Partie ϕ 2 - PRODUIRE UN SON
Tp ϕ 3 - CAS DE LA COLONNE D'AIR

1. MODES DE VIBRATION D'UN TUBE D'AIR

Dispositif.

On réalise le montage ci-contre: un GBF alimente un haut-parleur avec une tension sinusoïdale de fréquence réglable f et de tension efficace 0,5 V. Le GBF force l'air du tube, ouvert aux deux extrémités, à vibrer longitudinalement (vibrations forcées).
Un micro explorateur, sensible à la pression, est relié à un oscilloscope. Il détecte des variations locales de pressions .P par rapport à la pression atmosphérique moyenne Pa soit P = Pa + .P.

Attention.
- ❑ Un maximum d'amplitude de la tension correspond à un maximum de .P et un minimum de l'amplitude correspond à un minimum de .P.
- ❑ Les ventres et noeuds de pression sont opposés aux ventres et noeuds de vibration de l'air. En effet dans les zones de haute pression l'air ne vibre que «très peu», et inversement dans les zones de basse pression l'air vibre «beaucoup».

Expérience n°1

Régler f, à partir de la valeur 0, et relever les fréquences pour lesquelles le tube d'air émet un son intense.

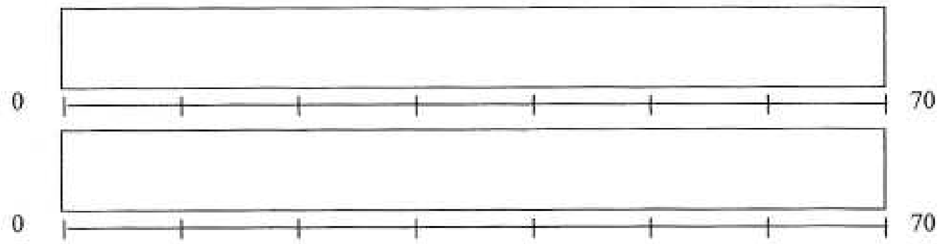
	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
Fréquence (Hz)					
Mode de vibration					

1°) Quelle relation existe-t-il entre les fréquences des harmoniques et la fréquence du fondamental ?

Expérience n°2

2°) Pour f_3, déplacer le micro dans le tube et relever les positions des maximums et minimums de pression.

Position des maximums de pression (cm)			
Position des minimums de pression (cm)			



Ventres et nœuds de pression

Ventres et nœuds de vibration de l'air

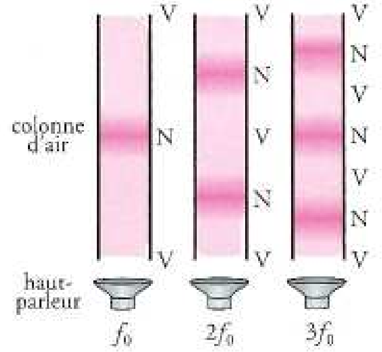
Interprétation.

Dans le cas général, l'émission sonore du tuyau soumis à la vibration forcée produite par le haut-parleur est d'intensité très faible.

Comme pour la corde des guitares, on constate que la colonne d'air n'émet un son que pour certaines fréquences d'excitation dites «favorisées». Ces fréquences sont les fréquences des modes propres de vibration de la colonne d'air. Lorsque la colonne d'air de longueur L émet un son nettement plus intense et de même fréquence que celle de l'excitation, on dit alors que la colonne d'air est en résonance.

A la résonance, dans la colonne d'air, s'établit une répartition stable avec des ventres d'amplitude de vibration équidistants et des noeuds d'amplitude de vibration situés au milieu de l'intervalle entre deux ventres, et donc également équidistants.

Les extrémités d'un tuyau ouvert correspondent à des ventres de vibration: les tranches d'air oscillent de façon longitudinale avec une amplitude maximale.



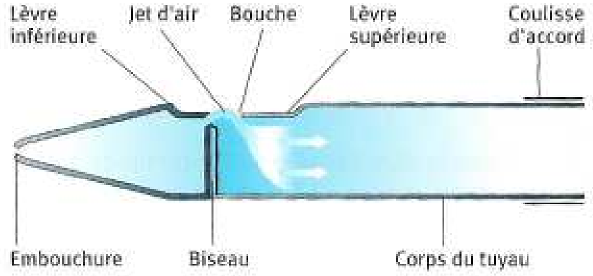
Pour un même tuyau, il existe plusieurs fréquences de résonance: les fréquences de résonance d'une colonne d'air de longueur L sont quantifiées et leurs valeurs dépendent de la longueur L. Un tuyau sonore de longueur L est un résonateur à fréquences multiples. Si le mode fondamental a pour fréquence f_1, les modes harmoniques ont pour fréquence $f_n = n \cdot f_1$, où n est un entier.

La fréquence f_1 du mode fondamental dépend de la longueur L du tube: plus le tube est court, plus la valeur de la fréquence du mode fondamental est élevée. Les sons aigus seront donc favorisés par des tuyaux courts et les sons graves par des tubes longs.

