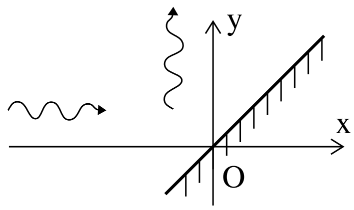
ONDES

I. Réflexion d'une onde sonore sur un mur

On s'intéresse aux phénomènes acoustiques dans une salle de concert. On considère une onde acoustique plane se propageant dans l'air selon $\vec{u}_x$ à la vitesse c. On note $p_i(x,t)$ la surpression associée à cette onde (c'est-à-dire l'écart de pression du à la perturbation par rapport à l'état de repos de l'air). On suppose que l'onde est sinusoïdale de pulsation ω et d'amplitude P_0.

L'onde se propage en direction d'un mur oblique qui est orienté selon la première bissectrice du plan (à 45° de chaque axe, cf schéma ci-contre), et qui passe par l'origine O du plan Oxy. Cet obstacle induit une onde réfléchie sinusoïdale et de même pulsation, qui se propage selon $\vec{u}_y$. On la notera $p_r(y,t)$. La réflexion étant supposée parfaite (sans absorption), l'amplitude de l'onde réfléchie est égale à celle de l'onde incidente.



1. a) Donner la forme explicite de la surpression $p_i(x,t)$. On choisira une phase nulle à l'origine $(x,t) = (0,0)$, et on introduira le *nombre d'onde angulaire* k après avoir rappelé sa définition. Comment s'écrit le *vecteur d'onde* $\vec{k}_i$ de cette onde ?

   b) Dessiner les plans d'onde qui correspondent à une phase égale à 0 $[2\pi]$ à l'instant initial $t = 0$. Indiquer la distance qui les sépare en fonction de ω et c.

2. a) On admet que sur le mur, l'onde réfléchie est en phase avec l'onde incidente. Donner la forme explicite de la surpression $p_r(y,t)$.
   Comment s'écrit le vecteur d'onde $\vec{k}_r$ de l'onde réfléchie ?

   b) Dessiner les plans d'onde qui correspondent à une phase égale à 0 $[2\pi]$ à l'instant initial $t = 0$.

3. a) Donner la forme explicite de la surpression totale $p(x,y,t)$.

   b) Montrer qu'il existe des surfaces de l'espace où l'on entend aucun son. Indiquer la forme de ces régions et leur équation. Les représenter sur le schéma.

   c) Calculer la distance d entre deux de ces surfaces consécutives, qu'on exprimera en fonction de la longueur d'onde λ de l'onde incidente.

   d) On suppose que l'onde incidente correspond au mode fondamental d'un La_3 ($f = 440\,\mathrm{Hz}$) joué par un musicien. Evaluer numériquement la distance d. Commenter.

Donnée : Célérité du son dans l'air dans les conditions de l'expérience, $c = 340\,\mathrm{ms^{-1}}$.

II. Ondes sonores dans un didjéridoo

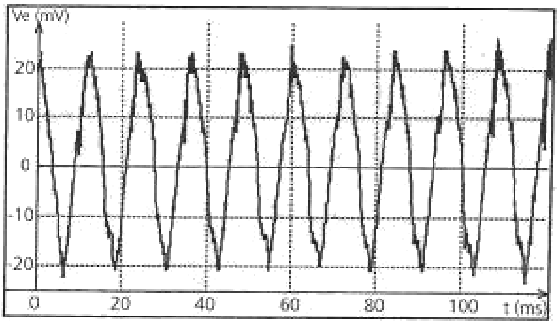
Le son de base du didjéridoo, appelé le *bourdon*, est obtenu avec les lèvres desserées. En comprimant les joues et en avançant la langue, on peut en modifier le timbre en l'enrichissant de nouvelles harmoniques.

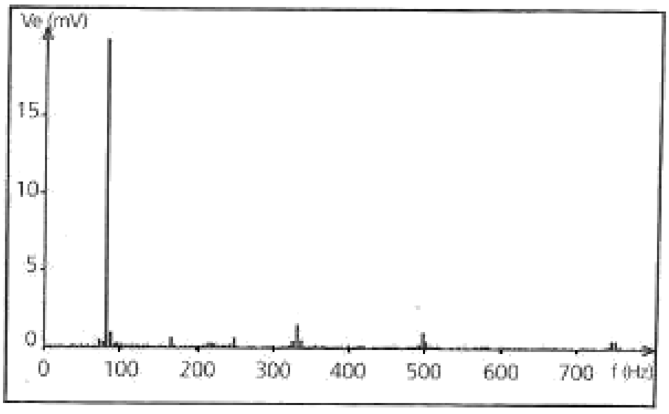
Lorsqu'une onde stationnaire s'établit dans un tuyau sonore, on observe un noeud (N) de vibration à une extrémité si cette extrémité est fermée, et un ventre (V) de vibration si cette extrémité est ouverte. En simplifiant, on peut représenter le didjéridoo comme un tuyau sonore de longueur L fermé à une extrémité (côté bouche, gauche par convention) et ouvert à l'autre (côté droit).
Pour le mode fondamental de vibration, un unique noeud est situé au niveau de l'extrémité gauche, et un unique ventre est situé au niveau de l'extrémité droite.

