DU « BANG » D'UN AVION AU CLAQUEMENT D'UN COUP DE FOUET

Document 1 : Passage du mur du son par un avion

Lorsqu'un avion vole en vitesse subsonique (vitesse inférieure à la célérité du son dans l'air), il crée des ondes dites de pression qui se propagent à la célérité du son (**figure 1**). Lorsqu'il accroît sa vitesse et qu'il atteint la célérité du son, les ondes de pression s'accumulent devant le nez de l'avion (**figure 2**). Lorsqu'il dépasse la célérité du son (on dit qu'il passe le mur du son), il se produit alors des ondes de compression et de dilatation qui provoquent ce fameux « bang » perceptible à plusieurs dizaines de kilomètres à la ronde. Pour une vitesse supérieure à la célérité du son, les ondes se propagent derrière l'avion dans un cône appelé cône de Mach (**figure 3**).

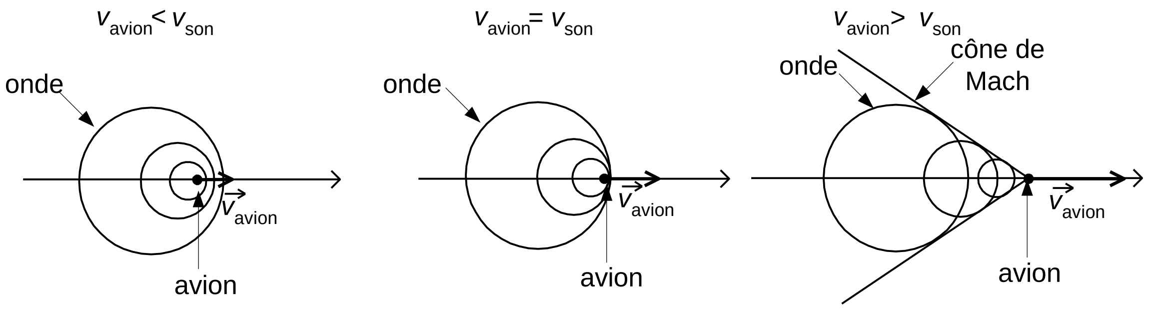


Figure 1 **Figure 2** **Figure 3**

Aussi incroyable que cela puisse paraître, c'est le même phénomène de passage du mur du son qui explique le claquement produit par un coup de fouet.

Document 2 : Claquement d'un coup de fouet et simulation de la perturbation le long de la lanière du fouet

La lanière du fouet a une longueur L = 3,0 m.

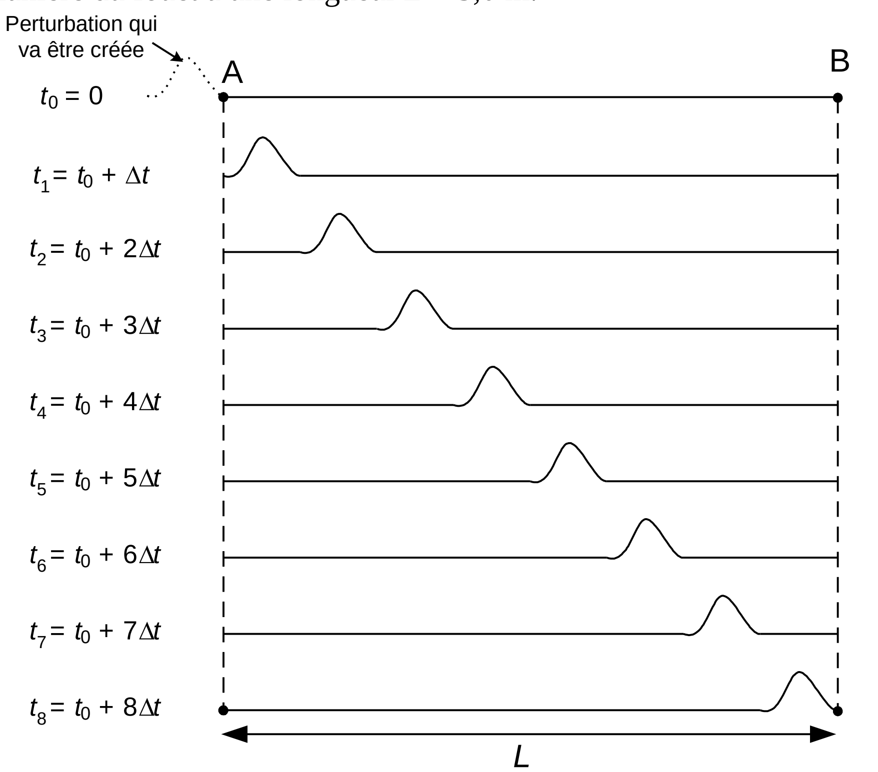


Figure 4. Propagation de la perturbation le long de la lanière

Document 3 : Enregistrement de la mèche du fouet avec une caméra ultrarapide

On enregistre le mouvement de la mèche du fouet avec une caméra ultra-rapide. La fréquence de prise de vue est de 4000 images par seconde. Entre deux images successives, la mèche, du fait de la propagation de la vibration, se déplace d'une distance d = 11 cm (voir **figure 5**).