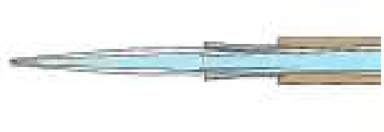
Application aux instruments à vent.

La plupart des instruments à vent mettent en vibration une colonne d'air dont la longueur peut varier. Les vibrations complexes produites peuvent avoir deux origines:

- ❑ l'air lui-même dont l'écoulement perturbé (par un biseau pour la flûte à bec ou le tuyau d'orgue) provoque des alternances de basses et hautes pressions.
  Un tuyau d'orgue émet un son lorsque de l'air est insufflé par l'embouchure. Un mince jet d'air plat sort alors d'une fente située entre le biseau et la lèvre inférieure du tube. La direction de ce jet n'est pas constante. il oscille au niveau de la bouche du tuyau passant alternativement de l'intérieur à l'extérieur du tuyau.



- ❑ ou bien une partie de l'instrument (l'anche pour le hautbois);

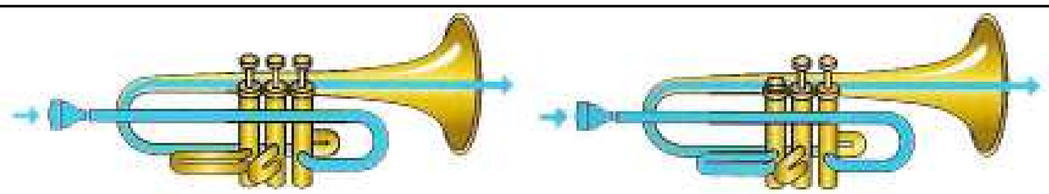


La vibration ainsi obtenue est complexe et son spectre comporte un très grand nombre de fréquences.

Nous avons vu que le tuyau que constitue le corps de l'instrument ne vibre correctement que pour certaines fréquences $f_n = n \times f_1$.
Le son que va émettre l'instrument ne contiendra donc que les modes associés à ces fréquences.
La colonne d'air réalise ainsi une sélection des fréquences émises en fonction des modes propres de vibration de l'instrument. La fréquence du mode fondamental est déterminée par la longueur donnée au tube. Ainsi, le musicien peut, en soufflant de manière identique dans son instrument, jouer plusieurs notes différentes en modifiant uniquement la longueur de la colonne d'air excitée.

Par exemple:

- ❑ dans le cas du tuyau d'orgue, une coulisse d'accord située dans la partie supérieure du tube permet d'affiner le choix de cette fréquence.
- ❑ en bouchant ou en débouchant des trous répartis sur tout le long de l'instrument, le flûtiste (ou le trompettiste) modifie la fréquence de la fondamentale.



Tubulure de la trompette: en abaissant un piston, on allonge la colonne d'air ce qui modifie la note.

Ainsi, le tuyau sonore des instruments à vent cumule ***deux fonctions***:

- ❑ il assure le ***couplage avec l'air ambiant*** mais, de plus, suivant ses caractéristiques;
- ❑ il ***sélectionne les fréquences émises*** contrairement à la caisse de résonance d'un instrument à corde.

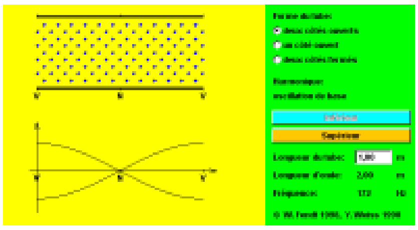
A noter également que les vibrations des parois de l'instrument jouent, elles aussi, un rôle important dans l'émission sonore. Ceci explique la grande différence des sonorités existante entre les «cuivres» et les «bois» (trompette et flûte à bec par exemple).

2. ONDE STATIONNAIRE ENTRE DEUX OBSTACLES FIXES: CAS DE LA COLONNE D'AIR.

Dispositif.

Ouvrir «applets fender/Index/Oscillations et ondes/Ondes stationnaires longitudinales»

Définition.



Par analogie avec ce qui se passe sur la corde, on peut montrer que le sondes stationnaires résultent de la superposition, en tout point de la colonne, d'ondes incidentes et d'ondes réfléchies sur les extrémités. On retrouve ainsi justifiée l'existence des modes propres de vibration d'une colonne d'air.

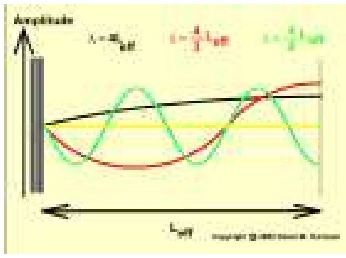
Pour une longueur L de colonne et certaines fréquences, on repère des noeuds de vibration (qui correspondent à des ventres de pression), ainsi que des ventres de vibration (qui correspondent à des noeuds de pression).

La distance séparant deux noeuds de vibration est égale à la demi-longueur d'onde $\lambda/2$ de l'onde incidente.

