

Vitesse du son dans l'air

GENERER ET MESURER LES ONDES STATIONNAIRES SONORES DANS UN TUBE DE KUNDT.

- Générer des ondes stationnaires sonores dans un tube de Kundt fermé des deux côtés.
- Mesurer la fréquence de base en fonction de la longueur du tube de Kundt.
- Mesurer les fréquences de la composante fondamentale et de l'harmonique avec une longueur de tube fixe
- Déterminer la vitesse d'onde à partir des fréquences de résonance.

UE1070320

06/16 UD

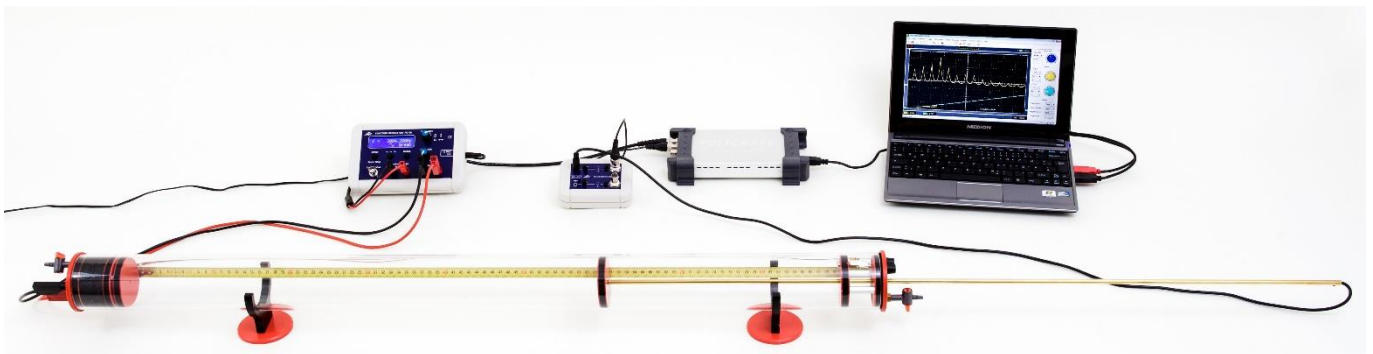


Fig. 1: Agencement de la mesure.

NOTIONS DE BASE GENERALES

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.

Dans l'air et dans d'autres gaz, les ondes sonores se propagent sous forme de modifications rapides de pression et de pression. 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 v pour décrire une onde sonore, c'est-à-dire la vitesse moyenne des particules à l'endroit x dans le fluide oscillant au moment t . La pression et la vitesse acoustiques sont corrélées par ex. par l'équation de mouvement d'Euler

$$(1) \quad -\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_0 \cdot \frac{\partial v}{\partial t}$$

ρ_0 : densité 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 :

$$(2) \quad \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} \quad \text{ou}$$

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

c : vitesse du son

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

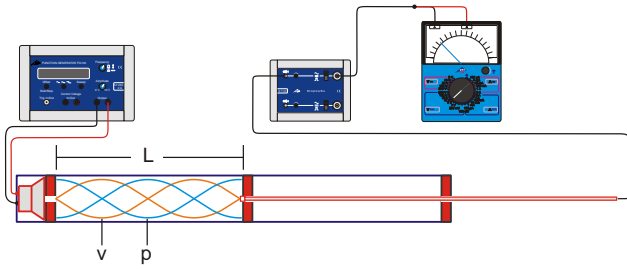


Fig. 2: Représentation schématique du montage expérimental

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

$$(3) \quad p = p_{0>} \cdot e^{2\pi i \left(f \cdot t - \frac{x}{\lambda} \right)} + p_{0<} \cdot e^{2\pi i \left(f \cdot t + \frac{x}{\lambda} \right)}$$

$$v = v_{0>} \cdot e^{2\pi i \left(f \cdot t - \frac{x}{\lambda} \right)} + v_{0<} \cdot e^{2\pi i \left(f \cdot t + \frac{x}{\lambda} \right)}$$