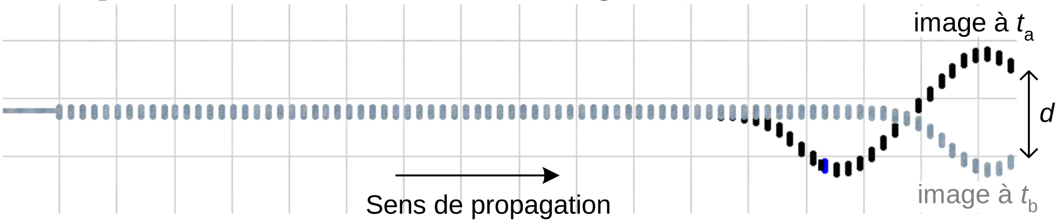


Figure 5. Positions de la mèche du fouet à deux instants ta et tb

1. Partie I : Étude de la propagation des ondes sonores dans l'air

1.1. Quelques caractéristiques des ondes sonores

1.1.1. Pourquoi peut-on dire qu'il s'agit d'ondes mécaniques ?

1.1.2. Choisir la (ou les) bonne(s) caractéristique(s) qui qualifie(nt) une onde sonore, en expliquant la signification des caractéristiques choisies :

a) progressive b) tridimensionnelle c) transversale d) longitudinale

1.1.3. Choisir dans la liste le (ou les) « milieu(x) » dans lequel le son ne se propage pas :

a) acier b) béton c) vide d) eau

1.2. Ondes sonores produites par un avion

Un avion vole à la vitesse v_{avion} = 800 km.h^{-1} à une altitude d'environ 10 km. On veut savoir s'il se déplace à une vitesse supérieure à la célérité du son sachant que cette dernière dépend de la température.

1.2.1. La célérité du son peut se calculer en première approximation par la relation

$$v_{son}(\theta) = v_{son}(0°C) \times \sqrt{1 + \frac{\theta}{273}}$$

avec θ la température en degré Celsius et v_{son} (0°C) = $3{,}3\times10^2$ m.s^{-1}.

Calculer la célérité des ondes sonores à l'altitude de 10 km en considérant que la température θ de l'air vaut - 50°C.

1.2.2. Comparer cette valeur avec la vitesse de l'avion. Celui-ci a-t-il passé le mur du son ?

2. Partie II : Le claquement d'un coup de fouet

Un artiste de cirque veut faire claquer son fouet ; pour ce faire, il génère, d'un mouvement de poignet, un ébranlement qui se déplace à la célérité v le long de la lanière en cuir du fouet.

2.1. Cette célérité v dépend de la tension F de la lanière et de sa masse linéique μ (masse par unité de longueur) suivant la relation $v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$.

Montrer, par une analyse dimensionnelle, l'homogénéité de cette relation.

2.2. On simule à l'aide d'un logiciel la propagation de la perturbation le long de la lanière et on obtient la position de l'ébranlement à différentes dates séparées d'un intervalle de temps $\Delta t = 3{,}5 \times 10^{-2}$ s (voir **figure 4 du document 2**).

2.2.1. Calculer la durée τ mise par l'onde pour parcourir toute la lanière.

2.2.2. En déduire la valeur de la célérité v de l'onde.

2.2.3. En réalité, la section de la lanière du fouet diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la poignée ; la masse linéique μ diminue donc. Si on suppose que la tension F est constante, comment évolue la célérité de l'onde le long de la lanière, de la poignée à son extrémité ?

2.3. On s'intéresse maintenant à la vitesse de déplacement transversal de la mèche qui correspond à l'extrémité du fouet.

En déduire la vitesse v*'* de déplacement de la mèche. Dans ces conditions, le mur du son a-t-il été passé par la mèche ?

Donnée **:** célérité du son dans l'air à 20°C : $v_{son} = 340\ m.s^{-1}$

LE DIDJÉRIDOO, INSTRUMENT DE MUSIQUE TRADITIONNEL (4 points)

Document 1 : Le didjéridoo

La Cité de la musique, à Paris, a consacré au mois de novembre 2005 un cycle à l'Australie, en fait, à une partie septentrionale du pays, le « bout d'en haut », territoire actuel des aborigènes.

La vedette en était le didjéridoo, une trompe en bois d'eucalyptus (assez droite), évidée par les termites. Longue de plus d'un mètre, elle est devenue emblématique de ce peuple. Cet instrument de musique, qui pourrait être le plus ancien en activité, est joué en expirant par la bouche et en inspirant par le nez (respiration circulaire). Et il se charge de tout : rythmes et harmonies.

D'après « Le Monde » du 29 novembre 2005.

Document 2 : Comment jouer du didjéridoo ?

La technique utilisée pour jouer du didjéridoo est unique en comparaison de celle des autres instruments à vent. Il faut souffler dans le tube, les lèvres desserrées, pour créer un son : le bourdon qui est le son de base du didjéridoo. En jouant avec les joues comprimées et la langue à l'avant de la bouche, un grand nombre de didjéridoos donneront un son comportant une variété d'harmoniques subtiles qui ajoute couleur et richesse à l'effet d'ensemble.

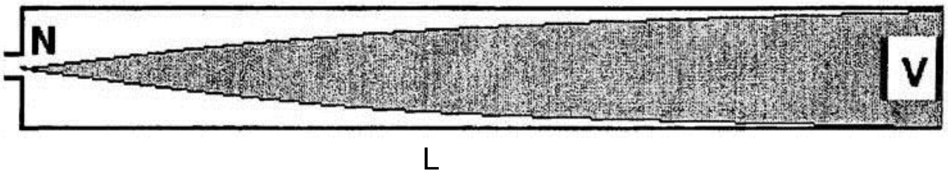
Document 3 : Mode fondamental de vibration du didjéridoo ?

Lorsqu'une onde stationnaire s'établit dans un tuyau sonore, on observe un nœud (N) de vibration à une extrémité si cette extrémité est fermée, et un ventre (V) de vibration si cette extrémité est ouverte.

En simplifiant, on peut représenter le didjéridoo comme un tuyau sonore de longueur L fermé à une extrémité et ouvert à l'autre.

Pour le mode fondamental de vibration, les positions du ventre et du nœud sont données sur la figure n°1 ci-dessous, schématisant l'amplitude de la vibration sonore.

