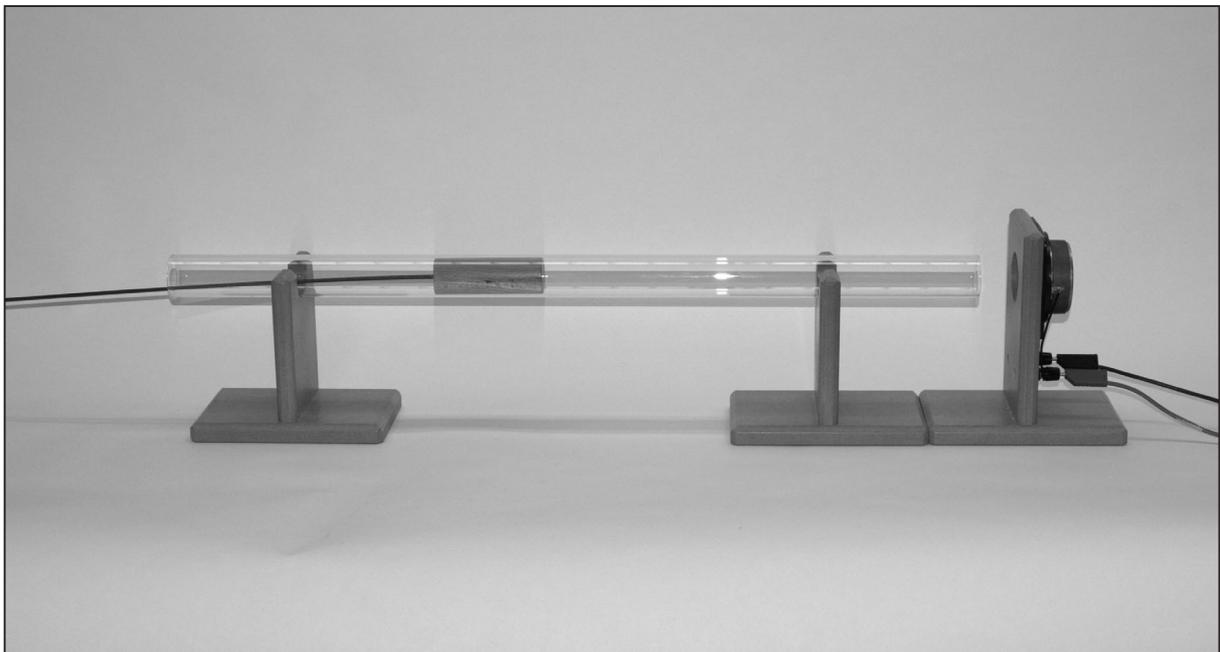


Tube de Kundt: étude de la résonance dans les tuyaux sonores

(Modèle destiné à être utilisé horizontalement, avec supports,
haut-parleur et piston)

MV 3000 13116



Mode d'emploi



Centre technique et pédagogique
de l'Enseignement de la Communauté française

1. But

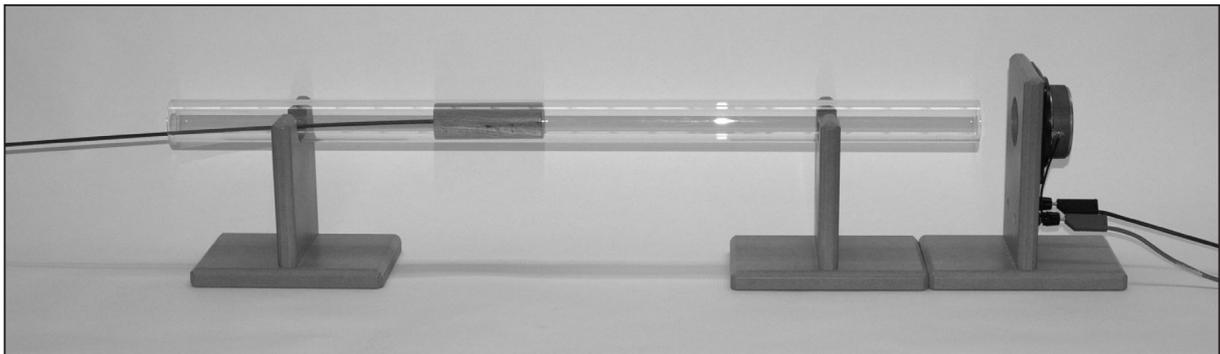
- Observer la formation d'ondes stationnaires dans un tuyau rempli d'air et repérer à quelles fréquences elles se forment pour une longueur choisie de la colonne d'air.
- Observer l'augmentation de l'intensité sonore lors de la résonance.
- Mesurer la longueur d'onde des ondes stationnaires produites.
- Comparer la valeur trouvée expérimentalement à celle trouvée par calcul.
- Déterminer la vitesse de propagation du son dans l'air, à la température du local.

