Séance de Spécialité n°4 : Instruments à vent

Compétences travaillées

Compétences	**Niveau validé**
Analyser :	A B C D
Réaliser :	A B C D
Mobiliser et Exploiter ses connaissances :	A B C D
Mettre en œuvre une démarche expérimentale :	A B C D
Valider :	A B C D

Mots-clefs « Instruments à vent ».

I. Activité documentaire : les instruments à vent (30 minutes)

I.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 ».

I.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.

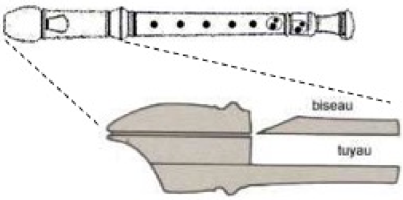
Des ondes sonores progressives se propagent dans un sens et dans l'autre de la colonne d'air. Lorsque ces ondes interfèrent de façon constructive, la colonne d'air entre en vibration. Il s'établit alors un système d'ondes stationnaires dans le tuyau. La distance qui séparent alors deux ventres (V) ou 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.

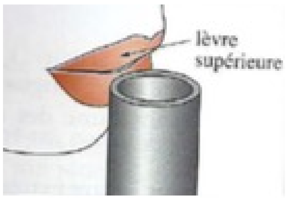
Voici une méthode pour trouver tous les modes propres successifs d'un tuyau sonore :

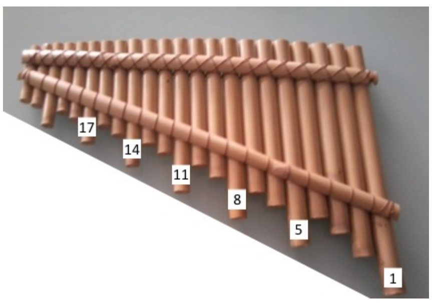
- On note n° 1 le mode de vibration de plus basse fréquence, et n° 2, 3, etc., les modes suivants ;
- Pour trouver la longueur d'onde du son émis, on compte les quarts de longueur d'onde ($\lambda_n/4$) que l'on peut faire passer dans chaque tuyau de longueur L ;
- On en déduit les fréquences f_n correspondantes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

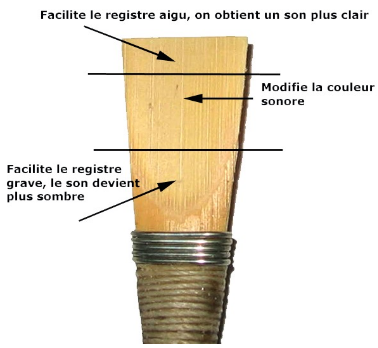
Voir les schémas proposés ci-après.

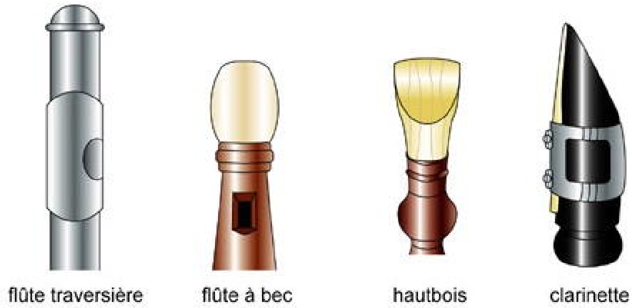
I.3. Document 3 : Quelques photographies











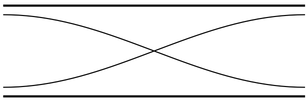
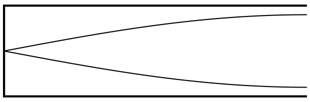
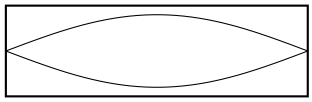
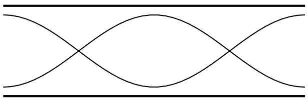
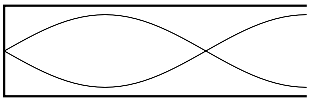
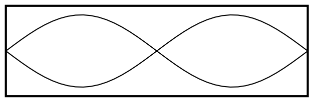
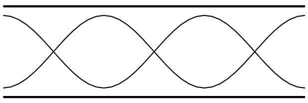
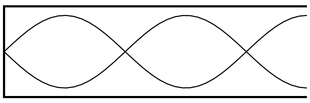
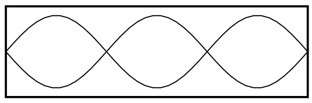
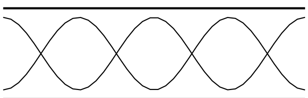
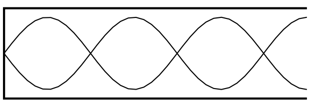
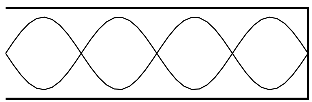
I.4. Questions

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.

