Séance de Spécialité n°4
Instruments à vent

Mots-clefs « Instruments à vent ».

1 Activité documentaire : (45 minutes)

1.1 Document 1 : Les instruments à vent

Pour la plupart des instruments à vent, le son est produit par la vibration d'une colonne d'air dans des tuyaux sonores. Il existe plusieurs façons de faire vibrer une colonne d'air :

— Le musicien peut envoyer directement un filet d'air sur un biseau. Le filet d'air, se brisant sur le biseau, oscille en s'écoulant alternativement vers l'intérieur puis vers l'extérieur du tube. L'orgue ou la flute à bec sont des exemples d'instruments à vent à biseau.
— Pour certains instruments à vent, l'arête du bord du tuyau remplace le biseau. C'est le cas de la flûte traversière ou de la flûte de Pan.
— Une autre façon consiste à adapter une « anche » sur l'instrument. Il s'agit d'une petite lamelle en métal, en roseau ou en matière plastique, capable de vibrer sous l'effet du souffle du musicien. On trouve des anches dans les saxophones et les clarinettes. Dans le cas des instruments à embouchure comme la trompette ou le trombone, le musicien fait vibrer ses lèvres en expirant fortement : on parle « d'anches lippales ».

1.2 Document 2 : Vibration d'une colonne d'air

Tout comme une corde vibrante, une colonne d'air soumise à une perturbation périodique, peut entrer en vibration pour certaines fréquences particulières f_n. À chacune de ces fréquences f_n est associée un mode propre de vibration de la colonne d'air appelé mode harmonique de rang n. Le plus petit multiple commun de ces fréquences, notée f_1, est appelée fréquence fondamentale.

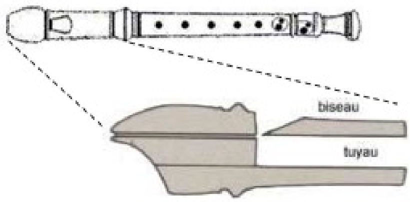
Des ondes sonores progressives se propagent dans un sens et dans l'autre de la colonne d'air. Lorsque ces ondes interfèrent de façon constructive, la colonne d'air entre en vibration. Il s'établit alors un système d'ondes stationnaires dans le tuyau. La distance qui séparent alors deux ventres (V) ou deux nœuds (N) de vibration de l'air est égale à $\lambda/2$. Les modes propres de vibration de la colonne d'air dépendent du type de tuyau utilisé : ouvert aux deux extrémités, ouvert à une seule extrémité ou fermé aux deux extrémités.

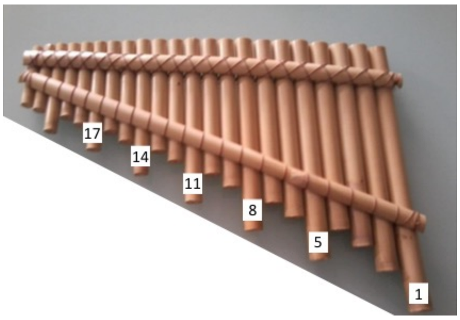
Voici une méthode pour trouver tous les modes propres successifs d'un tuyau sonore :

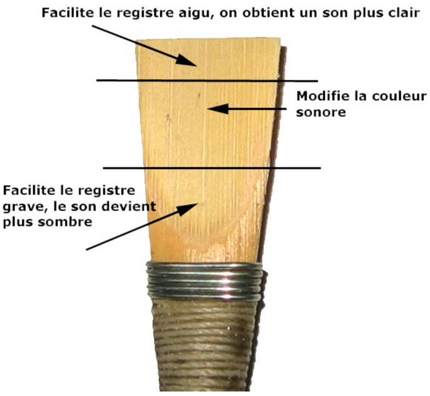
- On note n°1 le mode de vibration de plus basse fréquence, et n°2, 3, etc., les modes suivants ;
- Pour trouver la longueur d'onde du son émis, on compte les quarts de longueur d'onde ($\lambda_n/4$) que l'on peut faire passer dans chaque tuyau de longueur L ;
- On en déduit les fréquences f_n correspondantes par la formule $f_n = v/\lambda_i$;
- Pour l'application numérique, on utilise $v = 340\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$ pour la vitesse du son, et $\mathrm{L} = 34{,}0$ cm pour la longueur du tuyau ;
- Le mode n°1 correspond au fondamental, et les modes n°2, n°3, etc., aux harmoniques 2, 3, etc., respectivement, avec respect de la relation $f_n = n f_1$ entre la fréquence f_n de l'harmonique de rang n et la fréquence f_1 du fondamental.

