Séance de Spécialité n° 3
Instruments à cordes

Mot-clé « Instruments à cordes ».

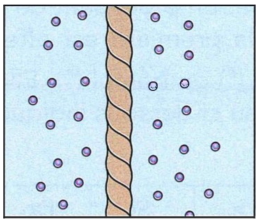
1 Activité documentaire : la guitare (45 min)

Document 1 – Une note est née

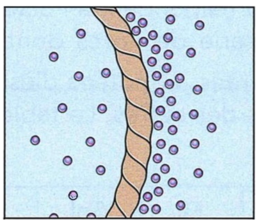
« Du bout du doigt, le guitariste a déplacé la corde pour la faire vibrer. Celle-ci se déforme alors d'avant en arrière et bouscule les *molécules d'air* autour d'elle. Ainsi, quand la corde avance, elle repousse les molécules devant elle, qui se retrouvent ratatinées les unes contre les autres. L'air est donc comprimé à l'endroit où vient de passer la corde, et *les molécules cherchent aussitôt à retrouver leur espace vital en s'écartant les unes des autres.* Elles repoussent alors leurs voisines comme des boules de billard et, de proche en proche, la zone de surpression se déplace. Le va-et- vient de la corde vibrante crée ainsi une succession de zones de surpression qui vont se déplacer comme des vagues dans la pièce : le son naît. Et le nouveau-né prend la forme d'une onde, dont les pics correspondent à chaque battement de la corde. Il vibre donc au même rythme. Aussi, la *vitesse de vibration* de la corde — autrement dit, le nombre de battements par seconde — détermine la fréquence du son, qui s'exprime en hertz (Hz). »

Science et Vie Junior n° 9 , nov. 1989.

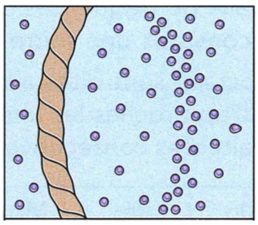
Document 2 – Corde vibrante



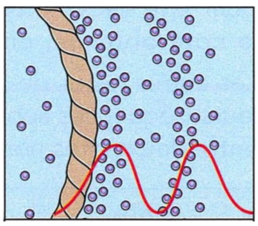
La corde est cernée de molécules représentées symboliquement par des sphères.



En vibrant, elle les pousse les unes contre les autres.

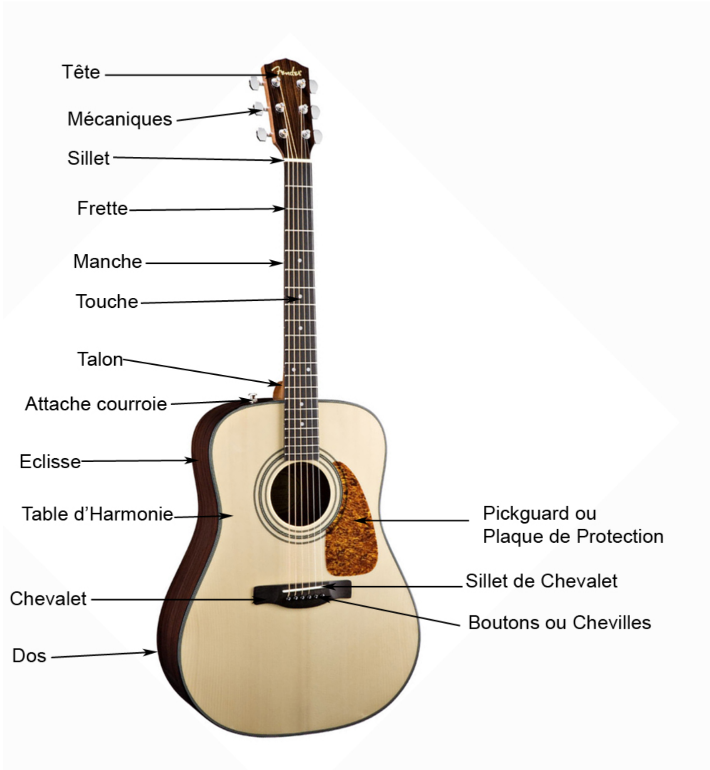


La compression de l'air se propage de proche en proche.