2. Rappel théorique

Les tuyaux sonores sont des tubes remplis d'air. Ils sont susceptibles d'être le siège d'ondes stationnaires quand l'air qu'ils contiennent est excité de manière adéquate: lorsque les conditions de résonance sont réunies, l'intensité sonore augmente et la formation d'ondes stationnaires est alors détectable «à l'oreille».

Si une des extrémités est fermée, le tuyau est dit fermé. Il est dit ouvert si les deux extrémités sont ouvertes.

Tuyau fermé



La photographie ci-dessus représente un tuyau de longueur L , fermé à une extrémité et ouvert à l'autre extrémité. Une source sonore est placée à l'extrémité ouverte.

La résonance et la formation d'ondes stationnaires se remarquent lorsqu'un nœud se forme à l'extrémité fermée et qu'un ventre de déplacement se forme à l'extrémité ouverte.

Les longueurs d'onde qui correspondent à la résonance s'expriment en fonction de la longueur du tuyau par la relation:

$$\lambda_n = \frac{4 \cdot L}{2n - 1} \quad n = 1, 2, 3 \dots$$

Comme $\lambda = \frac{v}{\nu}$, la résonance est atteinte pour les fréquences:

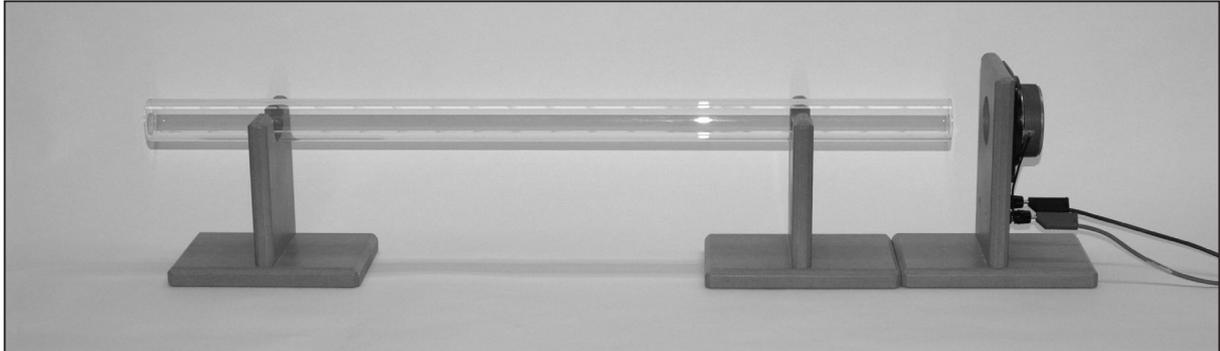
$$\nu_n = (2n - 1) \cdot \frac{v}{4 \cdot L}$$

où v est la vitesse de propagation des ondes sonores à la température de l'expérience.

D'autre part, la formation d'ondes stationnaires dans une colonne d'air permet la détermination de la vitesse de propagation du son dans l'air à partir des mesures des longueurs d'ondes et des fréquences de résonance:

$$v = \lambda_n \cdot \nu_n$$

Tuyau ouvert



La photographie ci-dessus représente un tuyau de longueur L , ouvert à ses extrémités. Une source sonore est placée à une des extrémités.

La résonance et la formation d'ondes stationnaires se remarquent lorsqu'un ventre de déplacement se forme à chacune des extrémités ouvertes.

Les longueurs d'onde qui correspondent à la résonance s'expriment en fonction de la longueur du tuyau par la relation:

$$\lambda_n = \frac{2 \cdot L}{n}$$

Comme $\lambda = \frac{v}{\nu}$, la résonance est atteinte pour les fréquences:

$$\nu_n = n \cdot \frac{v}{2L}$$

où v est la vitesse de propagation des ondes sonores à la température de l'expérience.

D'autre part, la formation d'ondes stationnaires dans une colonne d'air permet la détermination de la vitesse de propagation du son dans l'air à partir des mesures des longueurs d'ondes et des fréquences de résonance:

$$v = \lambda_n \cdot \nu_n$$

Remarque importante

La longueur effective de la colonne d'air en vibration est plus élevée que la longueur du tube de verre utilisé pour les expériences. Cette longueur dépend du rayon du tube et de la forme de son bord selon que ce dernier présente ou non une collerette:

$$L_{\text{eff}} = L_{\text{tube}} + b \cdot R \quad \text{pour un tube fermé,}$$

$$L_{\text{eff}} = L_{\text{tube}} + 2 \cdot b \cdot R \quad \text{pour un tube ouvert,}$$