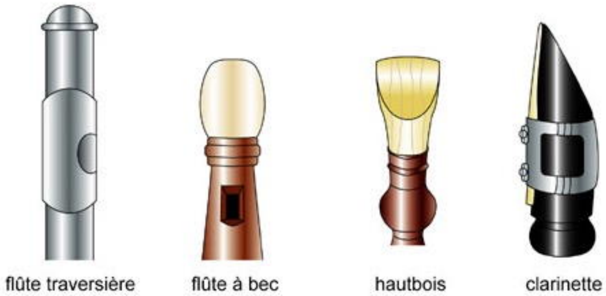
Voir les schémas proposés ci-après.

1.3 Document 3 : Quelques photographies









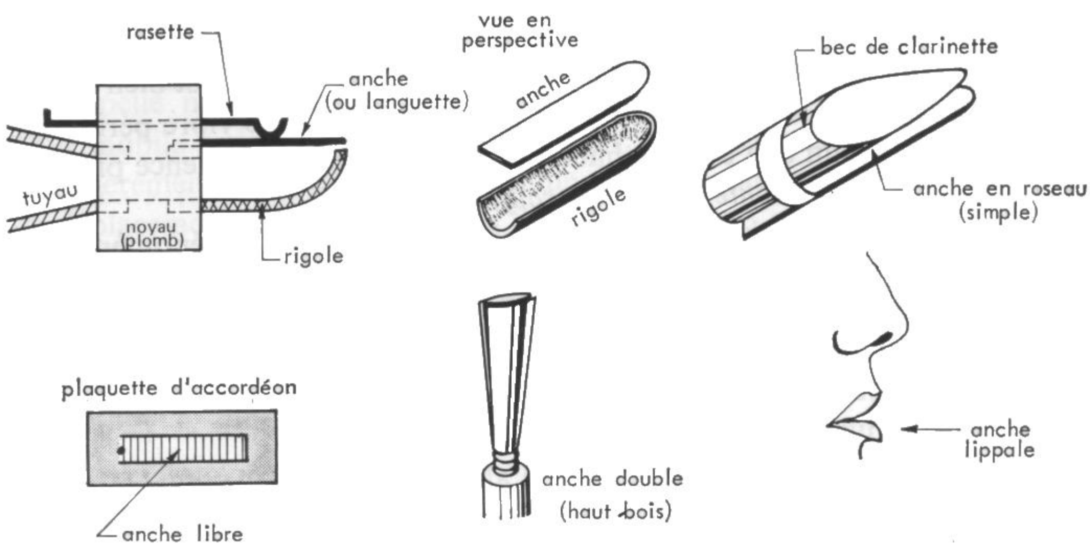
1.4 Questions

a. Comment est produit un son dans un instrument à vent ?

b. On considère un tuyau de longueur L ouvert aux deux extrémités. Dans le mode fondamental ($n = 1$), quelle relation peut-on écrire entre la longueur L du tuyau et la longueur d'onde λ des ondes sonores sinusoïdales qui s'y propagent ? Quelles relations a-t-on pour les modes harmoniques de rang $n = 2$, $n = 3$ et $n = 4$? En déduire une relation générale entre L, n et λ.

c. On note v la vitesse du son dans l'air. Quelle relation a-t-on entre la vitesse v, la longueur d'onde λ et la fréquence f des ondes sonores sinusoïdales qui se propagent dans la colonne d'air d'un instrument à vent ? Pour l'harmonique de rang n, établir une relation entre f_n, v et L. En déduire l'expression de la fréquence f_1 du mode fondamental.