2 extrémités ouvertes Ventres aux extrémités Toutes les harmoniques	1 fermée + 1 ouverte 1 nœud + 1 ventre aux extrémités Harmoniques impaires seules	2 extrémités fermées Nœuds aux extrémités Toutes les harmoniques
1  $2 \times \frac{\lambda_1}{4} = L \quad \Rightarrow \quad \lambda_1 = \frac{2L}{1}$ $\Rightarrow \quad f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{2L} = 500 \text{ Hz}$	1  $1 \times \frac{\lambda_1}{4} = L \quad \Rightarrow \quad \lambda_1 = \frac{4L}{1}$ $\Rightarrow \quad f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{4L} = 250 \text{ Hz}$	1  $2 \times \frac{\lambda_1}{4} = L \quad \Rightarrow \quad \lambda_1 = \frac{2L}{1}$ $\Rightarrow \quad f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{2L} = 500 \text{ Hz}$
2  $4 \times \frac{\lambda_2}{4} = L \quad \Rightarrow \quad \lambda_2 = \frac{2L}{2}$ $\lambda_2 = \frac{\lambda_1}{2} \quad \Rightarrow \quad f_2 = 2f_1 = 1\,000 \text{ Hz}$	3  $3 \times \frac{\lambda_3}{4} = L \quad \Rightarrow \quad \lambda_3 = \frac{4L}{3}$ $\lambda_3 = \frac{\lambda_1}{3} \quad \Rightarrow \quad f_3 = 3f_1 = 750 \text{ Hz}$	2  $4 \times \frac{\lambda_2}{4} = L \quad \Rightarrow \quad \lambda_2 = \frac{2L}{2}$ $\lambda_2 = \frac{\lambda_1}{2} \quad \Rightarrow \quad f_2 = 2f_1 = 1\,000 \text{ Hz}$
3  $6 \times \frac{\lambda_3}{4} = L \quad \Rightarrow \quad \lambda_3 = \frac{2L}{3}$ $\lambda_3 = \frac{\lambda_1}{3} \quad \Rightarrow \quad f_3 = 3f_1 = 1\,500 \text{ Hz}$	5  $5 \times \frac{\lambda_5}{4} = L \quad \Rightarrow \quad \lambda_5 = \frac{4L}{5}$ $\lambda_5 = \frac{\lambda_1}{5} \quad \Rightarrow \quad f_5 = 5f_1 = 1\,250 \text{ Hz}$	3  $6 \times \frac{\lambda_3}{4} = L \quad \Rightarrow \quad \lambda_3 = \frac{2L}{3}$ $\lambda_3 = \frac{\lambda_1}{3} \quad \Rightarrow \quad f_3 = 3f_1 = 1\,500 \text{ Hz}$
4  $8 \times \frac{\lambda_4}{4} = L \quad \Rightarrow \quad \lambda_4 = \frac{2L}{4}$ $\lambda_4 = \frac{\lambda_1}{4} \quad \Rightarrow \quad f_4 = 4f_1 = 2\,000 \text{ Hz}$	7  $7 \times \frac{\lambda_7}{4} = L \quad \Rightarrow \quad \lambda_7 = \frac{4L}{7}$ $\lambda_7 = \frac{\lambda_1}{7} \quad \Rightarrow \quad f_7 = 7f_1 = 1\,750 \text{ Hz}$	4  $8 \times \frac{\lambda_4}{4} = L \quad \Rightarrow \quad \lambda_4 = \frac{2L}{4}$ $\lambda_4 = \frac{\lambda_1}{4} \quad \Rightarrow \quad f_4 = 4f_1 = 2\,000 \text{ Hz}$

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

II.1. Les quatre premières harmoniques

L'objectif est de trouver la fréquence des quatre premiers modes propres de vibration de la colonne d'air (contenue dans le carton d'emballage mis à votre disposition).

e . Sur votre compte-rendu, expliquez en quelques lignes et en moins de dix minutes comment procéder pour atteindre l'objectif ci-dessus. Schéma conseillés (10 min).

f . Réalisez ces quatre mesures et reportez-les sur votre compte-rendu.