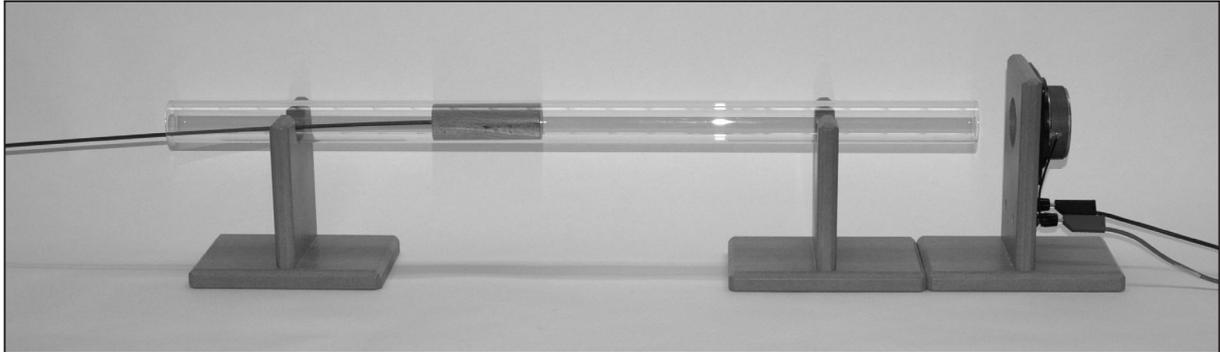
où $b = 0,63$ s'il n'y a pas de collerettes aux extrémités ouvertes du tube et $b = 0,80$ s'il y en a; R est le rayon du tube.

3. Composition de l'ensemble expérimental

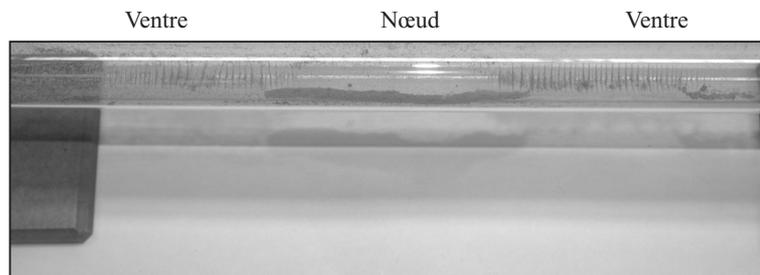
L'ensemble est constitué de:

- 1 tube en verre de diamètre 4 cm et de longueur 75 cm;
- 2 supports pour le tube;
- 1 piston en bois prolongé par une tige métallique;
- 1 haut-parleur monté sur support et équipé de 2 douilles;
- 1 sachet contenant de la poudre de liège.

4. Description de l'ensemble expérimental



- Le tuyau sonore fourni par le CTP, est un tube de verre dont la longueur totale est de 75 cm et le diamètre 4 cm. Il doit être posé sur les supports fournis. Il peut être utilisé pour étudier la formation d'ondes stationnaires dans un tube ouvert aux deux extrémités ou fermé à une extrémité par un piston mobile. La longueur du tuyau ouvert est fixe et la longueur du tuyau fermé à une extrémité est déterminée par la position du piston (au maximum: 65 cm).
- Un haut-parleur fixé sur un support est la source sonore à utiliser. Son diamètre est proche du diamètre du tube. Présentant les caractéristiques d'un «tweeter», il est utilisable pour la production de sons à partir d'une fréquence de 250 Hz mais le signal sonore n'est sinusoïdal qu'au-delà de 800 Hz. Toutefois, la résonance peut être observée à partir de fréquences mesurant 500 Hz.
- Les expériences requièrent, en outre, un générateur de tensions sinusoïdales dont la fréquence peut être réglée. Si le générateur utilisé n'affiche pas la fréquence de la tension produite, celle-ci peut être déterminée à l'aide d'un fréquencemètre ou d'un oscilloscope.
- De la poudre de liège introduite dans le tube permet la détection de la résonance et la détermination de la longueur d'onde de l'onde stationnaire qui est formée: la poudre vibre fortement aux ventres de déplacement et reste immobile aux nœuds. La mesure de la distance séparant deux nœuds successifs ou deux ventres successifs permet de déterminer la demi-longueur d'onde.



Il faut veiller à utiliser de la poudre de liège et un tube à faible degré hygrométrique. En hiver, il peut être utile de placer l'un et l'autre sur un radiateur avant l'expérience; toutefois, l'expérience doit être réalisée avec un tube à température ambiante.

5. Matériel supplémentaire

Outre les éléments de l'ensemble décrit ci-dessus, les expériences nécessitent l'utilisation d'un générateur de tensions sinusoïdales, d'un fréquencemètre et de fils de connexion.



