

Ondes stationnaires dans un tuyau sonore

Dans un orgue, l'émission sonore est assurée par des tuyaux qui reçoivent à leur base l'air sous pression (le « vent ») venant du sommier. Le plus souvent, les tuyaux ont une position verticale. Chaque tuyau émet un seul son de hauteur et de timbre déterminés.

La hauteur du son émis par un tuyau dépend essentiellement de :

- ☐ sa longueur ;
- ☐ du fait qu'il soit ouvert ou fermé à l'extrémité supérieure ;

Le timbre dépend de

- ☐ la matière (bois ou métal - alliage d'étain et de plomb en général, ou d'autres matériaux plus rares) ;
- ☐ la longueur, déterminant la hauteur du son émis ;
- ☐ le diamètre, qui agit sur le timbre ;
- ☐ la forme, cylindrique, conique, fuselée, carrée, triangulaire ou autre ;
- ☐ l'organe sonore (bouche ou anche respectivement comparables à la clarinette et à la flûte).



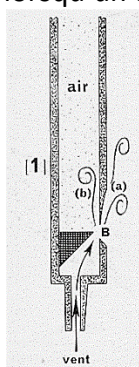
1. Voir la page : <https://esm-pc.eu/PhysiqueS7/21ProprietesOndes/TuyauSonore/TuyauSonore.htm>
Relier ventre/nœud de pression et ventre/nœud de vibration.

2. Compléter les phrases suivantes :

- l'extrémité ouverte d'un tuyau sonore correspond à un De vibration (et donc un de pression)
- l'extrémité fermée d'un tuyau sonore correspond à un De vibration (et donc un de pression)

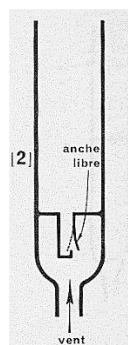
3. Excitation de la colonne d'air :

Les vibrations de l'air à l'embouchure de l'instrument sont créées par des turbulences obtenues lorsqu'un courant d'air rencontre un obstacle :



Excitation par un biseau :

L'air insufflé est dirigé sur un biseau : l'air s'échappe d'un côté et de l'autre du biseau en générant des tourbillons. Le vent engendre des vibrations de l'air.



Excitation par une anche :

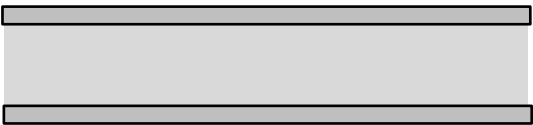
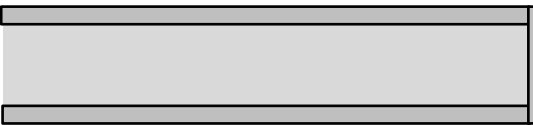
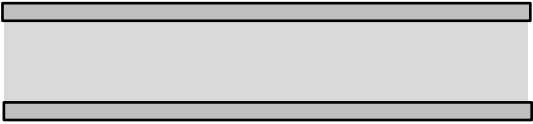
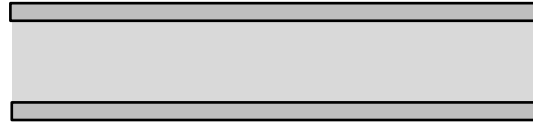
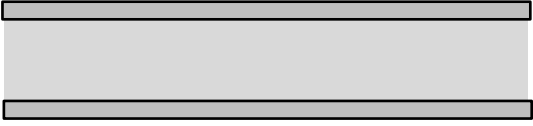
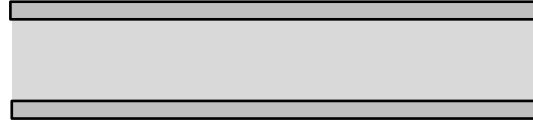
L'anche, animée par le courant d'air, vibre, en ouvrant, fermant, ouvrant de nouveau, ... Le vent engendre des vibrations de pression.

Dans chaque cas, préciser si l'embouchure de l'instrument correspond à un nœud ou un ventre de vibration, à un nœud ou un ventre de pression. Le tuyau est-il considéré ouvert ou fermé à l'embouchure ?

--	--

4. Définir sur les schémas ci-dessous les ventres et nœuds de vibration à chaque extrémité des tuyaux représentés.

Représenter les ventres et nœuds correspondant aux 3 premiers modes propres de vibration de l'air qui satisfont les conditions aux extrémités.