Figure n°1



Document 4 : Enregistrement du son de base (son 1 ; le bourdon)

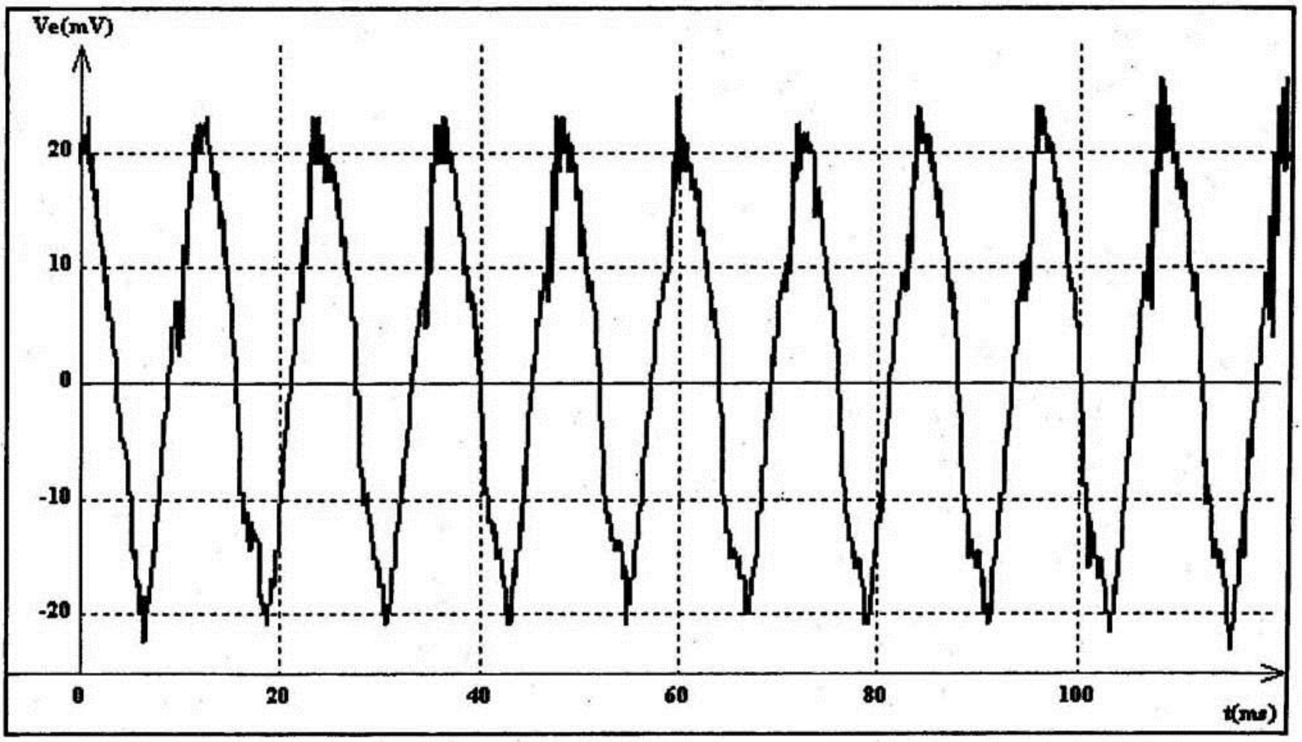


Figure n°2a – Enregistrement du son 1

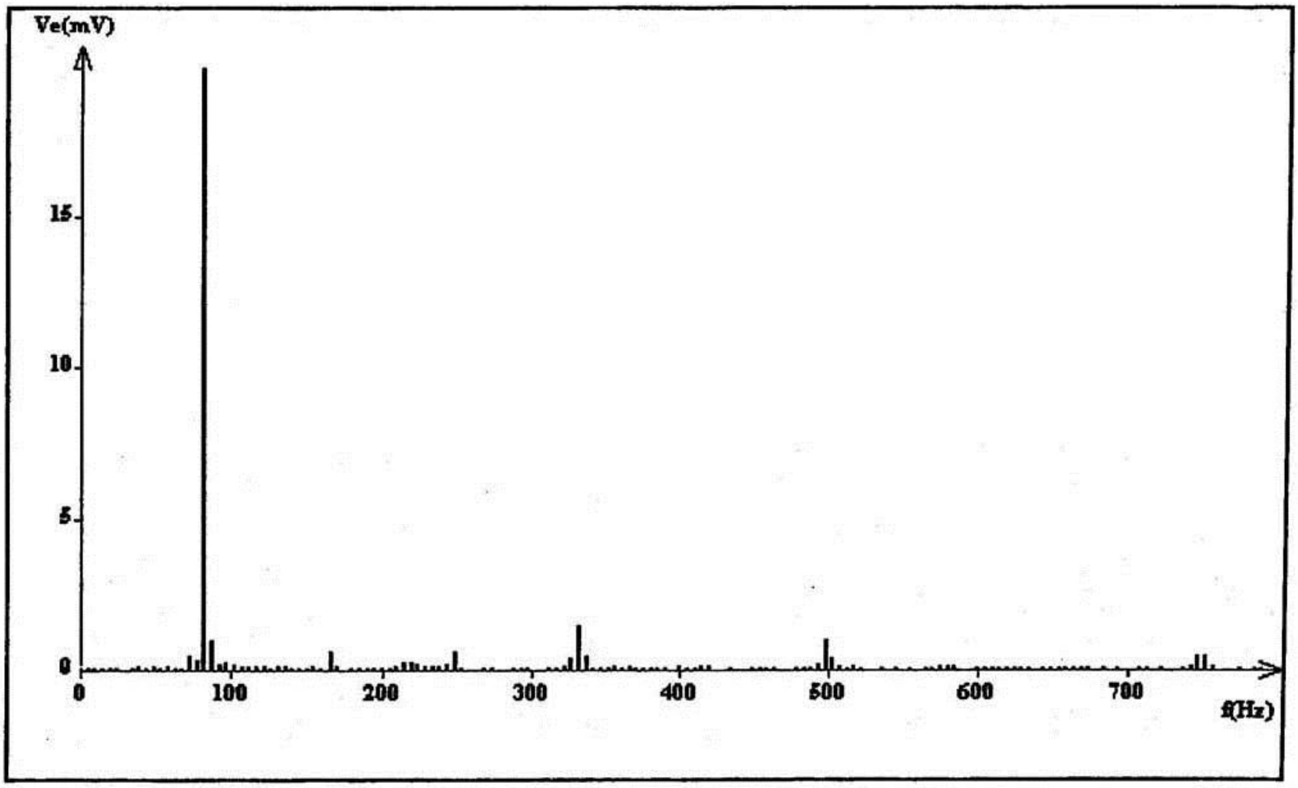


Figure n°2b – Analyse spectrale du son 1

Document 5 : Enregistrement d'un autre son (son 2)