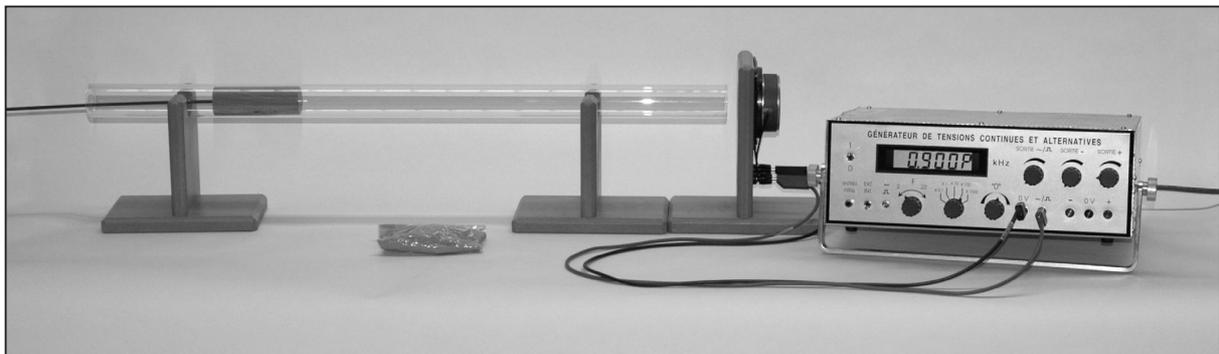
Le CTP propose un générateur de tensions continues et alternatives (de 0,2 Hz à 22 kHz) avec fréquencemètre intégré (ET 2000 24216) ou un générateur de tensions continues et alternatives (de 90 Hz à 10 kHz) associé à un fréquencemètre séparé (EE 2000 34223 associé à EA 3300 33285).

Un oscilloscope raccordé aux bornes du générateur permet également de déterminer la fréquence; couplé à un microphone, il permet de repérer la résonance avec plus de précision.

6. Manipulations

Résonance dans les tuyaux fermés

Notre but est de produire la résonance dans un tuyau fermé de longueur donnée et de déterminer la fréquence ainsi que la longueur d'onde dans ces conditions.



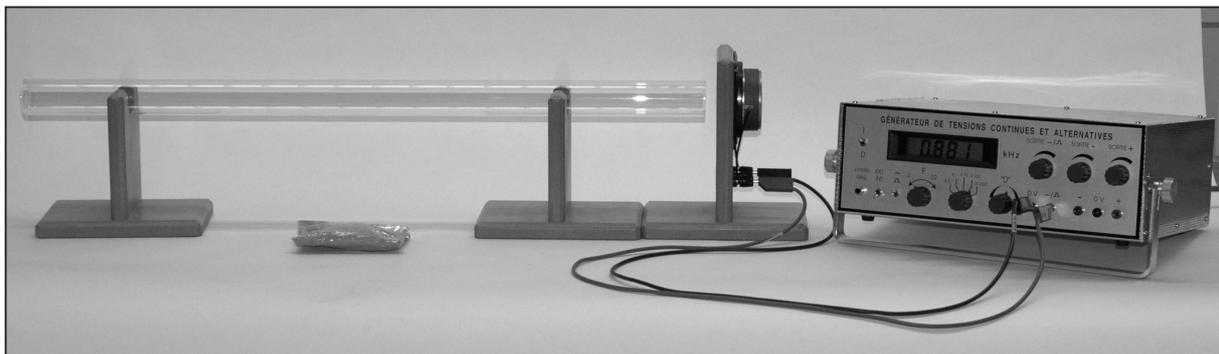
- Réaliser le montage illustré ci-dessus, en plaçant la membrane du haut-parleur à 5 cm environ de l'ouverture du tube et en fixant la longueur de la colonne d'air par la mise en place du piston (50 cm par exemple).

- Étendre uniformément la poudre de liège dans le tube. Faire tourner le tube de manière à amener la poudre en équilibre instable le long de la paroi.
- Enclencher le générateur de tension sinusoïdale et modifier la fréquence de manière à produire la résonance: celle-ci est détectée par l'augmentation de l'intensité du son et l'agitation de la poudre de liège aux ventres de déplacement. Il est possible de favoriser la chute de la poudre de liège en tapotant légèrement le tube à l'aide du doigt ou en le faisant tourner lentement.
- Déterminer la longueur d'onde de l'onde stationnaire observée à partir des figures formées par la poudre de liège. Deux méthodes sont proposées:
 - calculer la moyenne des mesures de la demi-longueur d'onde séparant deux ventres ou deux nœuds consécutifs;
 - mesurer la distance qui sépare l'extrémité fermée du tube où se forme un nœud du ventre le plus éloigné; cette distance est alors divisée par le nombre fractionnaire de longueurs d'onde correspondant. Cette dernière méthode permet une détermination plus précise de la longueur d'onde.
- Noter les mesures de la fréquence et de la longueur d'onde lors de la résonance dans un tableau tel que celui ci-dessous.
- Refaire l'expérience en augmentant la fréquence de manière à observer la résonance pour des ordres de vibration différents.
- Refaire l'expérience pour des longueurs différentes de tuyaux sonores.