Le va-et-vient de la corde crée des *vagues* d'air comprimé... donc une onde, le son.

Document 3 – Guitare acoustique

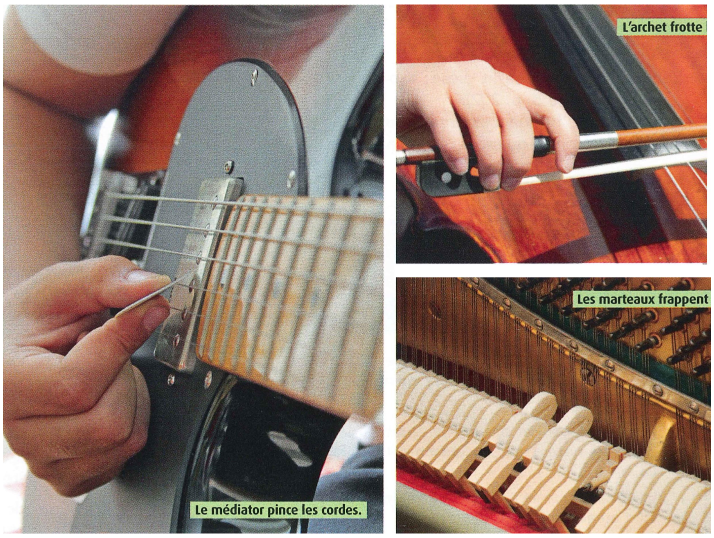


- Une guitare acoustique est un instrument de musique qui comporte six cordes tendues entre le chevalet et le sillet. À chaque corde est associée une note. L'accord de la guitare se fait en modifiant la tension des cordes en agissant sur les clés.
- La table d'harmonie est percée d'une ouverture appelée rosace. Le manche est coupé de frettes entre lesquelles le guitariste appuie les cordes. En modifiant ainsi la longueur de la corde il peut produire des notes différentes sur une même corde.
- Une corde seule est beaucoup trop fine pour mettre l'air en vibration et produire un son. Le son doit être amplifié pour qu'il puisse être audible. Cette fonction est assurée par la table d'harmonie qui joue le rôle de caisse de résonance.
- Les cordes de la guitare sont en acier ou en nylon. Les notes associées aux six cordes sont : mi grave, la, ré, sol, si et enfin mi aigu. La corde du mi grave est la plus grosse, celle du mi aigu est la plus fine.

Document 4 – Pince, frotte ou frappe

Il existe différentes manières de faire vibrer les cordes d'un instrument :

- les cordes d'une guitare sont pincées avec les doigts, un médiator (dispositif permettant de pincer ou gratter les cordes d'un instrument, aussi appelé plectre) ou avec un onglet ;
- les cordes du piano sont frappées par des petits marteaux ;
- les cordes du violon ou d'un violoncelle sont frottées avec un archet.



Document 5 – Modes de vibration d'une corde de guitare

Une corde vibre lorsqu'elle est excitée. Pour certaines fréquences d'excitation, elle prend l'aspect d'un ou plusieurs fuseaux de longueurs égales.

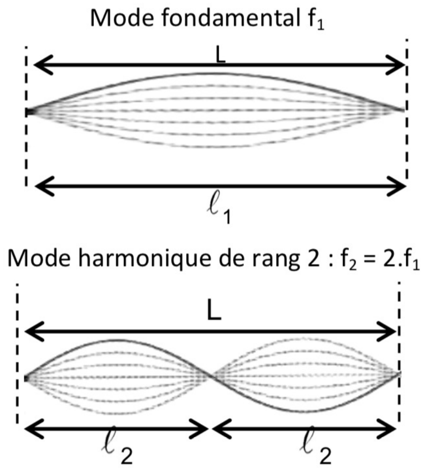
À la plus basse de ces fréquences, appelée fréquence fondamentale et notée f1, on observe un seul fuseau. On obtient plusieurs fuseaux lorsque la fréquence excitatrice est un multiple de la fréquence fondamentale.