Cas du tuyau ouvert à chaque extrémité	Cas d'un tuyau fermé à droite
	
	
	

Déterminer la distance entre 2 nœuds consécutifs dans chaque cas :

5. Déterminer pour chaque cas la condition d'établissement d'ondes stationnaires dans le tuyau sonore de longueur L .

Cas du tuyau ouvert à chaque extrémité	Cas d'un tuyau fermé à droite

6. Déterminer la fréquence des modes de vibrations dans chaque cas, en fonction de k (entier naturel), L et v (vitesse des ondes sonores).

Cas du tuyau ouvert à chaque extrémité	Cas d'un tuyau fermé à droite

7. Exprimer dans chaque cas, les 3 premières fréquences et nommer les harmoniques correspondantes.

Cas du tuyau ouvert à chaque extrémité	Cas d'un tuyau fermé à droite

Que constate-t-on dans le cas du tuyau fermé à une des extrémités.

8. Calculer les longueurs des tuyaux qui permettraient d'obtenir un son de fréquence $f = 25 \text{ Hz}$. On supposera que la vitesse du son est $v = 330 \text{ m.s}^{-1}$.

Cas du tuyau ouvert à chaque extrémité	Cas d'un tuyau fermé à droite

9. Quel type de tuyau un facteur d'orgue doit-il choisir produire des sons graves ? Des sons aigus ? Justifier les choix en vous appuyant sur les résultats des questions précédentes.

Application

I. Accordage d'une clarinette :

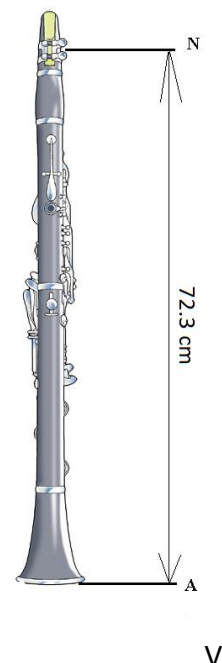
La note la plus basse (le fondamental) est produite par une clarinette lorsque tous les trous sont bouchés par les clés.

On retrouve alors un nœud (N) de vibration à l'embouchure (ou bec) et un ventre de vibration (V) au niveau du pavillon (voir schéma ci-contre). Lors de la première utilisation, on considère que la température de l'air à l'intérieur de la clarinette est $\theta_1 = 20^\circ\text{C}$.

- i. Montrer que la fréquence du fondamental est $f_1 = 119 \text{ Hz}$.
- ii. Déterminer les fréquences des deux harmoniques qui suivent immédiatement le fondamental (les trous sont toujours bouchés).

Il est nécessaire pour le musicien de retrouver la valeur du fondamental ($f_1 = 119 \text{ Hz}$) pour une autre température de fonctionnement $\theta_2 = 45^\circ\text{C}$.

- iii. Calculer la nouvelle valeur du fondamental produit par la clarinette dans ces conditions de fonctionnement.
- iv. Ceci est réalisable en augmentant la longueur de la clarinette à l'aide d'une bague (le barillet) située juste après le bec.
Calculer la longueur de la bague qu'il faut utiliser pour retrouver le fondamental ($f_1 = 119 \text{ Hz}$).



Données : Célérité du son dans l'air à $\theta_1 = 20^\circ\text{C}$: $v_{\text{son}} = 343 \text{ m.s}^{-1}$

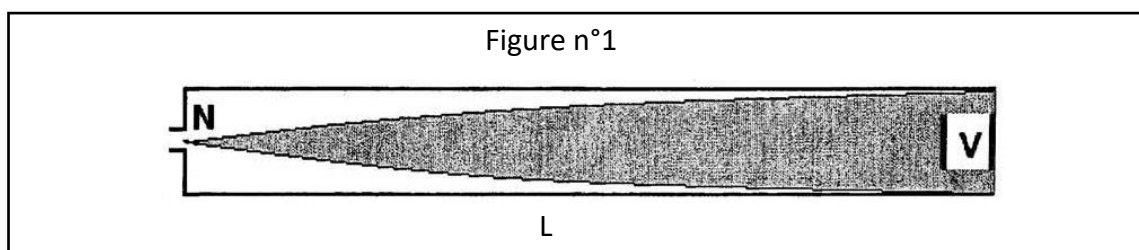
Célérité du son dans l'air à une température $T(\text{K})$: $v_{\text{son}} = k\sqrt{T}$ (k : constante ; T en K)
 $0 \text{ K} = -273^\circ\text{C}$

II. Didjéridoo :

- a. Lorsqu'une onde stationnaire s'établit dans un tuyau sonore, on observe un nœud (N) de vibration à une extrémité si cette extrémité est fermée, et un ventre (V) de vibration si cette extrémité est ouverte.