Longueur du tube (m)	Ordre de vibration (n)	Fréquence lors de la résonance (Hz)	Longueur d'onde mesurée (m)

Résonance dans les tuyaux ouverts

Notre but est de produire la résonance dans un tuyau ouvert de longueur donnée et de déterminer la fréquence ainsi que la longueur d'onde dans ces conditions.



- Réaliser le montage illustré ci-dessus en plaçant la membrane du haut-parleur à 5 cm environ d'une des ouvertures du tube. La longueur de la colonne d'air est fixée par la dimension du tube (75 cm).
- Étendre uniformément la poudre de liège dans le tube. Faire tourner le tube de manière à amener la poudre en équilibre instable le long de la paroi.
- Enclencher le générateur de tension sinusoïdale et modifier la fréquence de manière à produire la résonance: celle-ci est détectée par l'augmentation de l'intensité du son et l'agitation de la poudre de liège aux ventres de déplacement. Il est possible de favoriser la chute de la poudre de liège en tapotant légèrement le tube à l'aide du doigt ou en le faisant tourner lentement.
- Déterminer la longueur d'onde de l'onde stationnaire observée à partir des figures formées par la poudre de liège. Deux méthodes sont proposées:
 - calculer la moyenne des mesures de la demi-longueur d'onde séparant deux ventres ou deux nœuds consécutifs;
 - diviser la distance qui sépare les extrémités ouvertes du tube où se forme un ventre (75 cm) par le nombre fractionnaire de longueurs d'onde correspondant. Cette dernière méthode permet une détermination plus précise de la longueur d'onde.
- Noter les mesures de la fréquence et de la longueur d'onde lors de la résonance dans un tableau tel que celui ci-dessous.
- Refaire l'expérience en augmentant la fréquence de manière à observer la résonance pour des ordres de vibration différents.

Longueur du tube (m)	Ordre de vibration (n)	Fréquence lors de la résonance (Hz)	Longueur d'onde mesurée (m)

Comparaison entre la longueur d'onde mesurée et la longueur d'onde calculée

Après avoir observé la résonance et après avoir déterminé la fréquence ainsi que la longueur d'onde du son lors de celle-ci, nous allons comparer les valeurs obtenues avec les valeurs calculées. Il sera tenu compte des effets de bord liés au tube utilisé lors des expériences.

- Reprendre dans un tableau les résultats des expériences réalisées précédemment pour les tuyaux fermés et le tuyau ouvert.
- Compléter ce tableau par les grandeurs calculées des longueurs d'onde en prévoyant deux colonnes supplémentaires:
 - les calculs de la première colonne sont basés sur la longueur mesurée du tube, L_{tube} ;
 - les calculs de la deuxième colonne sont basés sur la longueur du tuyau corrigée selon l'effet de bord:

$$L_{\text{eff fermé}} = L_{\text{tube}} + b \cdot R$$

$$L_{\text{eff ouvert}} = L_{\text{tube}} + 2 \cdot b \cdot R$$

où $b = 0,63$ s'il n'y a pas de collerettes aux extrémités ouvertes du tube et $b = 0,80$ s'il y en a; R est le rayon du tube.

Expériences réalisées à l'aide de tuyaux fermés

Longueur du tube (m)	Ordre de vibration (n)	Fréquence lors de la résonance (Hz)	Longueur d'onde mesurée (m)	Longueur d'onde calculée avec L_{tube} (m)	Longueur d'onde calculée avec $L_{\text{eff}} \text{ fermé}$ (m)

