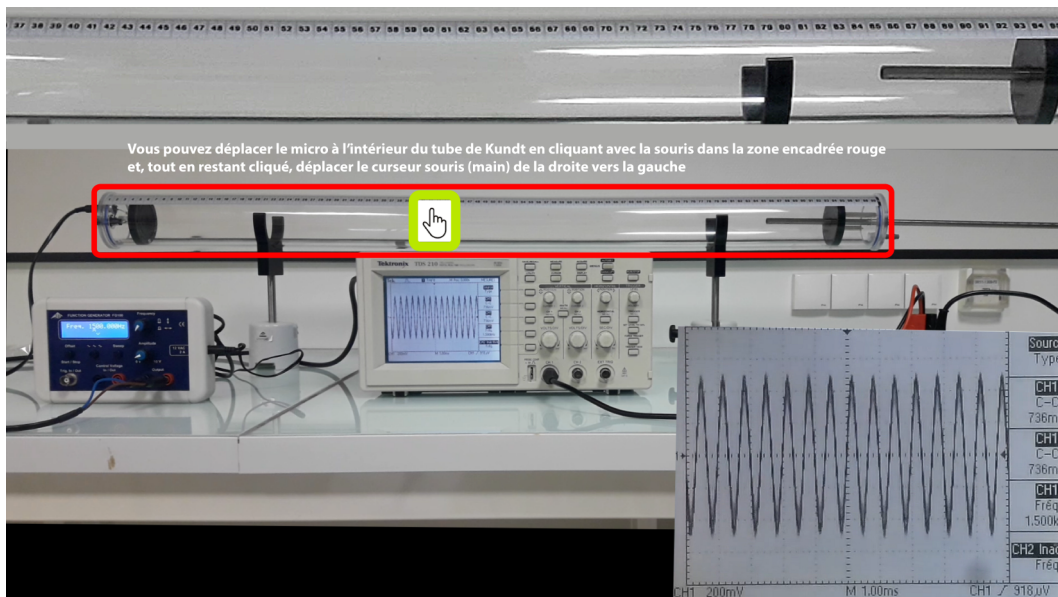
[cf. 10ème fréquence de résonance]

# Partie expérimentale (avec images animées)



Dans la mise en images des différentes manipulations du TP vous aurez la possibilité de faire les mesures en manipulant la tige du microphone ou le bouton de réglage en fréquence du générateur de fréquences comme si vous le faisiez sur la vraie manipulation.

**Les images animées qui suivent ne pourront être téléchargées que si vous êtes en ligne avec un bon débit !**



## 1. première mesure de c

### 1.1. fréquence 600 Hz

dans la séquence d'images animées qui suit vous avez la possibilité, de déplacer le microphone en bout de tige grâce au curseur souris (main) que vous déplacerez de gauche à droite sur le tube de Kundt grandeur réelle.

Vous pourrez faire vos relevés de position du microphone sur l'image agrandie du tube de Kundt (en partie supérieure de l'image).

Vous pouvez même encore agrandir cette partie de l'image en utilisant le zoom qui va placer la fenêtre de zoom en dessous de l'image générale.

[cf. premiere\_mesure\_c\_600\_Hz]

### 1.2. fréquence 900 Hz

dans la séquence d'images animées qui suit vous avez la possibilité, de déplacer le microphone en bout de tige grâce au curseur souris (main) que vous déplacerez de gauche à droite sur le tube de Kundt grandeur réelle.

Vous pourrez faire vos relevés de position du microphone sur l'image agrandie du tube de Kundt (en partie supérieure de l'image).

Vous pouvez même encore agrandir cette partie de l'image en utilisant le zoom qui va placer la fenêtre de zoom en dessous de l'image générale.

[cf. ]

### **1.3. fréquence 1200 Hz**

dans la séquence d'images animées qui suit vous avez la possibilité, de déplacer le microphone en bout de tige grâce au curseur souris (main) que vous déplacerez de gauche à droite sur le tube de Kundt grandeur réelle.

Vous pourrez faire vos relevés de position du microphone sur l'image agrandie du tube de Kundt (en partie supérieure de l'image).

Vous pouvez même encore agrandir cette partie de l'image en utilisant le zoom qui va placer la fenêtre de zoom en dessous de l'image générale.

[cf. premiere\_mesure\_c\_1200\_Hz]

### **1.4. fréquence 1500 Hz**

dans la séquence d'images animées qui suit vous avez la possibilité, de déplacer le microphone en bout de tige grâce au curseur souris (main) que vous déplacerez de gauche à droite sur le tube de Kundt grandeur réelle.

Vous pourrez faire vos relevés de position du microphone sur l'image agrandie du tube de Kundt (en partie supérieure de l'image).

Vous pouvez même encore agrandir cette partie de l'image en utilisant le zoom qui va placer la fenêtre de zoom en dessous de l'image générale.

[cf. premiere\_mesure\_c\_1500\_Hz]

### **1.5. fréquence 1800 Hz**

dans la séquence d'images animées qui suit vous avez la possibilité, de déplacer le microphone en bout de tige grâce au curseur souris (main) que vous déplacerez de gauche à droite sur le tube de Kundt grandeur réelle.

Vous pourrez faire vos relevés de position du microphone sur l'image agrandie du tube de Kundt (en partie supérieure de l'image).

Vous pouvez même encore agrandir cette partie de l'image en utilisant le zoom qui va placer la fenêtre de zoom en dessous de l'image générale.