Donnée : Célérité du son dans l'air dans les conditions de l'expérience, $c = 340\,\mathrm{ms^{-1}}$.

1. Comment qualifie-t-on les ondes qui se forment à l'intérieur de l'instrument ?
2. Schématiser le didjéridoo en positionnant le ventre et le noeud dans le mode fondamental. Exprimer la longueur d'onde du mode fondamental λ_1 en fonction de la longueur L du didjéridoo.

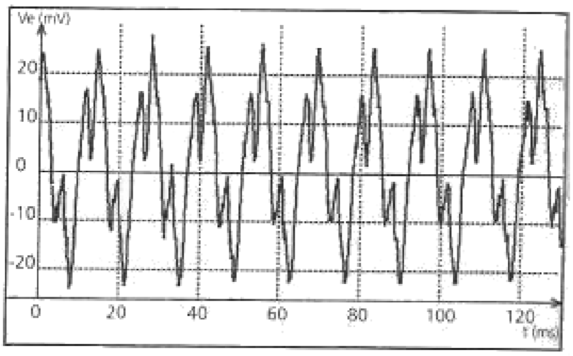
3. En déduire la fréquence f_1 du mode fondamental.
4. Un enregistrement du son de base d'un didjéridoo (le bourdon) donne l'oscillogramme ci-dessous, dont on donne aussi le spectre (en amplitude).

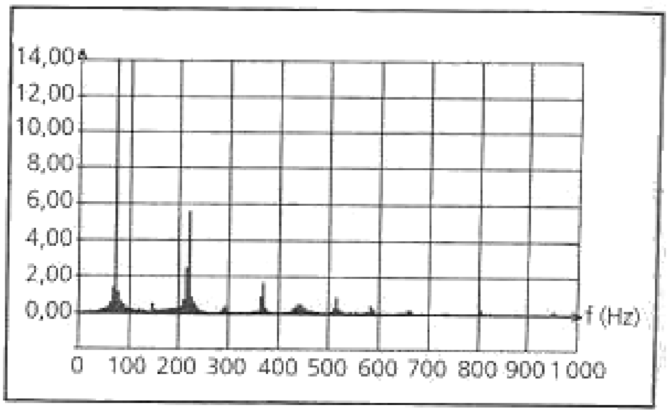




   a) Déterminer à partir de cet oscillogramme la fréquence f_1 du mode fondamental. La hauteur de ce son correspond-elle à un son grâve ou à un son aigu ?
   b) En déduire la longueur L du didjéridoo utilisé.
5. Quelle devrait être la longueur minimale d'un tuyau ouvert aux deux extrémités (type flûte) pour donner une note de même hauteur ?

Avec un second didjéridoo de longueur différente L', on enregistre un son dont l'oscillogramme et le spectre sont représentés ci-dessous.





6. Déterminer la fréquence f'_1 du mode fondamental.
7. Comparer la longueur L' de ce second instrument à la longueur L du premier.
8. Déterminer le rang n de l'harmonique ayant la plus grande amplitude après le fondamental.
9. Représenter les noeuds et les ventres de vibration correspondant à l'harmonique déterminé à la question précédente. Exprimer la longueur L' en fonction de la longueur d'onde λ_n de cet harmonique.
10. Généraliser cette dernière relation pour n quelconque.

Un concert est donné avec deux didjéridoos. À 2 mètres des musiciens, on mesure le niveau sonore en décibels acoustiques (dB) produit par chacun des deux instruments : $L_{S1} = 72\,\text{dB}$ et $L_{S2} = 75\,\text{dB}$. On rappelle que l'intensité en décibels L_S est reliée à l'intensité de l'onde sonore par

$$L_S = 10 \log \frac{I}{I_0}\,,$$

où $I_0 = 10^{-12}\,\text{W.m}^{-2}$ représente l'intensité sonore de référence (seuil de sensibilité de l'oreille humaine standard).

11. Déterminer les intensités sonores I_1 et I_2 émises par chacun des instruments à la distance $d = 2\,\text{m}$.
12. En déduire l'intensité en décibels L_S perçue à la distance d dans ce cas.