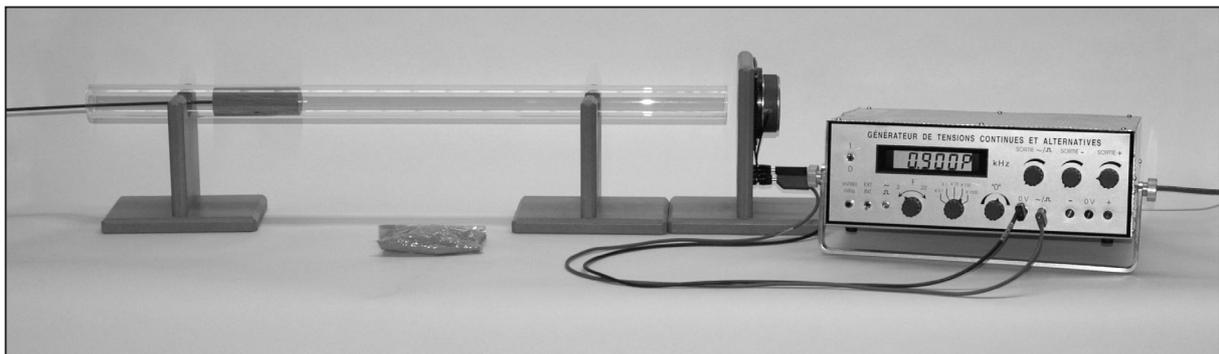
Expériences réalisées à l'aide d'un tuyau ouvert

Longueur du tube (m)	Ordre de vibration (n)	Fréquence lors de la résonance (Hz)	Longueur d'onde mesurée (m)	Longueur d'onde calculée avec L_{tube} (m)	Longueur d'onde calculée avec $L_{\text{eff}} \text{ fermé}$ (m)

Détermination de la vitesse de propagation du son dans l'air

Le but de l'expérience est de déterminer la vitesse de propagation du son dans l'air à la température de l'expérience. Elle est déterminée par la mesure de la longueur d'onde et celle de la fréquence lors de l'établissement d'ondes stationnaires dans un tuyau sonore fermé ou ouvert.

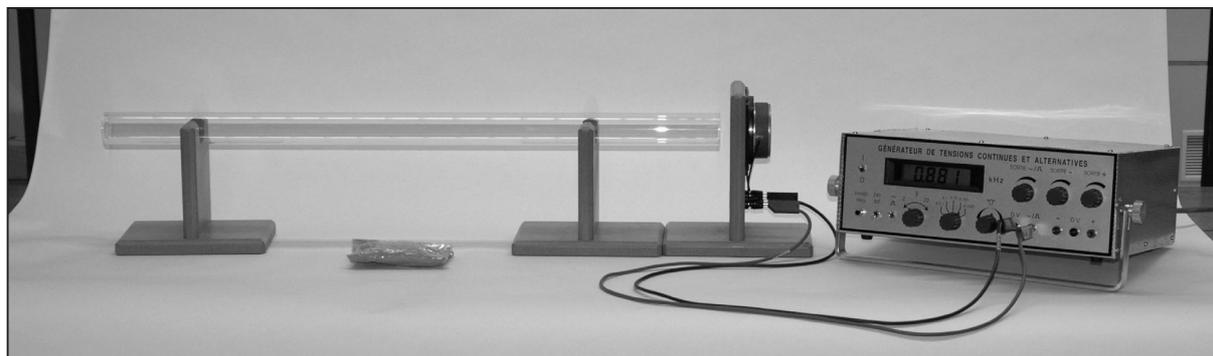
Expériences réalisées avec un tuyau fermé



- Réaliser le montage illustré ci-dessus en plaçant la membrane du haut-parleur à 5 cm environ de l'ouverture du tube et en fixant la longueur de la colonne d'air par la mise en place du piston (50 cm par exemple).
- Étendre uniformément la poudre de liège dans le tube. Faire tourner le tube de manière à amener la poudre en équilibre instable le long de la paroi.
- Enclencher le générateur de tension sinusoïdale et modifier la fréquence de manière à produire la résonance: celle-ci est détectée par l'augmentation de l'intensité du son et l'agitation de la poudre de liège aux ventres de déplacement. Favoriser la chute de la poudre de liège en tapotant légèrement le tube à l'aide du doigt.
- Déterminer la longueur d'onde de l'onde stationnaire observée à partir des figures formées par la poudre de liège. Deux méthodes sont proposées:
 - calculer la moyenne des mesures de la demi-longueur d'onde séparant deux ventres ou deux nœuds consécutifs;
 - mesurer la distance qui sépare l'extrémité fermée du tube où se forme un nœud du ventre le plus éloigné; cette distance est alors divisée par le nombre fractionnaire de longueurs d'onde correspondant. Cette dernière méthode permet une détermination plus précise de la longueur d'onde.
- Refaire l'expérience pour des fréquences différentes.
- Calculer la vitesse du son dans l'air et comparer celle-ci avec la vitesse donnée dans la littérature.
- Noter les résultats de mesure dans un tableau tel que celui ci-dessous.