$p_{0>}, v_{0>}$: amplitudes de l'onde incidente,
 $p_{0<}, v_{0<}$: amplitudes de l'onde réfléchie,
 f : fréquence, λ : longueur d'onde

Avec

$$(4) \quad f \cdot \lambda = c.$$

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

$$(5) \quad p_{0>} = v_{0>} \cdot Z \quad \text{ou} \quad p_{0<} = v_{0<} \cdot Z.$$

La grandeur

$$(6) \quad Z = c \cdot \rho_0$$

est l'impédance acoustique caractéristique qui correspond à l'impédance caractéristique du fluide. Elle joue un rôle important lorsqu'on observe les réflexions d'une onde sonore contre une paroi d'une impédance W :

Dans ce cas :

$$(7) \quad r_v = \frac{v_{0<}}{v_{0>}} = \frac{Z - W}{Z + W} \quad \text{et} \quad r_p = \frac{p_{0<}}{p_{0>}} = \frac{\frac{1}{Z} - \frac{1}{W}}{\frac{1}{Z} + \frac{1}{W}}$$

Dans l'expérience, W est sensiblement supérieure à Z et, par conséquent, $r_v = 1$ et $r_p = -1$.

Si, pour des raisons de simplicité, on imagine la paroi à $x = 0$, il résulte de (3) pour la part spatiale de l'onde sonore :

$$(8) \quad p = p_{0>} \cdot \left(e^{-2\pi i \cdot \frac{x}{\lambda}} + e^{+2\pi i \cdot \frac{x}{\lambda}} \right) \cdot e^{-2\pi i \cdot f \cdot t}$$

$$= 2 \cdot p_{0>} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot x\right) \cdot e^{-2\pi i \cdot f \cdot t}$$

et

$$v = v_{0>} \cdot \left(e^{-2\pi i \cdot \frac{x}{\lambda}} - e^{+2\pi i \cdot \frac{x}{\lambda}} \right) \cdot e^{-2\pi i \cdot f \cdot t}$$

$$= -2 \cdot i \cdot v_{0>} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot x\right) \cdot e^{-2\pi i \cdot f \cdot t}$$

La réalité physique ne retient que les parts réelles de ces termes qui correspondent à des ondes stationnaires sonores dont la pression acoustique contre la paroi (donc à $x = 0$) présente un anti-nœud, tandis que la vitesse acoustique y montre un nœud. En outre, la vitesse précède la pression d'un déphasage de 90° .

Dans l'écart L avec la paroi, les ondes sonores sont générées au moyen d'un haut-parleur qui oscille à la fréquence f . Là, la pression forme également un anti-nœud 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 :

$$(9) \quad L = n \cdot \frac{\lambda_n}{2}$$

Par conséquent, en raison de (3), les fréquences doivent remplir la condition de résonance

$$(10) \quad f_n = n \cdot \frac{c}{2 \cdot L}.$$

LISTE DES APPAREILS

1	Tube de Kundt E	1017339 (U8498308)
1	Sonde microphone, longue	1017342 (U8498282)
1	Amplificateur de microphone @230V	1014520 (U8498283-230)
ou		
1	Amplificateur de microphone @115V	1014521 (U8498283-115)
1	Générateur de fonctions FG 100 @230V	1009957 (U8533600-230)
ou		
1	Générateur de fonctions FG 100 @115V	1009956 (U8533600-115)
1	Oscilloscope USB 2x50 MHz	1017264 (U112491)
1	Multimètre analogique Escola 100	1013527 (U8557380)
2	Cordons HF BNC / douille 4 mm	1002748 (U11257)
1	Paire de cordons de sécurité, 75 cm	1002849 (U13812)
1	Cordon HF	1002746 (U11255)

MONTAGE ET REALISATION

- Mettre le tube acoustique en place à l'aide des pieds (fig. 1).
- Disposer et aligner dans le tube acoustique d'abord le disque capillaire, puis le bouchon avec les douilles de connexion pour le haut-parleur.
- Introduire la sonde microphonique longue à travers les perforations jusqu'en butée dans le bouchon avec les douilles de connexion pour cartouche chauffante et dans la rondelle de guidage.
- Visser la rondelle de sonde sur la sonde microphonique longue.
- Disposer dans le tube acoustique le bouchon avec les douilles de connexion pour cartouche chauffante avec la sonde microphonique longue et la rondelle de sonde vissée.