Ces fréquences f_n, telles que $f_n = n \cdot f_1$, sont appelées fréquences harmoniques de rang n. Le rang n est également le nombre de fuseaux.

Les extrémités d'une corde en vibration sont immobiles, on parle de nœuds de vibration. Au milieu d'un fuseau, l'amplitude de vibration de la corde est maximale, on parle de ventre de vibration.

Pour une corde de longueur L fixe, la longueur ℓ_n d'un fuseau d'un harmonique de rang n vaut :

$$\ell_\mathrm{n} = \frac{L}{n}$$



Document 6 – Ondes stationnaires

Une corde de guitare est fixée entre deux extrémités fixes. Lorsqu'une onde sinusoïdale de longueur d'onde λ se propage sur la corde, elle est réfléchie de nombreuses fois sur les extrémités. Dans certaines conditions, une onde stationnaire, présentant un ou plusieurs fuseaux, apparaît. Si L est la longueur de la corde et si n est le nombre de fuseaux entre les deux extrémités fixes de la corde, alors la condition de stabilité des ondes stationnaires s'écrit :

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

Document 7 – Hauteur du son émis par une corde vibrante fixée entre deux extrémités

Si l'on considère une corde vibrante maintenue entre ses deux extrémités, la hauteur du son émis dépend de la longueur L de la corde, de sa masse linéique μ (masse par unité de longueur) et de la tension T de la corde.

La composition spectrale du son émis est complexe, et la fréquence f_1 du fondamental est donnée par la relation :

$$f_1 = \frac{1}{2L} \cdot \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

a. Les trois expressions écrites en *italique* dans le document 1 sont incorrectes d'un point de vue scientifique. Les reformuler.

Comment les vibrations de la corde donnent-elles naissance à une onde sonore ?

b. Par analyse dimensionnelle, montrer que le terme :

$$\sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

est homogène à une vitesse.

c. Représenter l'aspect d'une corde de longueur L vibrant à une fréquence f_3 correspondant à l'harmonique de rang 3. Indiquer les nœuds (notés N) et les ventres (notés V) de vibration.

Exprimer la longueur ℓ_3 d'un fuseau en fonction de la longueur L de la corde.

Exprimer la longueur d'onde λ_3 en fonction de la longueur L de la corde.

Exprimer la fréquence f_3 de l'harmonique de rang 3 en fonction de la fréquence f_1 du fondamental de cette corde.

2 Activité expérimentale : Production d'un son par une corde vibrante (1 h)

2.1 Le diapason

- Frapper un diapason avec ou sans sa caisse de résonance. Comparer.
- Enregistrer le signal reçu par un microphone à l'aide d'un oscilloscope à mémoire. Mesurer la période du signal.
- Recommencer avec deux diapasons identiques dont l'un des deux est *désaccordé* par la présence d'une masselotte sur l'une de ses branches.

d. Sur un instrument, on distingue deux parties : l'**excitateur** à l'origine des vibrations et le **résonateur** assurant l'émission du son dans le milieu qui l'entoure. Indiquer ces deux parties dans le cas du diapason.

e. Faire de même dans le cas d'autres instruments, à vent, à corde ou à percussion.

2.2 La guitare

2.2.1 Vibrations libres

- Pincer en son milieu une corde de guitare, et enregistrer à l'aide de l'oscilloscope à mémoire le signal reçu par un microphone. Mesurer la période du signal.
- Tracer le **spectre** du signal enregistré, c'est-à-dire la représentation de la contribution de chaque vibration sinusoïdale dans la vibration de la corde en fonction de la fréquence.
- Mesurer la fréquence f_1 de vibration au stroboscope.

f. Lorsqu'un spectre comporte une seule fréquence, le signal obtenu est dit pur et son allure est sinusoïdale.