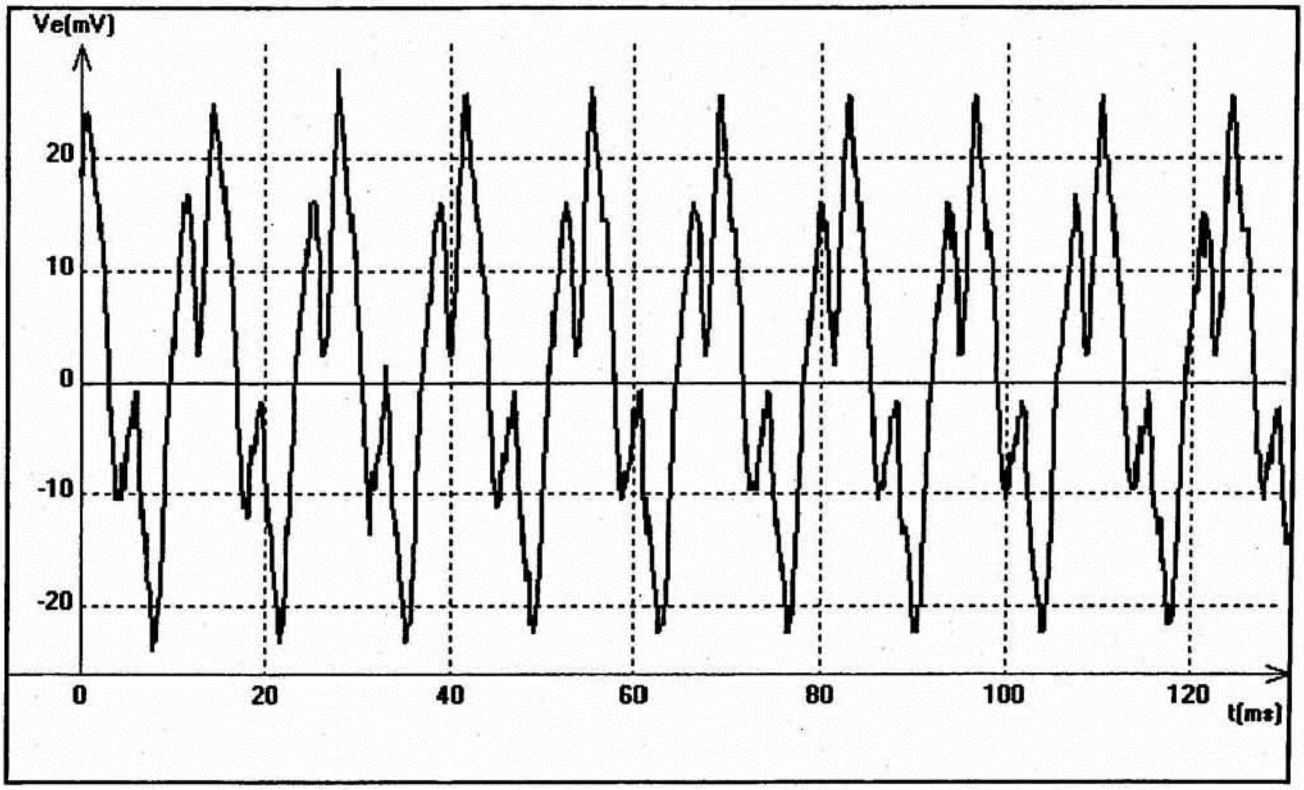


Figure n°3a – Enregistrement du son 2

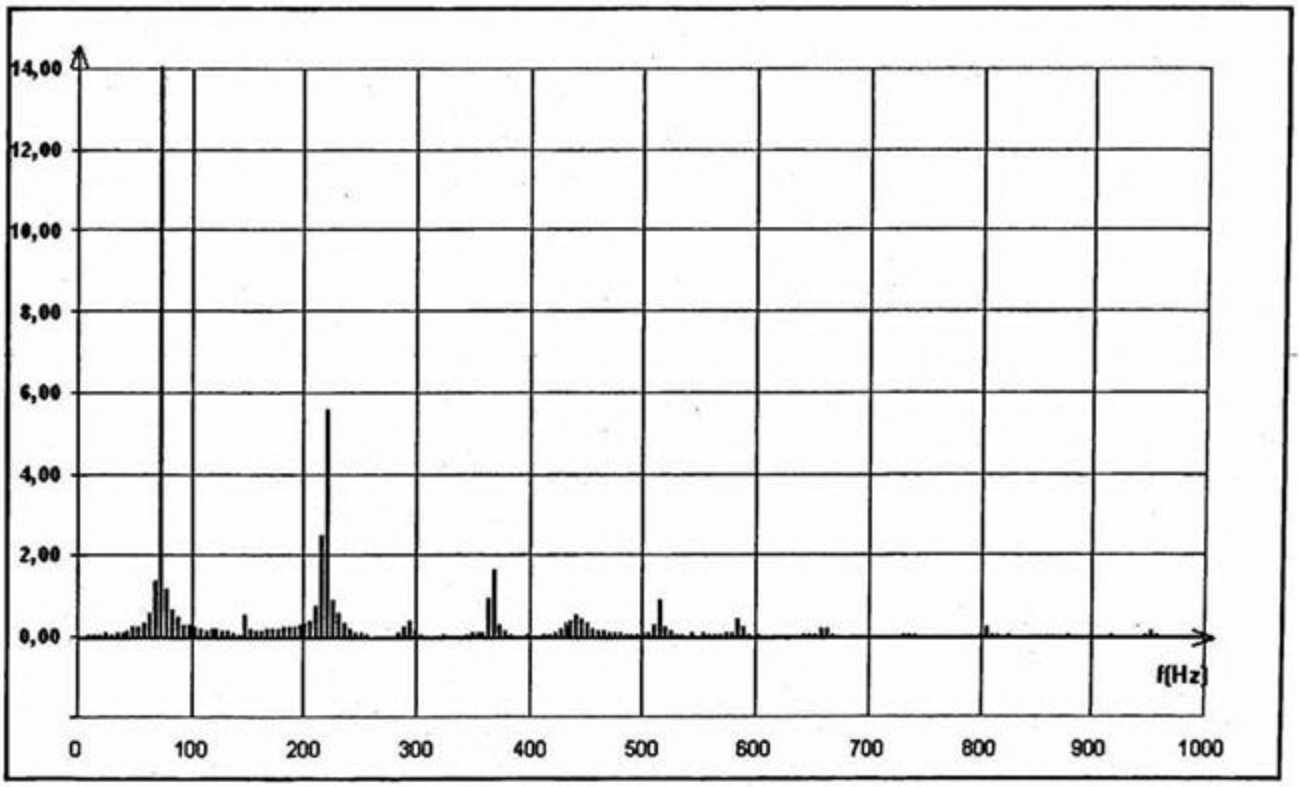


Figure n°3b – Analyse spectrale du son 2

Document 6 : Niveau sonore

On rappelle que le niveau sonore L_S est donné par la relation : $L_S = 10\log\frac{I}{I_0}$ où I_0 représente l'intensité sonore de référence égale à 10^{-12} W.m^{-2}.

Donnée **:** célérité du son dans l'air : $v = 340$ m.s^{-1}.

On va utiliser deux didjéridoos : Le premier (A) est utilisé pour jouer le bourdon (son 1), le second (B) est utilisé pour obtenir le son 2.

1. Partie I : Étude du didjéridoo (A) donnant le bourdon

1.1. Les ondes sonores sont-elles des ondes transversales ou longitudinales ? Justifier.

1.2. Exprimer la longueur d'onde λ_1, en fonction de la longueur L du tuyau. Justifier.

1.3. En déduire que la fréquence f_1 du mode fondamental s'écrit : $f_1 = \frac{v}{4L}$.

1.4. Un enregistrement du son de base (son 1) d'un didjéridoo (le bourdon) donne l'oscillogramme représenté sur la figure n°2a.

1.4.1. Déterminer à partir de cet oscillogramme la fréquence f_1 du mode fondamental. La hauteur de ce son correspond-elle à un son grave ou à un son aigu ?

1.4.2. En déduire la longueur L du didjéridoo utilisé.

1.5. Quelle devrait être la longueur minimale d'un tuyau ouvert aux deux extrémités (type flûte) pour donner une note de même hauteur ?

2. Partie II : Étude du didjéridoo (B) donnant le son 2

Avec un second didjéridoo (B) de longueur différente L', on enregistre un son dont l'oscillogramme est représenté sur la figure n°3a et son spectre sur la figure n°3b.

2.1. En utilisant l'enregistrement de la figure n°3a, déterminer la fréquence f'_1 du mode fondamental.

2.2. Comparer la longueur L' de ce second instrument à la longueur L du premier.

