

## T.P. P6 : Sons et modes propres de vibration

Dans tous les instruments de musique acoustiques, on trouve réunis :

- **un système vibrant** ( corde du violon, du violoncelle, de la guitare, de la harpe, du piano ; anche du saxophone, de la clarinette ou du hautbois ; peaux tendues du tambour, du djembé de la timbale ; plaque en bois du balafon ou en métal du xylophone ; lèvres du trompettiste, du tromboniste ...)
- **une caisse de résonance** (enceinte en bois pour les instruments à corde, tuyau pour les instruments à vent et les percussions...) qui transmet, les vibrations à l'air environnant.

Ces deux parties indissociables permettent à l'instrument d'émettre un son audible.

### I.- Production d'un son par un instrument de musique

#### 1) Système mécanique vibrant

Q.1. : Donner des exemples d'instruments de musique courants en les classant parmi les trois grandes familles : les instruments à cordes, les instruments à vent et les percussions. On précisera pour les instruments à cordes s'il s'agit de cordes pincées, frottées ou frappées et l'on distinguera les bois des cuivres pour les instruments à vent. Donner les définitions importantes.

E.2. : On s'intéresse au son émis par un diapason. A quelle catégorie d'instruments appartient-il ? A l'aide d'un marteau en caoutchouc, on fait vibrer l'une des branches du diapason. A l'aide d'un éclairage stroboscopique, on visualise le phénomène. Comment le son est-il produit dans un diapason ?

E.3. : A l'aide du stroboscope, on peut déterminer la fréquence des vibrations mécanique des branches du diapason en supposant qu'il s'agit de vibrations périodiques : c'est la fréquence maximale des éclairs du stroboscope pour laquelle on observe l'immobilité apparente des branches du diapason (lorsque  $f_{\text{strob}} = f_{\text{mvt}}$ , chaque branche effectue juste un aller-retour entre deux éclairs consécutifs de sorte qu'on a l'impression d'une immobilité : c'est l'immobilité apparente). On trouve :

$$f_{\text{strob}} = f_{\text{mvt}} = \dots \text{ Hz}$$

E.4. : On enregistre à l'aide d'un microphone couplé à un système d'acquisition, le son émis par le diapason. On détermine la fréquence de cette vibration sonore à l'aide d'une modélisation :

$$f_{\text{son}} = \dots \text{ Hz}$$

Conclure quant à la nature de l'onde sonore émise par le diapason par rapport à la vibration mécanique de ses branches.

C.5. : En généralisant, dans un instrument de musique acoustique, un système mécanique vibrant est à l'origine de la production d'un son.

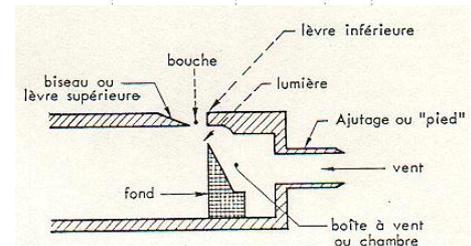
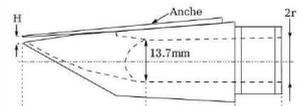
**Pour les instruments à corde**, l'oscillateur mécanique, ou **système mécanique vibrant**, est une corde tendue qui vibre entre deux points fixes. Les vibrations sont déclenchées par le musicien qui la pince, la frotte ou la frappe.

La fréquence du son est imposée par ce système mécanique vibrant. Sa valeur dépend de la longueur de la corde, de sa masse linéique  $\mu$  (masse par unité de longueur) et de la force  $F$  avec laquelle elle est tendue.

**Dans le cas des instruments à vent**, on rencontre différents types de **système mécanique vibrant** :

Pour les instruments à anche simple, comme la clarinette ou le saxophone, il s'agit d'une mince lame fixée au bec de l'instrument. Cette anche vibre sous l'effet du souffle du musicien (il existe des instruments à anche double comme le hautbois ou la trompette).

Pour les instruments à biseau, comme le pipeau ou l'orgue acoustique, un biseau sert à former un jet d'air plat qui, alternativement, sort par un orifice, appelé lumière, et entre dans le corps de l'instrument.



#### 2) Système assurant le couplage avec l'air

Q.6. : Le diapason seul ne produit pas un son d'intensité suffisante pour être entendu nettement. Dès lors, comment le son est-il transmis à l'air avec une grande amplitude ? Donner des exemples pour d'autres instruments.

C.7. : Une corde vibrante est elle aussi incapable de donner une amplitude suffisante aux vibrations de l'air pour produire un son clairement audible. Il faut une **caisse de résonance** pour la guitare, le violon ou le diapason par exemple. Ce rôle est assuré par la table d'harmonie dans un piano (voir photo ci-contre).

