

Les résonateurs de HELMHOLTZ



Ambroise Boyer

Chloé Leblanc

Aymeric Molinier

Lilien Sauvage

École Alsacienne

Équipe U dirigée par Mme Piveteau

Résumé du projet

Notre étude a porté sur la propagation du son dans des objets de la vie de tous les jours. Beaucoup d'objets du quotidien résonnent lorsqu'ils sont excités, notamment par une source sonore. Nous sommes donc partis à la recherche du meilleur résonateur, dit de Helmholtz, pourvu d'une résonance optimale.

Dans une première partie, nous expliquons d'abord ce qu'est un résonateur et quelles sont les caractéristiques qu'on peut lui attribuer. Nous avons ainsi fait plusieurs séries de mesures avec des résonateurs de la vie courante : des canettes, des bouteilles variées et même des boules de Noël.

Dans un deuxième temps, nous avons approfondi notre analyse, ainsi nous avons mesuré la résonance d'un même résonateur en faisant varier son volume interne (par adjonction d'eau). L'étude des mesures permet de déterminer plusieurs paramètres intéressants.

Enfin, nous avons travaillé à la construction de notre propre résonateur et tenté de mettre en évidence l'impact des résonateurs sur la réverbération du son dans un milieu clos comme un module de cartons que nous avons construit.

Table des matières

Introduction	1
1. À la découverte des résonateurs	2
1.A. Qu'est ce qu'un résonateur de Helmholtz ?	2
1.B. Caractérisation du résonateur	2
1.C. Mesurer la réponse du résonateur à n'importe quelle fréquence	3
1.D. Le facteur de qualité	5
1.E. Analyse des résultats	6
2. Étude approfondie de résonateurs	7
2.A. De l'étude des volumes	7
2.B. De l'exploitation des données	9
2.C. Application à la canette	9
3. Jouons avec les résonateurs	10
3.A. Construisons notre résonateur	10
3.B. Réverbération & Résonateur	13
Conclusion	16
Annexes	18
De la géométrie de la canette	18
Protocole pour la mesure du temps de réverbération	19
Incertitudes	20
Couplages de résonateurs	21
Graphiques, images et schémas	23
Bibliographie & Références	24

Introduction

Durant l'Antiquité et ce jusqu'au Moyen-Âge, il était très commun de voir des trous dans les murs des églises. Ces ouvertures n'étaient pas des défauts de construction, mais en fait des cols de vases enfouis dans la maçonnerie des édifices. De nos jours, cette présence de poteries en terre cuite demeure encore inexplicée. Depuis le XIX^{ème} siècle, de nombreuses interprétations d'historiens se sont accumulées pour générer un véritable mystère autour de ces céramiques. Alors que certains archéologues émirent l'idée que ces vases étaient destinés à éviter la craquelure des fresques et enduits, d'autres proposèrent qu'ils aient servi à réguler la température ainsi que l'humidité des églises. Certains allèrent jusqu'à penser que ces vases étaient des réservoirs à lampes à huile, ou bien même des cachettes à trésor. Cependant, l'hypothèse la plus acceptée est que l'utilité de ces céramiques était relative à l'acoustique.



Cette interprétation remonte aux textes de Vitruve, au 1^{er} siècle avant J.-C. Dans son traité *De Architectura*, l'ingénieur romain explique que la fonction de ces vases (échéa) était de transmettre les voix d'acteurs. Placés dans les théâtres, sous les sièges des spectateurs, ils étaient disposés de manière à ce que les sons partants de la scène viennent frapper le fond de chaque vase, se retrouvant ainsi puissamment répercutés. Cependant, l'auteur reconnaît lui-même que les vases n'étaient pas présents dans les murs des théâtres romains et, faute de précisions, on ne sait pas où il en avait aperçu. Notre étude portera donc sur l'observation des phénomènes de la réverbération et comment la présence d'objets de la vie de tous les jours peut influencer la propagation du son. En effet, certains objets peuvent agir comme résonateurs dans des espaces clos.

Après une première partie où nous tenterons d'appréhender le modèle de Helmholtz, de cerner les définitions et principales formules relatives au résonateur, nous tenterons d'en proposer une analyse plus approfondie en déterminant, pour chaque résonateur, ses caractéristiques et propriétés, pour terminer par une étude de l'utilisation ludique que l'on peut faire de ces résonateurs.