2.3. En comparant les spectres représentés sur les figures n°2b et 3b, indiquer la technique utilisée par l'instrumentiste dans chacun des deux cas.

2.4. Sur le spectre de la figure n°3b, déterminer le rang n de l'harmonique ayant la plus grande amplitude après le fondamental.

2.4.1. Sur un schéma analogue à celui de la figure n°1, représenter les nœuds et les ventres de vibration correspondant à l'harmonique déterminée à la question 2.4. Exprimer la longueur L en fonction de la longueur d'onde de cet harmonique.

2.4.2. Il existe une relation entre la longueur L du didjéridoo et le rang n de l'harmonique. En utilisant les données et les résultats de la première partie, choisir, parmi les relations suivantes, celle qui convient :

(1) $L = \frac{2n-1}{2}\lambda_n$ **(2)** $L = \frac{2n-1}{4}\lambda_n$ **(3)** $L = \frac{n}{4}\lambda_n$ **(4)** $L = \frac{4}{n}\lambda_n$ avec $n \in \mathbb{N}^*$

3. Partie III : Concert avec les deux didjéridoos

Un « concert » est donné avec deux didjéridoos. Placés à 2 m des musiciens, on mesure le niveau sonore L_S (en décibel acoustique) produit successivement par chacun des deux instruments précédents ; on note : L_{S1} = 72 dB et L_{S2} = 75 dB.

3.1. Déterminer les intensités sonores I_1 et I_2 émises respectivement par chacun des instruments à la distance d = 2 m.

3.2. On admet que lorsque deux sons sont émis simultanément, l'intensité sonore résultante I est la somme des deux intensités sonores. En déduire le niveau sonore L_S perçu à 2 m dans ce cas.

VIOLONS ET ERHU EN CONCERT

Document 1 : Violon et diapason

La figure 1 ci-après représente les enregistrements réalisés dans les mêmes conditions, de sons de fréquence f_1 = 440 Hz (La_3) émis par un violon d'une part et par un diapason d'autre part.