Si le spectre comporte plusieurs fréquences f_1, f_2, ..., le signal est équivalent à la superposition des fonctions sinusoïdales de fréquences f_1, f_2, ...

Comment qualifier le signal obtenu pour le diapason ? Pour la corde de guitare ?

g. Noter dans ce dernier cas toutes les valeurs des fréquences lisibles sur le spectre, et comparer leurs valeurs à la fréquence f_1 mesurée au stroboscope.

2.2.2 Vibrations forcées

- Placer plusieurs aimants en U sur la guitare, et brancher une corde en série avec un rhéostat et un générateur (sortie amplifiée 8 Ω).
- Rechercher différentes fréquences pour lesquelles un son est audible au niveau de la guitare. Vérifier une fréquence au stroboscope et noter toutes les fréquences.

h. Comparer les valeurs des fréquences obtenues avec celles lues sur le spectre.

i. Quel lien existe-t-il entre ces fréquences et f_1 ?

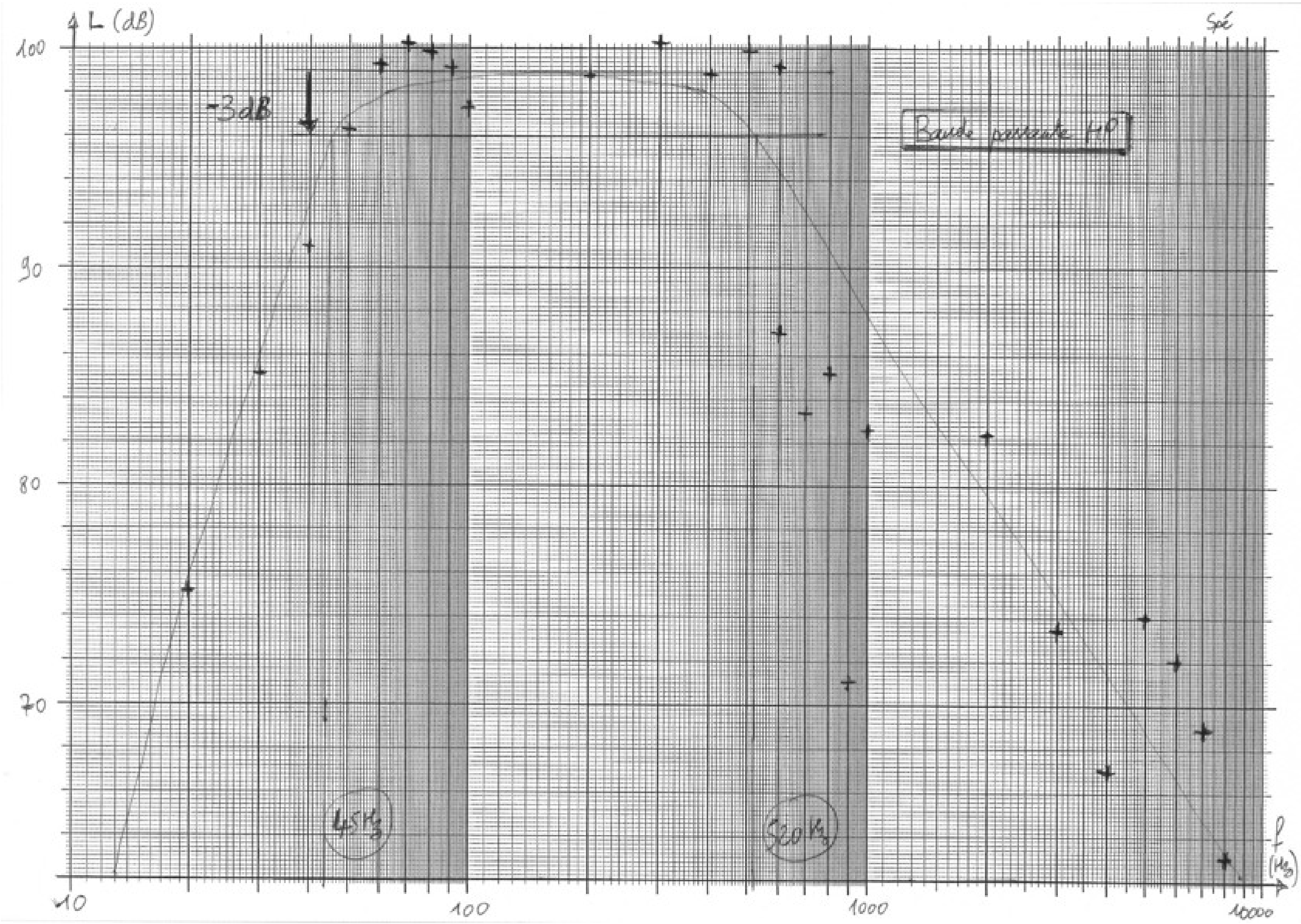
2.3 Excitation sinusoïdale d'une corde tendue