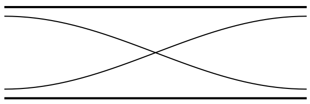
d. On considère un tuyau de longueur L ouvert à une extrémité et fermée à l'autre. Pour ce tuyau, répondre aux mêmes questions que précédemment.



$\boxed{\text{2 extrémités ouvertes}}$

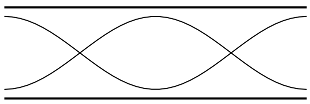
Ventres aux extrémités

Toutes les harmoniques

①


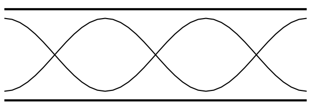
$$2 \times \frac{\lambda_1}{4} = \mathrm{L} \quad \Rightarrow \quad \lambda_1 = \frac{2\mathrm{L}}{1}$$

$$\Rightarrow \quad f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{2\mathrm{L}} = 500\ \mathrm{Hz}$$

②


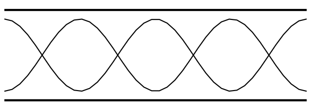
$$4 \times \frac{\lambda_2}{4} = \mathrm{L} \quad \Rightarrow \quad \lambda_2 = \frac{2\mathrm{L}}{2}$$

$$\lambda_2 = \frac{\lambda_1}{2} \quad \Rightarrow \quad f_2 = 2f_1 = 1\,000\ \mathrm{Hz}$$

③


$$6 \times \frac{\lambda_3}{4} = \mathrm{L} \quad \Rightarrow \quad \lambda_3 = \frac{2\mathrm{L}}{3}$$

$$\lambda_3 = \frac{\lambda_1}{3} \quad \Rightarrow \quad f_3 = 3f_1 = 1\,500\ \mathrm{Hz}$$

④


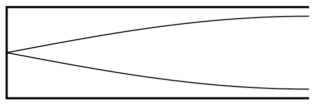
$$8 \times \frac{\lambda_4}{4} = \mathrm{L} \quad \Rightarrow \quad \lambda_4 = \frac{2\mathrm{L}}{4}$$

$$\lambda_4 = \frac{\lambda_1}{4} \quad \Rightarrow \quad f_4 = 4f_1 = 2\,000\ \mathrm{Hz}$$

$\boxed{\text{1 fermée + 1 ouverte}}$

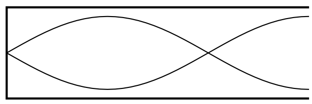
1 nœud + 1 ventre aux extrémités

Harmoniques impaires seules

①


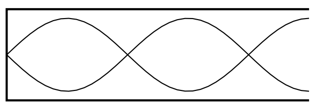
$$1 \times \frac{\lambda_1}{4} = \mathrm{L} \quad \Rightarrow \quad \lambda_1 = \frac{4\mathrm{L}}{1}$$

$$\Rightarrow \quad f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{4\mathrm{L}} = 250\ \mathrm{Hz}$$

③


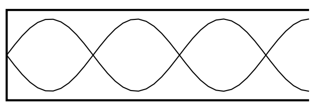
$$3 \times \frac{\lambda_3}{4} = \mathrm{L} \quad \Rightarrow \quad \lambda_3 = \frac{4\mathrm{L}}{3}$$

$$\lambda_3 = \frac{\lambda_1}{3} \quad \Rightarrow \quad f_3 = 3f_1 = 750\ \mathrm{Hz}$$

⑤


$$5 \times \frac{\lambda_5}{4} = \mathrm{L} \quad \Rightarrow \quad \lambda_5 = \frac{4\mathrm{L}}{5}$$

$$\lambda_5 = \frac{\lambda_1}{5} \quad \Rightarrow \quad f_5 = 5f_1 = 1\,250\ \mathrm{Hz}$$

⑦


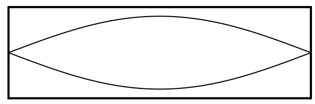
$$7 \times \frac{\lambda_7}{4} = \mathrm{L} \quad \Rightarrow \quad \lambda_7 = \frac{4\mathrm{L}}{7}$$

$$\lambda_7 = \frac{\lambda_1}{7} \quad \Rightarrow \quad f_7 = 7f_1 = 1\,750\ \mathrm{Hz}$$