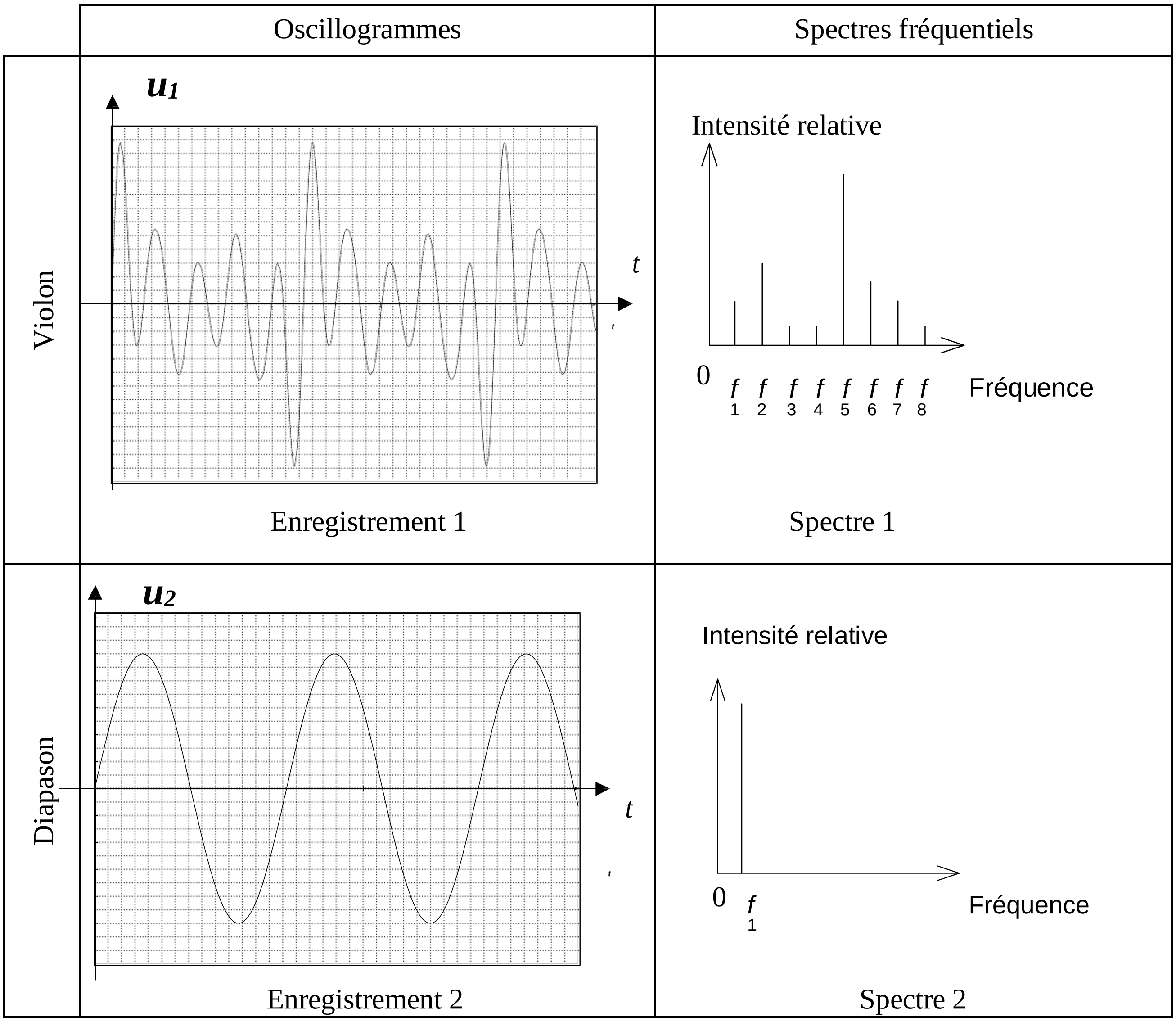


Figure 1 - Enregistrements et spectres fréquentiels de deux émetteurs sonores.

Document 2 : Les battements

Avant le concert, les violonistes cherchent à accorder leur instrument en jouant la note la_3 de fréquence égale à 440 Hz. La fréquence émise par chaque instrument n'étant pas rigoureusement égale à 440Hz, le son résultant est alternativement plus ou moins intense : on entend des battements qui sont des variations

périodiques de l'amplitude sonore. Pour rendre compte de ce phénomène, on simule à l'aide d'un ordinateur des signaux dont les fréquences f_a (courbe 1 de la **figure 2)** et f_b (courbe 2 de la **figure 2**) diffèrent légèrement: f_a = 420Hz et f_b = 460Hz.
Ensuite, on effectue l'addition de ces deux signaux (courbe 3 de la **figure 2**). Les courbes obtenues sont rassemblées **figure** 2 ci-après.