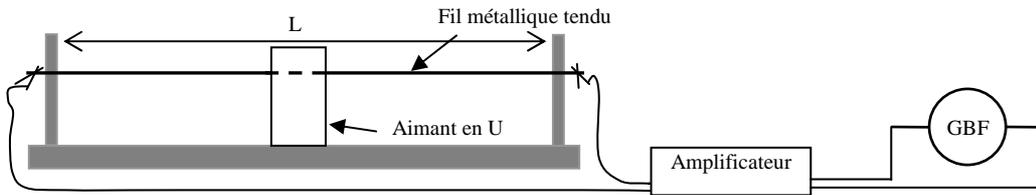
Dans les instruments à vent, c'est le corps de l'instrument qui joue le rôle de caisse de résonance. La colonne d'air qui se trouve à l'intérieur est mise en vibration par l'oscillateur vibrant (anche, jet d'air sur le biseau). La fréquence du son est imposée par les vibrations de cette colonne d'air.



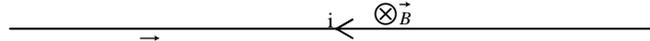
## II.- Vibrations d'une corde entre deux points fixes

### 1) Modes propres de vibration

E.8. : On étudie le mouvement d'une corde de guitare à l'aide du montage suivant : la corde (ou fil métallique) est tendue et fixée à ses extrémités par deux points fixes :



Q.9. : La corde, parcourue par un courant alternatif sinusoïdal et placée au voisinage d'un aimant, est soumise à une force déjà étudiée en classe de première. Quelle est le nom de cette force ? Quelle expérience bien connue met en évidence l'existence de cette force ?



Q.10. : En supposant que le champ magnétique  $\vec{B}$  généré par l'aimant est à peu près constant dans la zone de vibration de la corde et qu'il est dirigé perpendiculairement au plan de la figure précédente, recopier et compléter, en justifiant, le schéma précédent en représentant la force  $\vec{F}$ . Montrer que le mouvement de la corde est alors forcément transversal (à la corde) et dans le plan de la figure.

E.11. : On augmente, à partir de 0 Hz, la fréquence de la tension sinusoïdale délivrée par le générateur. Qu'observe-t-on ?

C.12. : Toute vibration de la corde pour laquelle **chaque point vibre sinusoïdalement à la même fréquence est un mode propre de vibration**. La fréquence correspondante est **une fréquence propre**.

Q.13. : Comment repérer aisément un mode propre de vibration à l'aide du stroboscope ? On vérifie rapidement que la fréquence propre de vibration de la corde est égale à celle de la tension sinusoïdale à ses bornes.

### 2) Mode fondamental et modes harmoniques

C.14. : La corde est **immobilisée à ses deux extrémités**. Ces conditions ne permettent pas toutes les vibrations sinusoïdales possibles. Elles imposent des modes propres pour lesquelles les fréquences propres forment une suite arithmétique.

C.15. : Le mode propre dont la fréquence est la plus basse ( $n = 1$ ) est appelé **mode fondamental** : sa fréquence propre est notée  $f_1$ .

Les autres modes propres sont appelés **modes harmoniques** ( $n \geq 1$ ). Ils sont caractérisés par un nombre entier  $n$ .

S.16. : Pour l'une des ces fréquences, représenter l'allure de la corde (représentation spatiale de l'onde) à  $t$ ,  $t + T/4$ ,  $t + T/2$ ,  $t + 3T/4$  et  $t + T$ .

### 3) Noeud et ventre de vibration

E.17. : Lorsqu'on **excite** sinusoïdalement une corde (appelée **résonateur**) par une force appliquée sur un petit élément de longueur, la corde ne se met à vibrer avec une amplitude importante que lorsque **la fréquence d'excitation** est égale à une de ses fréquences propres : on dit qu'il y a **résonance** entre l'**excitateur** (ici le GBF) et le **résonateur** (ici la corde fixée à ses deux extrémités). A cette fréquence, les points de la corde vibrent tous sinusoïdalement à la même fréquence avec une amplitude qui dépend de leur position.

C.18. : Lorsqu'ils sont situés sur un **ventre de vibration, l'amplitude est maximale**, et sur un **noeud de vibration, l'amplitude est nulle**.

S.19. : Pour chaque valeur de fréquence propre  $f_n$  mesurée à l'oscilloscope (prendre  $n = 1, 2, 3$  et  $4$ ), dessiner l'allure de la corde dans son mode propre  $n$  et donner la valeur de  $f_n$ . Noter le nombre de noeuds et de ventres ainsi que la distance  $d_n$  entre deux noeuds consécutifs.

C.20. : Lorsque la corde vibre selon un de ses modes propres, on constate la présence de fuseaux de longueurs égales  $d_n$ . L'extrémité d'un fuseau est un noeud de vibration et le milieu d'un fuseau est un ventre de vibration.