[cf. premiere\_mesure\_c\_1800\_Hz]

### **1.6. fréquence 2000 Hz**

dans la séquence d'images animées qui suit vous avez la possibilité, de déplacer le microphone en bout de tige grâce au curseur souris (main) que vous déplacerez de gauche à droite sur le tube de Kundt grandeur réelle.

Vous pourrez faire vos relevés de position du microphone sur l'image agrandie du tube de Kundt (en partie supérieure de l'image).

Vous pouvez même encore agrandir cette partie de l'image en utilisant le zoom qui va placer la fenêtre de zoom en dessous de l'image générale.

[cf. premiere\_mesure\_c\_2000\_Hz]

## **2. deuxième mesure de c**

### **2.1. mise en évidence des fréquences de résonance**

## 2.2. Etude du système d'ondes stationnaires, modes propres

### a) 1ère fréquence de résonance

[cf. modes\_propres\_video\_5\_1\_560\_Hz]

Dans cette animation vous avez la possibilité d'étudier l'allure du signal acoustique dans le tube.

Pour cela on mesure l'amplitude du signal en différents points du tube.

En particulier on relève les diverses positions des maxima et minima du signal observé à l'oscilloscope.

Puis on tracera ensuite l'amplitude du champ d'onde à l'intérieur du tube.

### b) 2ème fréquence de résonance

[cf. modes\_propres\_video\_5\_1\_690\_Hz]

Dans cette animation vous avez la possibilité d'étudier l'allure du signal acoustique dans le tube.

Pour cela on mesure l'amplitude du signal en différents points du tube.

En particulier on relève les diverses positions des maxima et minima du signal observé à l'oscilloscope.

Puis on tracera ensuite l'amplitude du champ d'onde à l'intérieur du tube.

### c) 3ème fréquence de résonance

[cf. modes\_propres\_video\_5\_1\_808\_Hz]

Dans cette animation vous avez la possibilité d'étudier l'allure du signal acoustique dans le tube.

Pour cela on mesure l'amplitude du signal en différents points du tube.

En particulier on relève les diverses positions des maxima et minima du signal observé à l'oscilloscope.

Puis on tracera ensuite l'amplitude du champ d'onde à l'intérieur du tube.

### d) 4ème fréquence de résonance

[cf. modes\_propres\_video\_5\_1\_985\_Hz]

Dans cette animation vous avez la possibilité d'étudier l'allure du signal acoustique dans le tube.

Pour cela on mesure l'amplitude du signal en différents points du tube.

En particulier on relève les diverses positions des maxima et minima du signal observé à l'oscilloscope.

Puis on tracera ensuite l'amplitude du champ d'onde à l'intérieur du tube.

### e) 5ème fréquence de résonance

[cf. modes\_propres\_video\_5\_1\_1168\_Hz]

Dans cette animation vous avez la possibilité d'étudier l'allure du signal acoustique dans le tube.

Pour cela on mesure l'amplitude du signal en différents points du tube.

En particulier on relève les diverses positions des maxima et minima du signal observé à l'oscilloscope.

Puis on tracera ensuite l'amplitude du champ d'onde à l'intérieur du tube.

### f) 6ème fréquence de résonance

[cf. modes\_propres\_video\_5\_1\_1357\_Hz]

Dans cette animation vous avez la possibilité d'étudier l'allure du signal acoustique dans le tube.

Pour cela on mesure l'amplitude du signal en différents points du tube.

En particulier on relève les diverses positions des maxima et minima du signal observé à l'oscilloscope.

Puis on tracera ensuite l'amplitude du champ d'onde à l'intérieur du tube.



### g) 7ème fréquence de résonance

[cf. modes\_propres\_video\_5\_1\_1546\_Hz]

Dans cette animation vous avez la possibilité d'étudier l'allure du signal acoustique dans le tube.

Pour cela on mesure l'amplitude du signal en différents points du tube.

En particulier on relève les diverses positions des maxima et minima du signal observé à l'oscilloscope.

Puis on tracera ensuite l'amplitude du champ d'onde à l'intérieur du tube.

### h) 8ème fréquence de résonance

[cf. modes\_propres\_video\_5\_1\_1736\_Hz]

Dans cette animation vous avez la possibilité d'étudier l'allure du signal acoustique dans le tube.

Pour cela on mesure l'amplitude du signal en différents points du tube.

En particulier on relève les diverses positions des maxima et minima du signal observé à l'oscilloscope.

Puis on tracera ensuite l'amplitude du champ d'onde à l'intérieur du tube.

### i) 9ème fréquence de résonance

[cf. modes\_propres\_video\_5\_1\_1927\_Hz]

Dans cette animation vous avez la possibilité d'étudier l'allure du signal acoustique dans le tube.

Pour cela on mesure l'amplitude du signal en différents points du tube.

En particulier on relève les diverses positions des maxima et minima du signal observé à l'oscilloscope.

Puis on tracera ensuite l'amplitude du champ d'onde à l'intérieur du tube.

### j) 10ème fréquence de résonance

[cf. modes\_propres\_video\_5\_1\_2117\_Hz]

Dans cette animation vous avez la possibilité d'étudier l'allure du signal acoustique dans le tube.

Pour cela on mesure l'amplitude du signal en différents points du tube.

En particulier on relève les diverses positions des maxima et minima du signal observé à l'oscilloscope.

Puis on tracera ensuite l'amplitude du champ d'onde à l'intérieur du tube.

# Conclusion

---



Commenter les résultats et conclure.