$\boxed{\text{2 extrémités fermées}}$

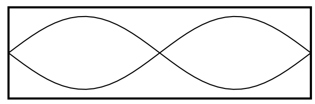
Nœuds aux extrémités

Toutes les harmoniques

①


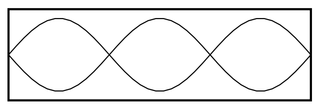
$$2 \times \frac{\lambda_1}{4} = \mathrm{L} \quad \Rightarrow \quad \lambda_1 = \frac{2\mathrm{L}}{1}$$

$$\Rightarrow \quad f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{2\mathrm{L}} = 500\ \mathrm{Hz}$$

②


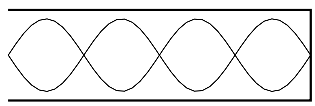
$$4 \times \frac{\lambda_2}{4} = \mathrm{L} \quad \Rightarrow \quad \lambda_2 = \frac{2\mathrm{L}}{2}$$

$$\lambda_2 = \frac{\lambda_1}{2} \quad \Rightarrow \quad f_2 = 2f_1 = 1\,000\ \mathrm{Hz}$$

③


$$6 \times \frac{\lambda_3}{4} = \mathrm{L} \quad \Rightarrow \quad \lambda_3 = \frac{2\mathrm{L}}{3}$$

$$\lambda_3 = \frac{\lambda_1}{3} \quad \Rightarrow \quad f_3 = 3f_1 = 1\,500\ \mathrm{Hz}$$

④


$$8 \times \frac{\lambda_4}{4} = \mathrm{L} \quad \Rightarrow \quad \lambda_4 = \frac{2\mathrm{L}}{4}$$

$$\lambda_4 = \frac{\lambda_1}{4} \quad \Rightarrow \quad f_4 = 4f_1 = 2\,000\ \mathrm{Hz}$$

2 Activité expérimentale : Vibration d'une colonne d'air (1 heure)

2.1 Les quatre premières harmoniques

- À l'aide du support, disposez le haut-parleur à 1 cm environ d'une extrémité du tube de 1 mètre.

> Ne pas "coller" le haut-parleur au tuyau, pour bien se placer dans le cas "deux extrémités ouvertes".

- Branchez le haut-parleur sur la sortie 50 Ω du GBF.

e . Dressez un schéma de principe de ce montage sur votre compte-rendu.

> Appel du professeur pour vérification du montage avant mise sous tension.

- Réglez le GBF sur un signal sinusoïdal de fréquence 100 Hz, et réglez l'amplitude de sortie de façon à avoir un son est à peine audible.
- Augmentez progressivement la fréquence du GBF à partir de 100 Hz, en recherchant les valeurs des quatre premières fréquences de résonance (amplitude maximale) du tuyau sonore, c'est à dire les fréquences des quatre premiers modes propres de vibration de la colonne d'air. Notez ces quatre fréquences sur votre compte-rendu.

f . Que vaut la fréquence f_1 du fondamental ? Comment être certain qu'il s'agit bien du fondamental ?

g . Quel lien existe-t-il entre la fréquence f_1 du fondamental et les fréquences f_2, f_3... des harmoniques n°2, n°3, etc ?

h . Calculez le quotient $L \cdot f_1$ avec L la longueur du tuyau, et conclure.

2.2 Ventre et nœuds de vibration

i . Les extrémités ouvertes d'une colonne d'air correspondent-elles à des ventres ou des nœuds de pression ? Même question pour la vitesse des molécules.

j . Comment savoir si un microphone est sensible à la pression, ou à la vitesse des molécules ?

k . Dressez un schéma des ventres et des nœuds de vibration d'une colonne d'air dans le cas du fondamental, puis des deux modes suivants. On distinguera les schémas en pression, des schémas en vitesse.

3 Exercices (pour la séance n°5)

Révision et Résumé

Vibrer & émettre Pour qu'un instrument de musique produise un son, il lui faut remplir deux fonctions : vibrer et émettre.

Modes propres Sous l'effet d'une perturbation, un système peut se mettre à vibrer librement. Penser à une corde de guitare : on la *pince* (= pertubration), une fois lachée elle vibre.