Longueur du tube (m)	t (°C)	Ordre de vibration (n)	Fréquence lors de la résonance (Hz)	Longueur d'onde mesurée (m)	Vitesse mesurée du son (m/s)	Vitesse du son donnée par les tables (m/s)

Expériences réalisées avec un tuyau ouvert



- Réaliser le montage illustré ci-dessus en plaçant la membrane du haut-parleur à 5 cm environ d'une des ouvertures du tube. La longueur de la colonne d'air est fixée par la dimension du tube (75 cm).
- Étendre uniformément la poudre de liège dans le tube. Faire tourner le tube de manière à amener la poudre en équilibre instable le long de la paroi.

- Enclencher le générateur de tension sinusoïdale et modifier la fréquence de manière à produire la résonance: celle-ci est détectée par l'augmentation de l'intensité du son et l'agitation de la poudre de liège aux ventres de déplacement. Favoriser la chute de la poudre de liège en tapotant légèrement le tube à l'aide du doigt.
- Déterminer la longueur d'onde de l'onde stationnaire observée à partir des figures formées par la poudre de liège. Deux méthodes sont proposées:
 - calculer la moyenne des mesures de la demi-longueur d'onde séparant deux ventres ou deux nœuds consécutifs;
 - diviser la distance qui sépare les extrémités ouvertes du tube où se forme un ventre (75 cm) par le nombre fractionnaire de longueurs d'onde correspondant. Cette dernière méthode permet une détermination plus précise de la longueur d'onde.
- Refaire l'expérience pour des fréquences différentes.
- Calculer la vitesse du son dans l'air et comparer celle-ci avec la vitesse donnée dans la littérature.
- Noter les résultats de mesures dans un tableau tel que celui ci-dessous.

Longueur du tube (m)	t (°C)	Ordre de vibration (n)	Fréquence lors de la résonance (Hz)	Longueur d'onde mesurée (m)	Vitesse mesurée du son (m/s)	Vitesse du son donnée par les tables (m/s)

7. Exemples de résultats

Résonance dans un tuyau fermé

Le tableau ci-dessous reprend des résultats expérimentaux pour des tuyaux fermés dont les longueurs sont respectivement de 50 cm et 65 cm. Le diamètre du tube utilisé mesure $0,0367 \text{ m} \pm 0,0001 \text{ m}$.

Longueur du tube (m)	Ordre de vibration (n)	Fréquence lors de la résonance (Hz)	Longueur d'onde mesurée (m)
$0,500 \pm 0,005$	1	—	—
	2	507 ± 3	$0,668 \pm 0,009$
	3	830 ± 3	$0,416 \pm 0,007$
	4	$1\,127 \pm 3$	$0,300 \pm 0,004$
	5	$1\,497 \pm 3$	$0,232 \pm 0,003$
$0,650 \pm 0,005$	1	—	—
	2	—	—
	3	—	—
	4	900 ± 3	$0,378 \pm 0,004$
	5	$1\,111 \pm 3$	$0,301 \pm 0,003$
	6	$1\,396 \pm 3$	$0,236 \pm 0,002$
	7	$1\,711 \pm 3$	$0,202 \pm 0,002$

Résonance dans un tuyau ouvert

Le tableau ci-dessous reprend des résultats expérimentaux pour un tuyau ouvert dont la longueur mesure 75 cm. Le diamètre du tube utilisé mesure $0,0367 \text{ m} \pm 0,0001 \text{ m}$.

Longueur du tube (m)	Ordre de vibration (n)	Fréquence lors de la résonance (Hz)	Longueur d'onde mesurée (m)
$0,750 \pm 0,005$	1	—	—
	2	—	—
	3	630 ± 3	$0,505 \pm 0,020$
	4	880 ± 3	$0,370 \pm 0,010$
	5	$1\ 091 \pm 3$	$0,312 \pm 0,007$
	6	$1\ 307 \pm 3$	$0,260 \pm 0,005$
	7	$1\ 518 \pm 3$	$0,225 \pm 0,004$

Comparaison entre la longueur d'onde mesurée et la longueur d'onde calculée

Expériences réalisées à l'aide de tuyaux fermés

Longueur du tube (m)	Ordre de vibration (n)	Fréquence lors de la résonance (Hz)	Longueur d'onde mesurée (m)	Longueur d'onde calculée avec L_{tube} (m)	Longueur d'onde calculée avec $L_{\text{eff}}^{\text{fermé}}$ (m)
$0,500 \pm 0,005$	1	—	—	—	—
	2	507 ± 3	$0,668 \pm 0,009$	$0,667 \pm 0,007$	$0,686 \pm 0,007$
	3	830 ± 3	$0,416 \pm 0,007$	$0,400 \pm 0,004$	$0,412 \pm 0,004$
	4	$1\ 127 \pm 3$	$0,300 \pm 0,004$	$0,286 \pm 0,003$	$0,294 \pm 0,003$
	5	$1\ 497 \pm 3$	$0,232 \pm 0,003$	$0,222 \pm 0,002$	$0,229 \pm 0,003$
$0,650 \pm 0,005$	1	—	—	—	—
	2	—	—	—	—
	3	—	—	—	—
	4	900 ± 3	$0,378 \pm 0,004$	$0,371 \pm 0,003$	$0,380 \pm 0,003$
	5	$1\ 111 \pm 3$	$0,301 \pm 0,003$	$0,289 \pm 0,003$	$0,295 \pm 0,002$
	6	$1\ 396 \pm 3$	$0,236 \pm 0,002$	$0,236 \pm 0,002$	$0,242 \pm 0,002$
	7	$1\ 711 \pm 3$	$0,202 \pm 0,002$	$0,200 \pm 0,002$	$0,206 \pm 0,002$