En simplifiant, on peut représenter le didjéridoo (instrument de musique emblématique du peuple arborigène en forme de trompe étroite en bois d'eucalyptus, évidée par les termites, de longueur supérieure à 1 mètre, elle est devenue emblématique de ce peuple) comme un tuyau sonore de longueur L fermé à une extrémité et ouvert à l'autre.

Pour le mode fondamental de vibration, les positions du ventre et du nœud sont données sur la figure n°1 ci-dessous, schématisant l'amplitude de la vibration sonore.



- i. Les ondes sonores sont-elles des ondes transversales ou longitudinales ? Justifier.
- ii. Exprimer la longueur d'onde λ_1 , en fonction de la longueur L du tuyau.
- iii. En déduire que la fréquence f_1 du mode fondamental s'écrit : $f_1 = \frac{v}{4L}$
- iv. Un enregistrement du son de base d'un didjéridoo (le bourdon) donne l'oscillogramme représenté sur la figure n°2.

- 1) Déterminer à partir de cet oscillogramme la fréquence f_1 du mode fondamental. La hauteur (ou fréquence) de ce son correspond-elle à un son grave ou à un son aigu ?
 - 2) En déduire la longueur L du didjéridoo utilisé.
- v. Quelle devrait être la longueur minimale d'un tuyau ouvert aux deux extrémités (type flûte) pour donner une note de même hauteur ?
- b. Avec un second didjéridoo de longueur différente L' , on enregistre un son dont l'oscillogramme est représenté sur la figure n°3
- i. En utilisant l'enregistrement de la figure n°3, déterminer la fréquence f'_1 du mode fondamental.
 - ii. Comparer la longueur L' de ce second instrument à la longueur L du premier.
- c. On remarque sur le spectre en fréquence du son émis par un didjéridoo que l'harmonique de rang 2 est pratiquement inexistant. Le premier harmonique de grande amplitude est celui de rang 3.
- i. Sur un schéma analogue à celui de la figure n°1, représenter les nœuds et les ventres de vibration correspondant à cet harmonique. Exprimer la longueur L en fonction de la longueur d'onde de cet harmonique.
 - ii. Il existe une relation entre la longueur L du didjéridoo et le rang n (nombre impair seulement) de l'harmonique. En utilisant les données et les résultats de la partie **b)**, choisir, parmi les relations suivantes, celle qui convient :

$$(1) L = \frac{n}{2} \cdot \lambda_n$$

$$(2) L = \frac{n}{4} \cdot \lambda_n$$

$$(3) L = \frac{n+1}{4} \cdot \lambda_n$$

avec $n = 2k-1$ (k est un nombre entier naturel supérieur ou égal à 1)

Donnée : célérité du son dans l'air : $v = 340 \text{ m.s}^{-1}$.

Figure n°2

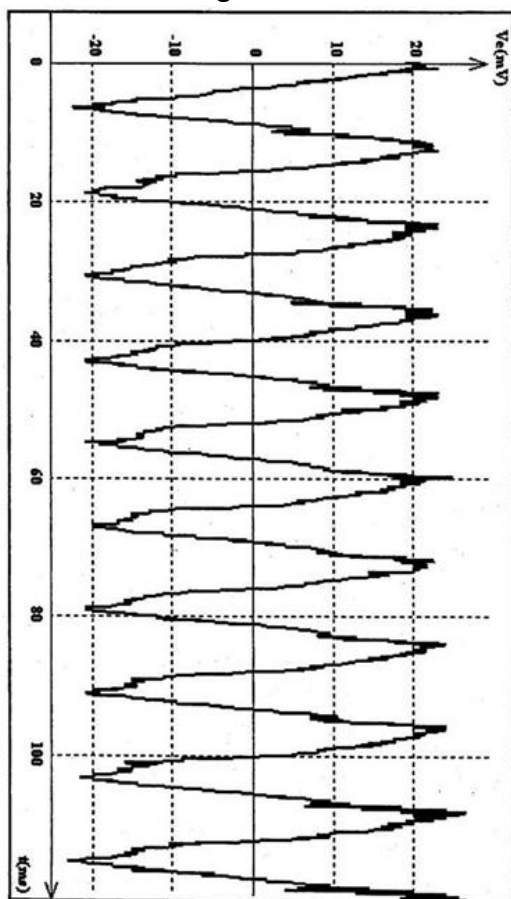
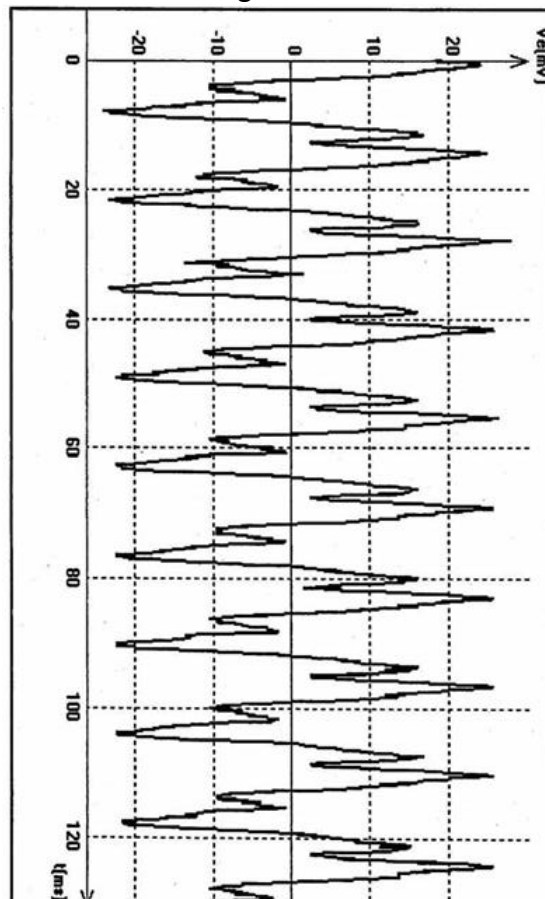