II.3. Des questions après le TP

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

j . 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 ?

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

II.2. Ventres et nœuds de vibration

L'objectif est de mettre en évidence les ventre(s) et nœud(s) de vibration à l'aide d'un microphone.

g. Sur votre compte-rendu, expliquez en quelques lignes et en moins de dix minutes comment procéder pour atteindre l'objectif ci-dessus. Schéma conseillés (10 min).

h. Réalisez ces observations et notez vos conclusions sur votre compte-rendu.

l . 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.

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

n. 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.

III. Correction des exercices de la séance n° 3

Mots-clefs

Attention, pas mal de vocabulaire nouveau dans cette séance et dans la précédente, donc un effort de mémoire est nécessaire. L'essentiel est résumé sur la feuille d'énoncé. Complément :

Fréquence propre Fréquence d'un mode propre.

Quantification Propriété d'un système de n'accepter de vibrer qu'à certaines fréquences bien précises, multiples d'une fréquence fondamentale.

Fondamental Mode de vibration de plus basse fréquence accessible ; il s'agit *de facto* de la fréquence du son éventuellement émis par le système, même si il vibre aussi simultanément à d'autres fréquences plus élevées.

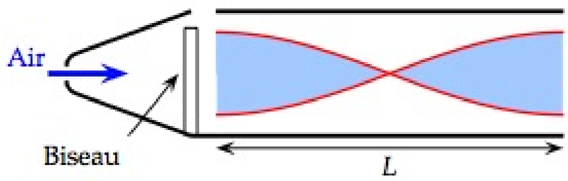
Modes de vibration d'une guitare

Puisque le fondamental est à 440 Hz, la corde ne peut pas entrer en résonance à 220 Hz, ni à 660 Hz, qui ne correspondent pas à des modes propres. En revanche 880 Hz correspond à l'harmonique 2, tel que $f_2 = 2f_1$.

3.1 **Son complexe**

a. Il suffit de tracer la fonction d'équation :

$$y = f(x) = \sin x + \sin 2x + \sin 3x$$



b. Le son a la période et la fréquence du fondamental.

On l'observe clairement avec la courbe : malgré la forme complexe, la période reste égale à T_1, et donc la fréquence à f_1.

Modes propres de vibration d'une corde

a. Trois fuseaux correspondent au troisième mode de vibration, $f_3 = 3f_1$.

b. Pour le fondamental :

$$f_1 = \frac{f_3}{3} = \frac{225}{3} = 75 \text{ Hz}$$

et pour les trois permières harmoniques :

$$f_2 = 150 \text{ Hz} \ ; \ f_3 = 225 \text{ Hz} \quad \text{et} \quad f_4 = 300 \text{ Hz}$$

c. À priori, la vibration sonore n'est pas sinusoïdale, seul le diapason émettant une sinusoïde. Le son est très certainement complexe, formé d'une somme de sinusoïdes.

d. La fréquence du son émis est toujours celle du fondamental, donc $f_1 = 75$ Hz.

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

Exercice résolu dans votre livre.

Guitare classique

IV. Exercices (pour la séance n° 5)

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 :

$$f_n = nf_1 \quad \text{avec} \quad n \in \mathbb{N}^*$$

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.

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.

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.

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.

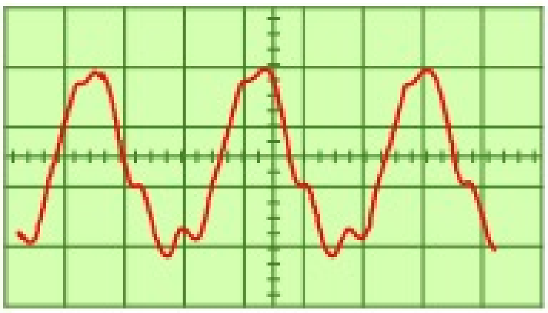
Q 6 En soufflant d'une certaine façon dans un tube à essai, on peut produire un son. Indiquer la source de vibration ainsi que la partie de « l'instrument » assurant le couplage avec l'air ambiant. Proposer une méthode pour changer la fréquence du fondamental émis.

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

4.2 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.

4.3 n° 4 p. 104 – Clairon et trompette