Note:

Le cas échéant, appliquer un peu de glycérine ou de savon dans les bagues étanches pour faciliter l'insertion.

- Fixer la graduation déplaçable dans le support du pied et la déplacer de sorte que le repère zéro coïncide au bord avant du disque capillaire.
- Brancher les douilles de sortie du générateur de fonctions à la paire de douilles pour alimenter le haut-parleur.
- Brancher la sonde microphone longue à l'entrée du canal A de l'enceinte à microphone.
- Brancher la sortie du canal A du boîtier microphone au multimètre analogique au moyen du câble adaptateur BNC / 4 mm.
- Brancher le bloc d'alimentation enfichable au boîtier microphone et le raccorder au secteur.

Dans l'expérience, la fréquence f du haut-parleur varie en permanence, tandis que la sonde microphonique mesure la pression acoustique sur la paroi de réflexion. La résonance est obtenue lorsque le signal microphonique présente une amplitude maximale.

Fréquence de base en fonction de la longueur

- Retirer ou introduire la sonde microphonique, régler la longueur $L = 80$ cm entre le disque capillaire et la rondelle de sonde.
- Harmoniser l'amplitude sur le générateur de fonctions et la plage de mesure sur le multimètre et les adapter le cas échéant pendant la mesure. Observer la puissance maximale du haut-parleur ($U_{\text{eff}} = 6$ V).
- Régler la fréquence à 150 Hz et l'augmenter lentement. Trouver la fréquence à laquelle le multimètre indique la *première valeur maximale* et noter la valeur de la fréquence dans le tab .1.

La fréquence trouvée correspond à la fréquence f_1 de la composante fondamentale pour $L = 80$ cm.

- Régler la longueur L entre le disque capillaire et la rondelle de sonde en pas de 10 cm jusqu'à obtenir $L = 10$ cm et répéter à chaque fois la mesure. Comme fréquence de départ, utiliser à chaque fois la fréquence de résonance f_1 trouvée au cours de la mesure précédente.

Fréquences de la composante fondamentale et de l'harmonique avec une longueur fixe

- Retirer ou introduire la sonde microphonique, régler la longueur fixe $L = 60$ cm entre le disque capillaire et la rondelle de sonde.
- Harmoniser l'amplitude sur le générateur de fonctions et la plage de mesure sur le multimètre et les adapter le cas échéant pendant la mesure. Observer la puissance maximale du haut-parleur ($U_{\text{eff}} = 6$ V).
- Augmenter lentement la fréquence de 250 Hz à 3500 Hz. Noter les fréquences auxquelles le multimètre indique des valeurs maximales dans le tab. 2.

Balayage de fréquence

- Retirer ou introduire la sonde microphonique, régler la longueur fixe $L = 60$ cm entre le disque capillaire et la rondelle de sonde.
- Brancher la sortie du canal A du boîtier microphone au canal CH1 de l'oscilloscope USB au moyen d'un câble HF.
- Relier la paire de douilles « Entrée tension de commande / Sortie rampe » du générateur de fonctions directement au canal CH2 de l'oscilloscope USB.
- Sur le générateur de fonctions, appuyer sur la touche « Sweep » et régler les paramètres

Freq. start	100 Hz
stop	6000 Hz
int. continuous mode	
Time	4,00 sec

- Sur l'oscilloscope USB, déplacer le repère pour la position de déclenchement horizontale entièrement à gauche, le repère de position y de CH1 d'une demi-case vers le bas à compter du milieu et le repère de position y de CH2 entièrement vers le bas, puis régler les paramètres suivants :

Time/DIV	400 ms
CH1	1,00 V DC
CH2	2,00 V DC
Trigger Mode	Edge
Sweep	Auto
Source	CH2
Slope	-
Level	850 mV

- Lancer le balayage sur le générateur de fonctions et attendre que le spectre de fréquence complet s'affiche sur l'oscilloscope USB.
- Arrêter la mesure en cliquant sur le bouton « Stop » de l'oscilloscope USB et réaliser une capture d'écran.