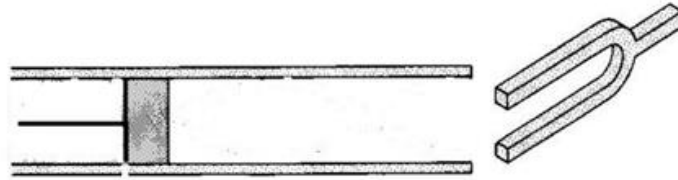
Figure n°3



III. Diapason

Un diapason de fréquence 440 Hz est placé à l'extrémité ouverte d'un tube de 1,00 m de longueur qui contient un piston amovible comme indiqué sur la figure ci-dessous.

Lorsque le piston se déplace lentement à partir de l'extrémité ouverte, on constate une intensification du son qui indique que la résonance se produit successivement à 18,8 cm et 56,3 cm de cette extrémité.



- i. Montrer que la vitesse du son, dans ces conditions, est de $330 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.
- ii. On continue de déplacer le piston le long du tube. En combien de position(s) supplémentaire(s) du piston peut-on observer cette intensification sonore ?
- iii. On retire le piston du tube. Quelle est la fréquence fondamentale de résonance du tube ?
- iv. L'expérience ci-dessus a été effectuée à la température ambiante de 22°C . Sachant que la célérité du son est proportionnelle à la racine carrée de la température exprimée en kelvins, quelle est la nouvelle valeur de la célérité du son, si l'air dans le tube est chauffé à 80°C ?

IV. Tube de Kundt :

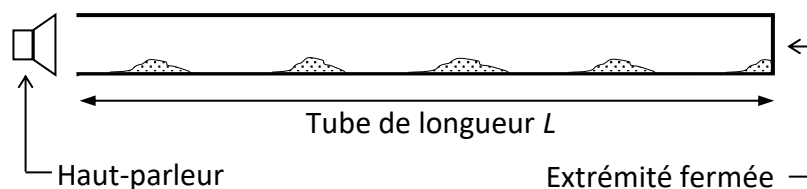
Le tube de Kundt est un tuyau transparent contenant une petite quantité d'une fine poudre et rempli d'un gaz.

Cet appareil est utilisé pour déterminer la longueur d'onde λ d'un son.

Ce son est produit par un haut-parleur et transmis dans le tube par le gaz.

Ce haut-parleur est connecté à un générateur de fréquence.

Pour certaines fréquences, des ondes stationnaires sont produites dans le tube et de petits amoncellements de poudre se forment aux nœuds.



- i. Expliquer comment une onde stationnaire est générée.
- i. Afin d'obtenir une onde stationnaire dans un tube de Kundt, démontrer que

$$\lambda = \frac{4L}{2n+1}$$

où L est la longueur de la colonne d'air et $n = 0, 1, 2, \dots$

- iii. Calculer la fréquence fondamentale lorsque le tube est rempli d'air et que $L = 1,70 \text{ m}$.

iv. Faire un schéma montrant la forme de l'onde stationnaire pour une fréquence de 252 Hz.

v. En utilisant un autre gaz dans le tube et une fréquence de 430 Hz, on mesure une distance de 0,310 m entre deux nœuds consécutifs.

Déterminer quel est le gaz remplissant le tube.