On appelle modes propres les « façons » (= mode) dont le système vibre librement (= propre à lui seul). En particulier, ces modes de vibrations sont caractérisés par des fréquences bien précises.

Mathématiquement, un mode propre de vibration est un état de vibration sinusoïdal, caractérisé par une fréquence déterminée.

Quantification des fréquences Les fréquences des modes propres sont multiples entier d'une fréquence appelée fondamental.

Le fondamental est la plus basse fréquence propre, les autres fréquences étant appelées harmoniques.

Si on note f_1 la fondamental, les harmoniques de *rang* n sont telles que :

$$f_n = n f_1 \quad \text{avec} \quad n \in \mathbb{N}^*$$

Ventres & Nœuds Un nœud de vibration est un point d'amplitude vibratoire nulle : le point est immobile. Un ventre est un point d'amplitude vibratoire maximale. *Travaillez bien régulièrement pour ne pas vous retrouver avec un nœud dans le ventre le jour du Bac.*

Entre deux nœuds, on parle d'un fuseau.

Stroboscope Vous devez être capable de décrire et de réaliser une mesure de la fréquence de vibration d'une corde à l'aide d'un stroboscope.

Oscilloscope Vous devez être capable de mesurer une période à l'oscilloscope (T = nombre de divisions fois la sensibilité horizontale, en ms/div), et de plus vous devez savoir calculer la fréquence correspondante.

Fréquence du son Vous devez être capable de décrire et de réaliser une mesure de la fréquence et de la période du son émis par une corde, par exemple à l'aide d'un oscilloscope branché à un micro.

Attention, la période du signal est égale à celle du fondamental f_1, même lorsque d'autres composantes f_n s'ajoutent.

Corde Une corde pincée (guitare) ou frappée (piano) émet un son composé de fréquences qui sont celles des modes propres de la corde.

Lorsque qu'une corde vibre sur le mode de rang n, son aspect présente n fuseaux.

Vous devez savoir montrer les modes propres de vibration d'une corde (typiquement, avec un ou plusieurs ventres visibles).

Colonne d'air Une colonne d'air possède des modes de vibrations dont les fréquences sont liées à la longueur.

Vous devez savoir mettre en évidence les modes propres de vibration d'une colonne d'air.

MOTS CLÉS

Instrument de musique	**Fréquence propre**	**Fondamental**	**Ventre**
Mode propre	**Quantification**	**Harmoniques**	**Nœud**

QUESTIONS

Q 1 Donner une définition pour chacun des mots-clefs ci-dessus.

Q 2 Pourquoi, en soufflant simplement dans une flûte à bec, on peut émettre un son, alors que la même expérience est irréalisable avec une trompette ?

Q 3 Anna joue de la guitare électrique, Olivia de la batterie, Alphonse de la trompette. Proposer à chacun une solution pour jouer sans rendre les habitants de l'immeuble dingues, en précisant sur quelle partie de l'instrument ils doivent faire porter leurs efforts.

Q 4 Pourquoi les fréquences des sons amplifiés par la caisse de résonance d'un violon ne doivent par être quantifiés ?

Q 5 Décrire une expérience destinée à mettre en évidence les modes propres de vibration d'une colonne d'air. Même question pour une corde vibrante.

Q 6 En soufflant d'une certaine façon dans un tube à essai, on peut produire un son. Indiquer la source de vibration ainsi que la partie de « l'instrument » assurant le couplage avec l'air ambiant. Proposer une méthode pour changer la fréquence du fondamental émis.

Q 7 Le mode de vibration fondamental d'une corde de guitare est de 440 Hz. Peut-on faire vibrer la corde en la soumettant à une excitation sinusoïdale de 220 Hz ? De 660 Hz ? De 880 Hz ?

EXERCICES

4.1 Son complexe

Soit un son, formé par la superposition de sinusoïdes de fréquences $f_1 = 440$ Hz, $f_2 = 2f_1$ et $f_3 = 3f_1$, d'amplitudes égales.

a . Tracer la somme de ces trois sinusoïdes à la calculatrice graphique.

b . Indiquer la fréquence et la période du son. Généraliser ce résultat.