- Vous disposez d'un fil conducteur de 1,00 mètre de longueur, disposé entre deux potences, tendu par une masse de $m = 100$ g. Complétez le circuit électrique en branchant le GBF, sortie amplifiée 8 Ω, en série avec un rhéostat, réglé de façon à avoir *adaptation d'impédance* (résistance fil + rhéostat 8 Ω).
- Rechercher la valeur f_1 de la fréquence du GBF pour laquelle le fil entre en vibration avec un maximum d'amplitude en ne formant qu'un ventre de vibration.
- Augmenter progressivement la fréquence du GBF et noter les valeurs f_i pour lesquelles le fil vibre en formant i ventres de vibration. Mesurer à chaque fois la distance entre deux nœuds consécutifs.
- Recommencer les mesures en modifiant :
  1. la masse m et donc la tension $\overrightarrow{T}$ du fil ;
  2. la longueur L du fil (en utilisant la pince).

j . Vérifier la relation existant entre les valeurs f_i et f_1, fréquence du fondamental.

k. Quelle relation existe-t-il entre le nombre de ventres de vibration et la longueur de la corde ?

3 Correction du TP de la séance n° 2



4 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).

5 Correction des exercices de la séance n° 2

2.1 N° 1 p. 80 – Nuisance

Exercice résolu dans votre livre.

2.2 N° 2 p. 82 – Surfeur

L'exostose, la maladie du surfeur, est une maladie qui se caractérise par l'apparition d'os dans le conduit auditif externe. La croissance de ces os est favorisée par le contact répété avec l'eau.

L'examen audiométrique de la patiente met en évidence une perte d'audibilité pour toutes les fréquences testées, mais d'autant plus forte que les sons ont une fréquence élevée (supérieure à 1000 Hz). Sa perte est supérieure à celle rencontrée par moins de 10 % de la population féminine de son âge : elle fait donc partie des personnes les plus atteintes dans la population. On peut considérer que, dans la gamme 1000–4000 Hz, elle est atteinte de surdité légère et de surdité modérée (perte comprise entre 40 et 70 dB) pour des sons de fréquences supérieures à 4000 Hz.

Un examen audiométrique à la suite d'une opération de l'exostose pourrait montrer une amélioration de l'audition si l'exostose est responsable de sa surdité, ou aucune amélioration si l'exostose n'est pas le facteur de surdité.

2.3 N° 7 p. 86 – Remplacement

Problème 1

1. On capte le son d'un haut-parleur avec un microphone, branché sur une interface d'acquisition, et on mesure la période du signal obtenu (ou on effectue la transformée de Fourier du signal pour obtenir son spectre et ainsi mesurer la fréquence du fondamental).

2. Sur la courbe donnant la bande passante du haut-parleur (document 2), on effectue la lecture graphique du niveau sonore L émis pour $f = 2000$ Hz : $L = 100$ dB.