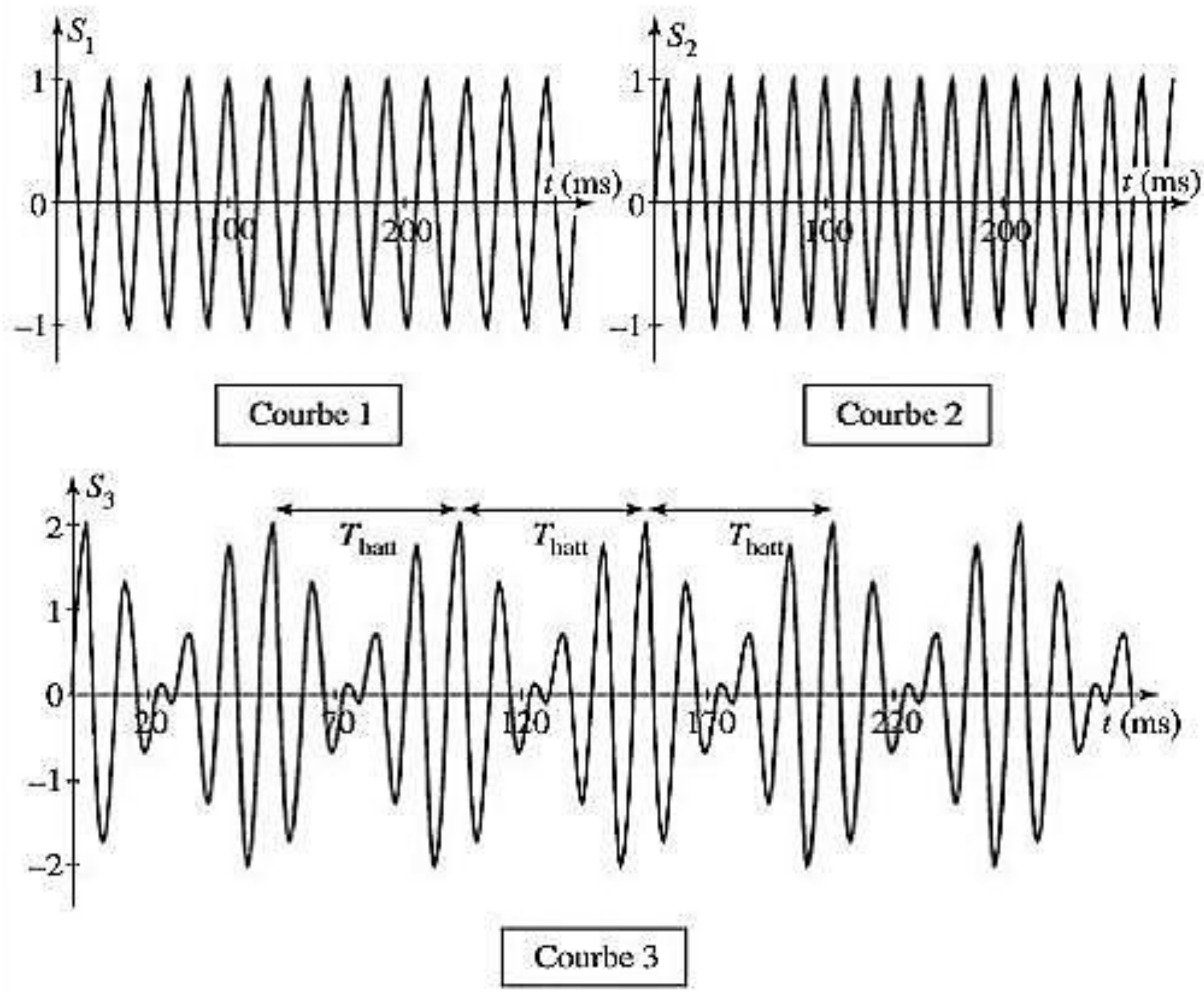


Figure 2 - Courbes simulant les signaux sonores

Document 3 : Niveau sonore et intensité

Le niveau sonore, exprimé en décibels (dB), d'une source sonore est donné par la formule :

$$L_1 = 10 \log \left(\frac{I}{I_0}\right)$$

Avec : I_0 l'intensité de référence correspondant à l'intensité minimale audible ($I_0 = 1{,}0.10^{-12}$ W.m^{-2}) et I_1 l'intensité sonore donnée par une source sonore en W.m^{-2}.

Soit pour n sources sonores : $$L_n = 10 \log \left(\frac{n - I_1}{I_0}\right)$$

On rappelle : log (a×b) = log a + log b.

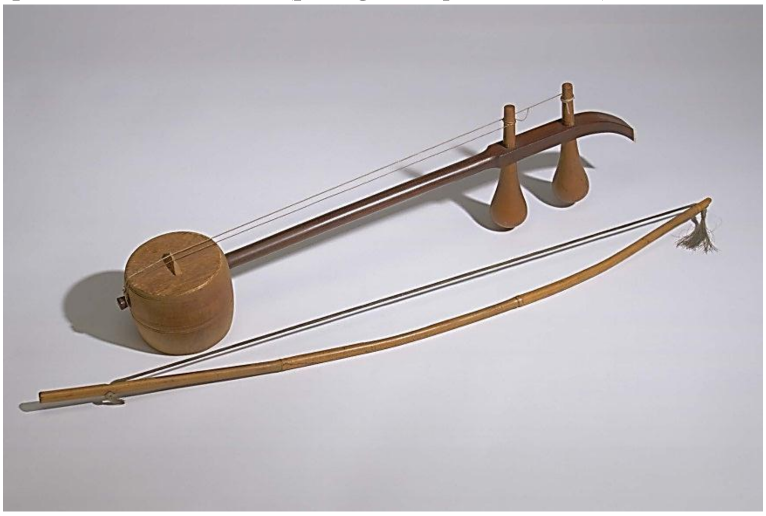
Document 4 : L'octave

L'octave entre deux notes, obtenue historiquement en divisant la longueur d'une corde d'instrument par deux, pour obtenir ainsi une fréquence double, est devenue le support des gammes en musique.

Dans la gamme dite tempérée, l'octave est divisée en douze intervalles de fréquences appelés demi-tons, tels que le rapport des fréquences de deux notes successives soit le même.
Si on note f_1, f_2, ... f_i, f_{i+1}, ..., f_{13} les fréquences successives séparées par un demi-ton, on obtient $\frac{f_{13}}{f_1} = 2$ par définition de l'octave.