4.2 Modes propres de vibration d'une corde

Une corde en acier est tendue entre deux points fixes distants de 1,20 m. Elle est excitée sinusoïdalement par une force magnétique. Lorsque la fréquence de la force est de 225 Hz, la corde se met à vibrer fortement. On observe alors la formation de trois fuseaux.

a . Préciser le mode de vibration de la corde.

b . Calculer la fréquence du fondamental et des trois premiers harmoniques.

La corde est maintenant pincée en son milieu, est abandonnée à ses oscillations libres. Un son est émis.

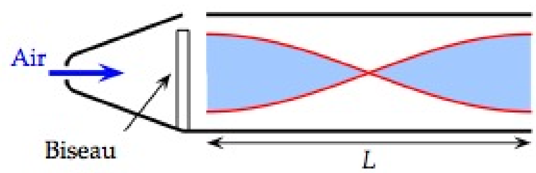
c . La vibration sonore est-elle sinusoïdale ?

d . La fréquence du son émis est celle de l'un des modes propres de la corde. Lequel ?

4.3 Guitare classique

Une guitare classique comporte six cordes, toutes tendues entre le chevalet, fixé sur la caisse, et le sillet, fixé en haut du manche. La distance entre le chevalet et le sillet vaut L=65,0 cm.

On pince la corde en son milieu et on enregistre l'oscillogramme correspondant au son émis.



a . Quelle est la fréquence f_1 du son émis (sensibilité horizontale de 1 ms/div) ?

On excite maintenant la même corde à l'aide d'un aimant et d'un GBF délivrant un courant alternatif de fréquence $f_e = 1,44$ kHz. On observe alors quatre fuseaux sur la corde.

b . Dessiner sur le même schéma l'allure de la corde à plusieurs instants, en y faisant figurer les nœuds et les ventres de vibration.

c . Quelle est la distance d entre deux nœuds voisins ?

d . Quelle est la fréquence propre de vibration de cette corde ?

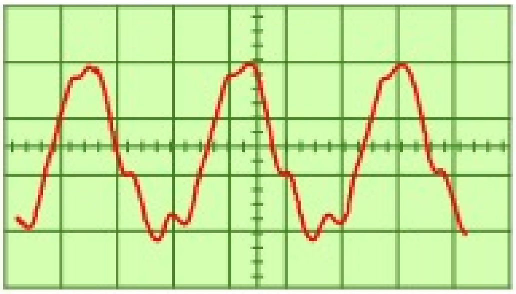
Le guitariste débarasse la corde du dispositif précédent puis la pince à nouveau. Il appose son doigt à $\ell = 21,7$ cm de l'extrémité de la corde vibrante, ce qui a pour effet d'imposer en ce point un nœud de vibration.

e . Combien de fuseaux la corde comporte-t-elle ?

f . Quelle est la fréquence f' du son émis ?

4.4 Vibration sonore d'une colonne d'air

On modélise la partie d'un tuyau d'orgue qui se trouve au-dessus du biseau par un tube ouvert à ses deux extrémités. Les tranches de la colonne d'air contenue dans le tube vibrent parallèlement à l'axe du tube.



Dans le modèle proposé, il y a toujours un ventre de vibration à chaque extrémité du tube. Le schéma ci-dessus représente l'élongation maximale du déplacement des tranches d'air le long de l'axe du tube pour un mode fondamental.

a . Faire une représentation analogue à celle de la figure ci-dessus pour le deuxième puis le troisième harmonique.

b . Par analogie avec la corde, donner la fréquence de ces deux harmoniques en fonction de la fréquence f_1 du mode fondamental.

c . On considère maintenant un tube de longueur $L/2$. En s'appuyant sur le schéma de la question **a**, justifier que le mode fondamental de ce tube a la même fréquence que la deuxième harmonique du tube de longueur L.

d . Donner la fréquence du fondamental d'un tube de longueur $L/3$. Généraliser ces résultats.

Application numérique : $L = 132,8$ cm et $f_1 = 128$ Hz pour le premier tube.

4.5 N°1 p. 100 – Techniques de jeu au violoncelle

4.6 N°4 p. 104 – Clairon et trompette