On calcule l'intensité sonore I correspondante :

$$L = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \quad \Leftrightarrow \quad I = I_0 10^{\frac{L}{10}}$$

$$I = 1,0 \times 10^{-12} \times 10^{\frac{100}{10}}$$

$$I = 1{,}0\times10^{-2}\ \mathrm{W \cdot m^{-2}}$$

Sur le document 3, donnant les seuils d'audibilité, on effectue la lecture graphique du niveau sonore minimal $L_{\min}$ pour cette même fréquence $f = 2000$ Hz : $L_{\min} = 0$ dB.

On en déduit l'intensité sonore minimale $I_{\min}$:

$$I_{\min} = I_0 10^{\frac{L_{\min}}{10}}$$

$$I_{\min} = 1,0 \times 10^{-12} \times 10^{\frac{0}{10}}$$
$$I_{\min} = 1{,}0\times10^{-12}\ \mathrm{W \cdot m^{-2}}$$

Pour une même puissance $\mathcal{P}$ émise par le haut-parleur :

$$I = \frac{\mathcal{P}}{S} \quad \Leftrightarrow \quad \mathcal{P} = IS = 4\pi I d^2$$

Entre la distance $d = 1$ m et la distance $d_{\max}$ à partir de laquelle on n'entends plus rien, on a l'égalité :

$$\mathcal{P} = 4\pi I d^2 = 4\pi I_{\min} d_{\max}^2$$

$$\Rightarrow \quad d_{\max} = \sqrt{\frac{4\pi I d^2}{4\pi I_{\min}}} = d\sqrt{\frac{I}{I_{\min}}}$$

Application numérique :

$$d_{\max} = 1 \times \sqrt{\frac{1,0 \times 10^{-2}}{1,0 \times 10^{-12}}} = 1{,}0\times10^{5}\ \mathrm{m}$$

c'est-à-dire 100 km. C'est une valeur théorique, le son est atténué par d'autres facteurs : obstacles, effet du vent, etc.

Problème 2

1. On a déjà calculé l'intensité sonore émise par le haut-parleur :

$$I = 1{,}0\times10^{-2}\ \mathrm{W\cdot m^{-2}}$$

On peut calculer la puissance sonore émise :

$$\mathcal{P} = IS = 4\pi I d^2 = 0{,}13\ \mathrm{W}$$

Le rendement est par définition le rapport de ce qui est « apporté » par ce qui est « récupéré », donc ici la puissance sonore divisée par la puissance électrique :

$$\eta = \frac{\mathcal{P}}{\mathcal{P}_{\text{élec}}} = \frac{0,13}{30} = 0,0043 = 0,43\,\%$$

On remarque que le rendement d'un haut-parleur est faible.

2. Le haut-parleur nº 2 a une bande passante bien plus étroite que le haut-parleur nº 1 ; il ne peut pas le remplacer pour tous les usages, en particulier, pour émettre des sons de fréquence inférieure à 200 Hz.

6 Exercices (pour la séance nº 4)

3.1 **Mots-clefs** Donner une définition pour chacun des mots-clefs suivants :

Instrument de musique ; Mode propre ; Fréquence propre ; Quantification ; Fondamental ; Harmoniques ; Ventre ; Nœud.

3.2 **Modes de vibration d'une guitare** 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 ?

3.3 **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.

3.4 **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 ?

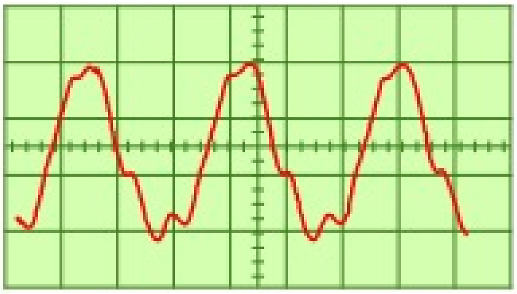
d. La fréquence du son émis est celle de l'un des modes propres de la corde. Lequel ?

3.5 **Nº 1 p. 100 – Techniques de jeu au violoncelle**

3.6 **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 ?