Q.21. D'après les résultats de Q.19., déterminer les relations qui relient, pour l'harmonique d'ordre  $n$  :

- la longueur d'un fuseau  $d_n$  avec la longueur  $L$  de la corde
- la fréquence du mode d'ordre  $n$   $f_n$  à celle du fondamental  $f_0$

Q.22. : Justifier qu'on dise des fréquences propres qu'elles sont **quantifiées**.

### 4) Paramètre influençant la valeur des fréquences propres

On va cette fois-ci modifier les paramètres du système vibrant à fréquence de vibration constante :  $f = 50$  Hz afin de déterminer leur influence sur les fréquences propres. On utilisera cette fois un vibreur excitant un fil de nylon tendu par une masse sur une poulie.

Q.23. : Dresser une liste des principaux paramètres du système qui pourraient influencer la valeur des fréquences propres du système.

E.24. : Alimenter le vibreur et faire varier l'un des paramètres ci-dessus afin de placer une fréquence propre à la valeur de  $f = 50$  Hz. Comment repère-t-on cette situation ?

E.25. : Modifier ce paramètre et en déduire son influence sur les valeurs des fréquences propres. Faire de même pour les autres paramètres.

### 5) Son émis par une corde pincée ou frappée

E.26. : On remplace le GBF précédent par un oscilloscope numérique.

Q.27. : L'oscillation du fil dans le champ magnétique créé par l'aimant en U produit une très faible tension à ses bornes. La tension produite porte le nom de **tension induite**. Quel dispositif, bien connu, utilise ce même phénomène physique ?

E.28. : On déclenche l'acquisition, on pince la corde en son milieu et on enregistre la tension induite aux bornes de la corde en fonction du temps. LA photographie de l'oscillogramme est disponible sur le site.

Q.29. : La tension produite est-elle périodique, sinusoïdale ? Justifier à chaque fois. Donner sa valeur maximale.

Q.30. : Mesurer **précisément** à l'aide du réticule la période  $T_0$  de ces **oscillations libres** (par opposition aux **oscillations forcées** précédentes). En déduire la fréquence  $f_0$  des oscillations libres de ce fil.

C.31. : Lorsqu'une corde de guitare n'est plus excitée par une force sinusoïdale mais pincée, ses **oscillations libres** produisent un son composé de sons sinusoïdaux dont les fréquences sont celles des modes propres de la corde. La fréquence du son produit est proche de celle du mode fondamental.

Q.32. : Vérifier que  $f_0$  mesuré est proche de la valeur de  $f_1$  précédemment déterminée.

C.33. : La fréquence la plus basse est celle du mode fondamental de la corde, les autres fréquences sont égales à certaines fréquences des modes harmoniques. Il n'y a pas de fréquences autres que celle du fondamental et des harmoniques.

**Les vibrations libres de la corde sont une superposition des modes de vibrations propres de la corde.** La position des doigts du musicien sur la corde permet de modifier la longueur  $L$  de corde qui vibre et d'ainsi changer la fréquence du fondamentale (et donc celles des harmoniques) dans le but de changer le timbre du son.

C 34 : À la suite du coup bref porté par le marteau d'un piano sur une corde, les vibrations de la corde sont une superposition du mode fondamental et de certains modes harmoniques, comme dans le cas d'une guitare (la longueur de la corde est par contre ici fixe : il y a une corde par touche de piano).

## III.- Vibrations d'une colonne d'air

### 1) Modes propres pour une colonne d'air

E.35. : On considère une colonne d'air de hauteur  $L$  dans un éprouvette. Excitées par le son sinusoïdal d'un haut-parleur, les tranches d'air dans le tube peuvent vibrer longitudinalement. On augmente la fréquence du haut-parleur en partant de 0 Hz et on constate alors que le tube n'émet un son que pour certaines fréquences d'excitation dites «favorisées».

E.36. : On relève les valeurs de ces fréquences :  $f_1 = \dots \dots \dots$  Hz ;  $f_2 = \dots \dots \dots$  Hz ;  $f_3 = \dots \dots \dots$  Hz ;

$f_4 = \dots \dots \dots$  Hz

C.37. : Comme pour la corde de guitare, ces fréquences sont les fréquences des modes propres de vibration de la colonne d'air : elles sont quantifiées.

Q.38. : Les valeurs de ces fréquences sont dans un rapport simple avec la plus faible (celle du mode fondamental) ; pour chacune d'elles, trouver la valeur de ce rapport.

Q.39. : Donner la relation entre  $n$ ,  $f_n$  et  $f_1$ . Ce résultat est-il le même que celui obtenu pour la corde maintenue fixe à ses extrémités ?