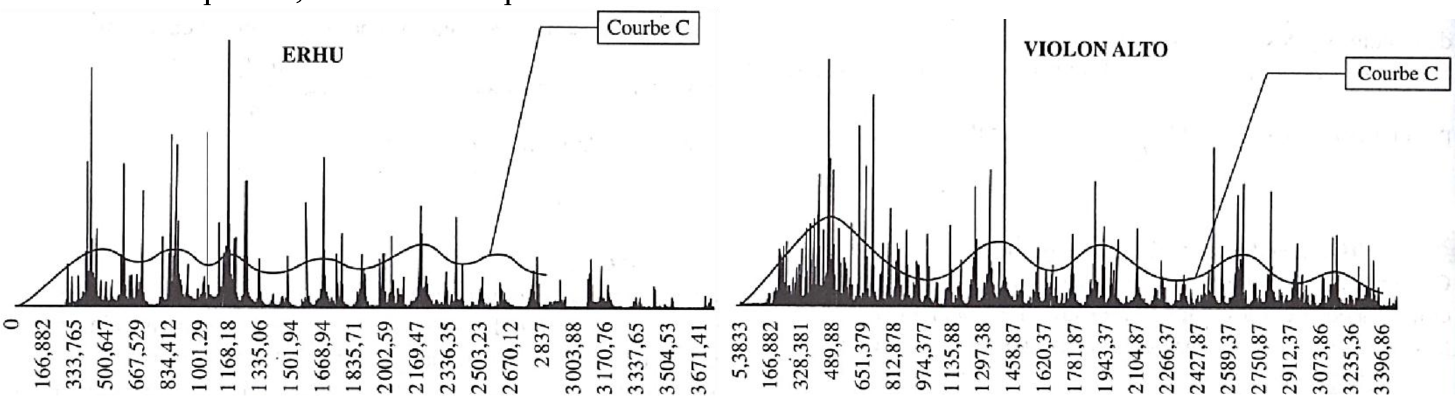
Document 5 : Erhu et violon alto, timbres comparés

Certains accompagnements modernes ajoutent un erhu, « violon » chinois à deux cordes, dans l'orchestre. Il est intéressant de comparer le son de l'alto (plus grave que le violon) et le son de l'erhu.



On propose ci-dessous deux graphes d'analyse spectrale, comportant, pour chaque instrument :

- Le spectre des amplitudes en fonction de la fréquence ;
- Une courbe C évaluant l'amplitude moyenne dans le spectre, en fonction de la fréquence, avec des attaques variées.



http://triangular.stormloader.com/erhu.html

Avant de débuter un concert, les instrumentistes doivent accorder leurs instruments. Le chef d'orchestre dispose de repères techniques simples mais efficaces pour vérifier la justesse des sons émis par l'orchestre
L'objet de cet exercice porte sur l'étude des sons émis par des violons, la vérification de l'accord entre deux violons et la participation du chef d'orchestre à ces réglages.

Pour tout l'exercice, on considère la célérité v du son dans l'air, à 20°C, égale à 340 $m.s^{-1}$.

1. Partie I : Violon et diapason

1.1. Parmi les caractéristiques physiques d'un son musical figurent la hauteur et le timbre. En analysant les deux oscillogrammes de la **figure 1**, préciser la caractéristique qui différencie les sons des deux émetteurs.

1.2. Quel nom donne-t-on à la fréquence f_1 ?

1.3. Calculer les valeurs des fréquences f_2 et $f3$ présentent dans le spectre fréquentiel du violon.

2. Partie II : Les battements

2.1. La période des variations d'amplitude, appelées battements, est notée T_{batt} (courbe 3 de la **figure 2**). On souhaite vérifier que $f_{\text{batt}} = \frac{1}{T_{batt}} = \frac{f_b - f_a}{2}$. Pour cela, déterminer la valeur f_{batt} à partir de la courbe 3 et la comparer à celle de $\frac{f_b - f_a}{2}$.

2.2. Lorsque le musicien constate l'arrêt des battements, que peut-il en conclure ?

3. Partie III : Niveau sonore et intensité

Au début du concert, un groupe musical comportant dix violons se produit.

3.1. Vérifier que le niveau sonore minimal perceptible est de 0 dB.

3.2. On estime à 70 dB le niveau sonore produit par un seul violon à 5 m. Calculer le niveau sonore produit par le groupe musical. On considère que tous les violons sont à 5 m de l'auditeur.

3.3. L'exposition à une intensité sonore $I = 1{,}0 \times 10^{-1}$ W.m^{-2} peut endommager l'oreille de l'auditeur. Combien de violons doivent jouer pour atteindre cette intensité pour un auditeur situé à 5 m ? Conclure.

4. Partie IV : Conduite d'un orchestre à l'oreille

4.1. Vérifier que, pour deux fréquences successives f_i et f_{i+1} séparées par un demi-ton, le rapport constant des deux fréquences $\frac{f_{i+1}}{f_i}$ est égal à $2^{\frac{1}{12}}$.

4.2. Un chef d'orchestre dispose de capacités auditives développées qui lui permettent de distinguer et de reconnaître précisément les notes, et en particulier la note *la* $_3$ et la note *si*$_3$ située deux demi-tons au-dessus.

Calculer la fréquence de la note *si*$_3$ sachant que celle du *la*$_3$ est égale à 440 Hz.

5. Partie V : Erhu et violon alto

5.1. Commenter le nombre de chiffres indiqués pour les fréquences (abscisses).

5.2. Recopier et compléter par le calcul le tableau de fréquences ci-dessous :

Fréquences (Hz)	Fondamental f_1	$f_2 = 2 \cdot f_1$	$f_3 = 3 \cdot f_1$	$f_4 = 4 \cdot f_1$	$f_5 = 5 \cdot f_1$
Erhu					2169,47
Violon	489,98				

Comment les fréquences de ce tableau apparaissent-elles sur les enregistrements du **document 5**, notamment sur les courbes C ? En particulier, comparer l'importance de l'harmonique 2 dans chacun des deux instruments.