EXEMPLE DE MESURE ET EVALUATION

Tab. 1 : Fréquences de résonance déterminées de la composante fondamentale ($n = 1$) et longueurs d'onde calculées avec l'équation (9) à différentes longueurs L .

L / m	f_1 / Hz	$\lambda_1 = 2 \cdot L$
0,8	218	1,60 m
0,7	250	1,40 m
0,6	292	1,20 m
0,5	350	1,00 m
0,4	436	0,80 m
0,3	583	0,60 m
0,2	884	0,40 m
0,1	1768	0,20 m

Tab. 2 : Fréquences de résonance déterminées de la composante fondamentale et de l'harmonique et longueurs d'onde calculées avec l'équation (9) à longueur fixe $L = 0,6 \text{ m}$.

n	f_n / Hz	$\lambda_n = \frac{2 \cdot L}{n}$
1	289	1,20 m
2	582	0,60 m
3	876	0,40 m
4	1164	0,30 m
5	1453	0,24 m
6	1746	0,20 m
7	2039	0,17 m
8	2331	0,15 m
9	2623	0,13 m
10	3206	0,12 m
11	3494	0,10 m

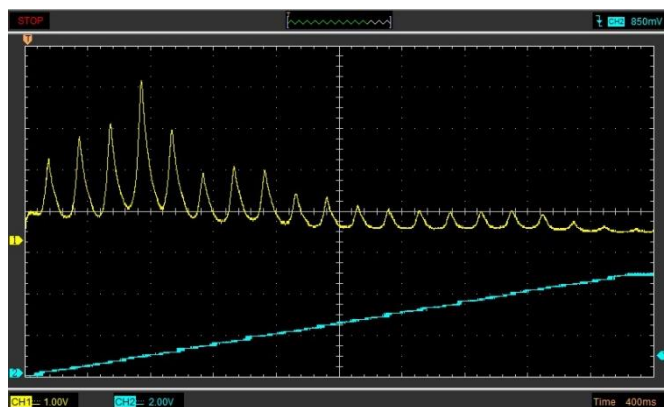


Fig. 3 : Oscillogramme du balayage de fréquence, $L = 0,6 \text{ m}$.

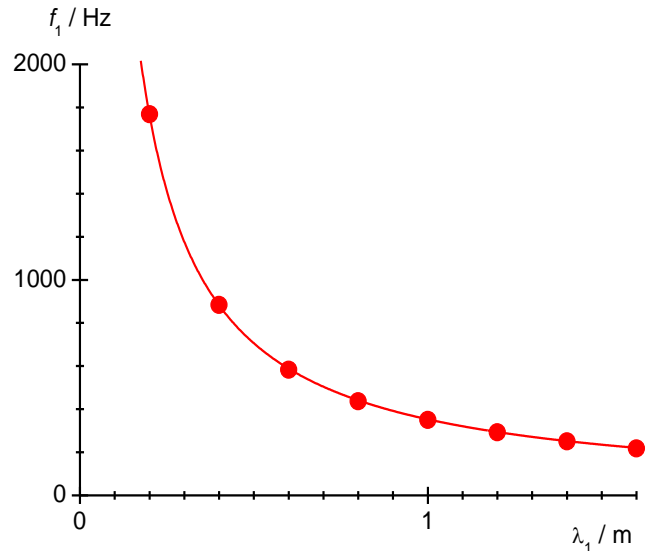


Fig. 4 : Diagramme de fréquence/longueurs d'onde pour les composantes fondamentales ($n = 1$) à différentes longueurs L .