Expérience réalisée à l'aide d'un tuyau ouvert

Longueur du tube (m)	Ordre de vibration (n)	Fréquence lors de la résonance (Hz)	Longueur d'onde mesurée (m)	Longueur d'onde calculée avec L_{tube} (m)	Longueur d'onde calculée avec $L_{\text{eff fermé}}$ (m)
0,750 ± 0,005	1	—	—	—	—
	2	—	—	—	—
	3	630 ± 3	0,505 ± 0,020	0,500 ± 0,002	0,520 ± 0,003
	4	880 ± 3	0,370 ± 0,010	0,375 ± 0,001	0,390 ± 0,003
	5	1 091 ± 3	0,312 ± 0,007	0,300 ± 0,001	0,312 ± 0,002
	6	1 307 ± 3	0,260 ± 0,005	0,250 ± 0,001	0,260 ± 0,002
	7	1 518 ± 3	0,225 ± 0,004	0,214 ± 0,001	0,223 ± 0,002

Détermination de la vitesse de propagation du son dans l'air

Le tableau ci-dessous mentionne des résultats expérimentaux pour des tuyaux fermés dont les longueurs sont respectivement 65 cm (température: 20,5 °C) et 50 cm (température: 22,5 °C).

Longueur du tube (m)	t (°C)	Ordre de vibration (n)	Fréquence lors de la résonance (Hz)	Longueur d'onde mesurée (m)	Vitesse mesurée du son (m/s)	Vitesse du son donnée par les tables (m/s)
0,500 ± 0,005	22,5	1	—	—	—	344,7
		2	507 ± 3	0,668 ± 0,009	339 ± 6	
		3	830 ± 3	0,416 ± 0,007	345 ± 6	
		4	1 127 ± 3	0,300 ± 0,004	338 ± 5	
		5	1 497 ± 3	0,232 ± 0,003	347 ± 4	
0,650 ± 0,005	20,5	1	—	—	—	343,7
		2	—	—	—	
		3	—	—	—	
		4	900 ± 3	0,378 ± 0,004	341 ± 4	
		5	1 111 ± 3	0,301 ± 0,003	335 ± 4	
		6	1 396 ± 3	0,236 ± 0,002	330 ± 3	
		7	1 711 ± 4	0,202 ± 0,002	345 ± 4	

Le tableau ci-dessous mentionne des résultats expérimentaux pour un tuyau ouvert dont la longueur est 75 cm (température: 19,5 °C).

Longueur du tube (m)	t (°C)	Ordre de vibration (n)	Fréquence lors de la résonance (Hz)	Longueur d'onde mesurée (m)	Vitesse mesurée du son (m/s)	Vitesse du son donnée par les tables (m/s)
0,750 ± 0,005	19,50	1	—	—	—	343,1
		2	—	—	—	
		3	630 ± 3	0,505 ± 0,020	318 ± 13	
		4	880 ± 3	0,370 ± 0,010	326 ± 9	
		5	1 091 ± 3	0,312 ± 0,007	340 ± 8	
		6	1 307 ± 3	0,260 ± 0,005	340 ± 7	
		7	1 518 ± 3	0,225 ± 0,004	342 ± 6	

ANNEXE

Vitesse de propagation du son dans l'air

Temp. °C	0 m/s	1 m/s	2 m/s	3 m/s	4 m/s	5 m/s	6 m/s	7 m/s	8 m/s	9 m/s
40	354,89	355,46	356,02	356,58	357,15	357,71	358,27	358,83	359,39	359,95
30	349,18	349,75	350,33	350,90	351,47	352,04	352,62	353,19	353,75	354,32
20	343,37	343,95	344,54	345,12	345,70	346,29	346,87	347,44	348,02	348,60
10	337,46	338,06	338,65	339,25	339,84	340,43	341,02	341,61	342,20	342,78
0	331,45	332,06	332,66	333,27	333,87	334,47	335,07	335,67	336,27	336,87