La longueur L du tuyau

La relation est $2\,L = n\,\lambda$ ce qui donne $2\,L = n\,c\,T = n\,c\,\dfrac{1}{f}$ soit $f_n = \dfrac{n\,.\,c}{2\,.\,L} = n\,.\,f_1$ avec $f_1 = \dfrac{c}{2\,L}$

Remarque



Dans le cas particulier d'un tuyau fermé à une extrémité, un ventre de vibration se trouve à l'embouchure et un noeud à l'extrémité fermée; on obtient alors une ondition différente:

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

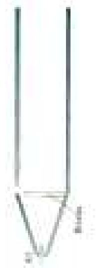
On voit donc que l'expression des fréquences des différents modes propres de vibration dépend de la nature des extrémités (extrémité ouverte ou fermée).

Application aux instruments de musique

La longueur de la colonne d'air étant liée à la longueur d'onde, les fréquences de vibrations de la colonne dépendent donc de sa longueur.

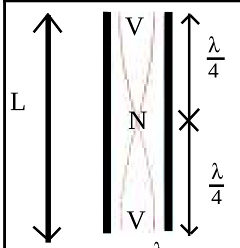
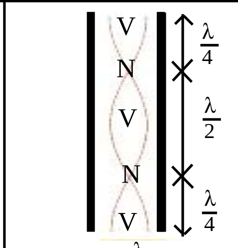
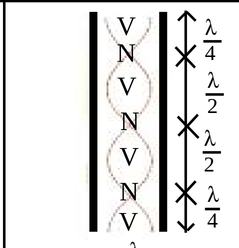
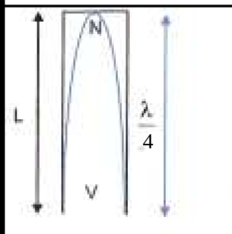
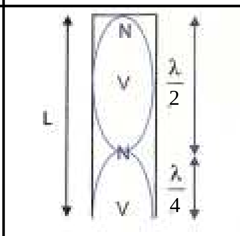
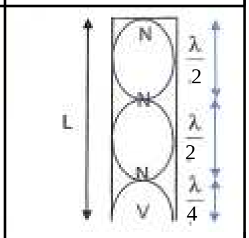
Cette propriété joue un rôle fondamental pour les instruments à vent pour lesquels la note jouée est déterminée par la longueur du tuyau sonore que compose le corps de l'instrument.

La règle des 3 **V** à retenir: «Un **V**entre de **V**ibration correspond à une ou**V**erture du tuyau»

DEUX EXTREMITES OUVERTES	UNE EXTREMITE OUVERTE
On modélise un tuyau d'orgue par un tube ouvert à ses deux extrémités, entre le biseau ouvert à gauche et l'ouverture à droite 	Cette flûte consiste en une série de tuyaux de longueurs différentes qui sont maintenus ensemble par des ligatures. Une extrémité de chaque tuyau est à l'air libre, l'autre (le fond) est fermée. 

LES DIFFERENTS MODES

Le mode fondamental correspond toujuors à la plus peite valeur de n

Fondamental $n = 1$	1ère Harmonique $n = 2$	2nde Harmonique $n = 3$	Fondamental $n = 0$	1ère Harmonique $n = 1$	2nde Harmonique $n = 2$
					
$L = \frac{\lambda}{2}$	$L = 2 \times \frac{\lambda}{2}$	$L = 3 \times \frac{\lambda}{2}$	$L = \frac{\lambda}{4}$	$L = \frac{\lambda}{4} + \frac{\lambda}{2}$	$L = \frac{\lambda}{4} + 2 \times \frac{\lambda}{2}$

CONDITION A REMPLIR POUR OBTENIR DES ONDES STATIONNAIRES

Deux extrémités ouvertes :

$$\mathbf{L = n \frac{\lambda}{2}}$$

Une extrémité ouverte :

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

LES FREQUENCES DES HARMONIQUES

Deux extrémités ouvertes :

si $L = n \frac{\lambda}{2}$ on en déduit $\lambda = \frac{2L}{n}$

Or $f = \frac{c}{\lambda}$ soit $f_n = \frac{c}{2L} n = f_1 \times n$

$$\mathbf{f_n = f_1 \times n}$$

Ainsi, les fréquences f_n des harmoniques sont des multiples de f_1. Les sons possibles sont les harmoniques pairs ou impairs.

Une extrémité ouverte :

si $L = (2n + 1) \frac{\lambda}{4}$ on en déduit $\lambda = \frac{4L}{(2n + 1)}$

Or $f = \frac{c}{\lambda}$ soit $f_n = \frac{c}{4L} (2n + 1) = f_0 \times (2n + 1)$

$$\mathbf{f_n = f_0 \times (2n + 1)}$$

Ainsi, les fréquences f_n des harmoniques sont des multiples impairs de f_0. Les seuls sons possibles sont les harmoniques impairs.

LE SPECTRE