Fréquence de base en fonction de la longueur

Selon l'équation (9), les longueurs d'onde

$$(11) \lambda_1 = 2 \cdot L$$

font partie des fréquences de résonance f_n déterminées des composantes fondamentales.

- Calculer les longueurs d'onde d'après l'équation (11) et les noter dans le tab. 1.
- Représenter les fréquences de résonance déterminées et les longueurs d'onde calculées (tab. 2) dans un diagramme $f-\lambda$ (fig. 4).
- Adapter la fonction d'hyperbole aux points de mesure :

$$(12) f_1 = a \cdot \frac{1}{\lambda_1}$$

L'adaptation confirme l'équation (4). La vitesse du son dans l'air est égale à la pente a :

$$(13) c = a = 353 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

La valeur diverge de quelque 2 % de la valeur théorique $c = 346 \text{ m/s}$ à $T = 25^\circ\text{C}$.

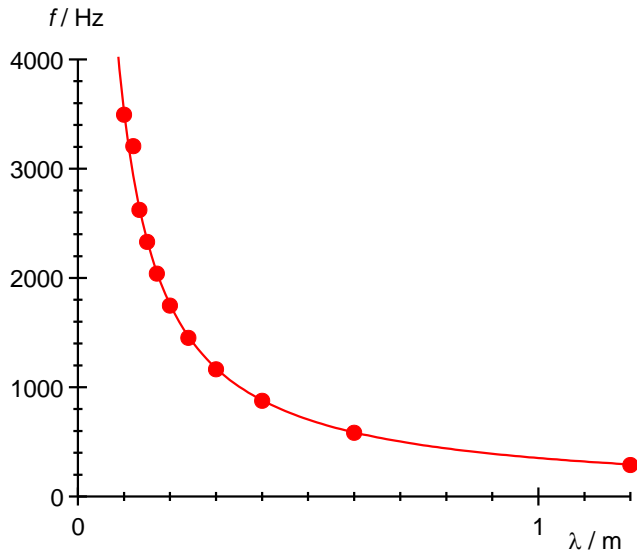


Fig. 5 : Diagramme fréquence/longueurs d'onde pour composantes fondamentales et harmoniques pour $L = 0,6$ m.

Fréquences de la composante fondamentale et de l'harmonique avec une longueur fixe

Selon l'équation (9), les fréquences de résonance déterminées f_n doivent avoir des longueurs d'onde

$$(14) \lambda_n = \frac{2 \cdot L}{n} .$$

- Calculer les longueurs d'onde d'après l'équation (14) et les noter dans le tab. 2.
- Représenter les fréquences de résonance déterminées et les longueurs d'onde calculées (tab. 2) dans un diagramme $f \cdot \lambda$ (fig. 5).
- Adapter la fonction d'hyperbole aux points de mesure :

$$(15) f = a \cdot \frac{1}{\lambda} .$$

L'adaptation confirme l'équation (4). La vitesse du son dans l'air est égale à la pente a :

$$(16) c = a = 356 \frac{\text{m}}{\text{s}} .$$

La valeur diverge de quelque 3% de la valeur théorique $c = 346$ m/s à $T = 25^\circ\text{C}$.

Balayage de fréquence

Les curseurs de l'oscilloscope USB permettent de déterminer les temps t_n qui présentent les maxima du balayage de fréquence. Ces temps ne coïncident pas avec les durées de période T_n correspondant aux fréquences de résonance f_n . Les fréquences de résonance doivent être calculées de la manière suivante à partir des paramètres du balayage de fréquence :

$$(17) f_n = f_{\text{start}} + \frac{t_n}{T_{\text{sweep}}} \cdot (f_{\text{stop}} - f_{\text{start}}) = 100 \text{ Hz} + \frac{t_n}{4 \text{ s}} \cdot 5900 \text{ Hz} .$$

La vitesse du son peut être de nouveau déterminée comme décrit plus haut.