1. À la découverte des résonateurs

1.A. Qu'est ce qu'un résonateur de Helmholtz ?

Hermann VON HELMHOLTZ (1821-1894) est à l'origine du tout premier « résonateur de Helmholtz ». Pour extraire les **harmoniques** d'un son total, il imagina des récipients percés d'un orifice et utilisa ces résonateurs pour étudier la complexité des sons et accéder à la décomposition harmonique des sons complexes, grâce à des séries de résonateurs de tailles différentes.

Le résonateur Aujourd'hui, un résonateur est en pratique un dispositif constitué d'une enceinte de volume V (en m^3) terminée par un tube fin de longueur l (en m) et de section s (en m^2). L'air contenu dans l'enceinte peut vibrer sous l'action d'une onde sonore émise à l'entrée du tube. C'est un système résonant, de pulsation propre : celle-ci est relatée par la formule (5). Lorsqu'on excite un résonateur, le volume d'air V qu'il contient entre en surpression, la masse qui le comprime étant l'air contenu dans le col du résonateur. Ce volume d'air qui oscille s'échappe difficilement du fait des dimensions contraignantes du col.

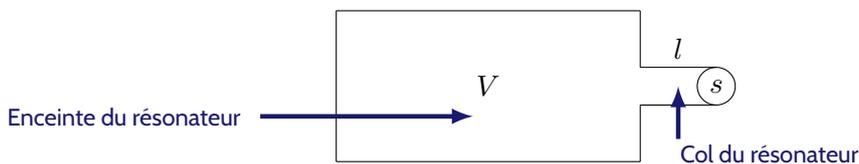


FIGURE 1 – Schéma simplifié d'un résonateur de Helmholtz

1.B. Caractérisation du résonateur

Un modèle simple Le modèle le plus simple est de considérer que l'air situé dans le col oscille en bloc, comme un bouchon qui couliserait. On considère alors le résonateur comme analogue à un **système masse-ressort**. Si l'on note M la masse d'air contenue dans le col, on peut calculer :

$$(1) \quad M = ls\rho$$

où ρ est la **masse volumique de l'air** en *kilogrammes par mètre cube*, l la **longueur du col** en *mètres* et s la **section du col** (c'est à dire l'aire d'une tranche du col) en *mètres carrés*.

L'air, un ressort On peut déterminer la **constante de raideur** notée K de l'air qui joue le rôle de ressort :

$$(2) \quad K = \frac{s^2\rho c^2}{V}$$

On a ici, s la **section du col** en *mètres carrés*, ρ la **masse volumique de l'air** en *grammes par mètre cube*, c la **célérité du son dans l'air** en *kilomètres par seconde* et V le

volume de l'enceinte en *mètres cubes*. Dans le dispositif masse-ressort, la masse M peut se mettre à vibrer à la fréquence f suivante :

$$(3) \quad f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}}$$

Cette fréquence est aussi la fréquence de résonance du système : si l'on force la masse M à osciller à la fréquence de résonance f , le mouvement sera de grande amplitude. La fréquence de résonance d'un résonateur de Helmholtz est donc, par combinaison des formules (2) et (3) :

$$(4) \quad f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s^2\rho c^2}{Vls\rho}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{s}{lV}}$$

On peut aussi définir la pulsation propre :

$$(5) \quad \omega = 2\pi f \iff \omega = c \sqrt{\frac{s}{lV}}$$

De la formule à la mesure Le résonateur a, on l'a vu une fréquence de résonance qui est formalisée dans la formule (4) et qui lui est propre en fonction de ses paramètres. On peut chercher à calculer cette fréquence mais aussi à la mesurer par différentes méthodes.

Méthode spectrale On peut déterminer la fréquence de résonance par une **étude spectrale du son**. Le logiciel ACQUISONIC peut calculer et afficher le spectre d'un enregistrement de l'excitation sonore d'un résonateur. Le logiciel convertit le fichier son (au format WAV) en une représentation graphique de l'amplitude du son en fonction du temps. On peut ensuite sélectionner seulement une partie de l'enregistrement (pour éviter les perturbations de début d'enregistrement). ACQUISONIC traite les données et affiche le spectre du son, en affichant une unité relative (de 0 à 1) en fonction de la fréquence en Hz. Plus l'ordonnée est importante à une fréquence donnée, plus la résonance est effective. Le point ayant 1 pour ordonnée est donc le point dont l'abscisse correspond à la fréquence de résonance.

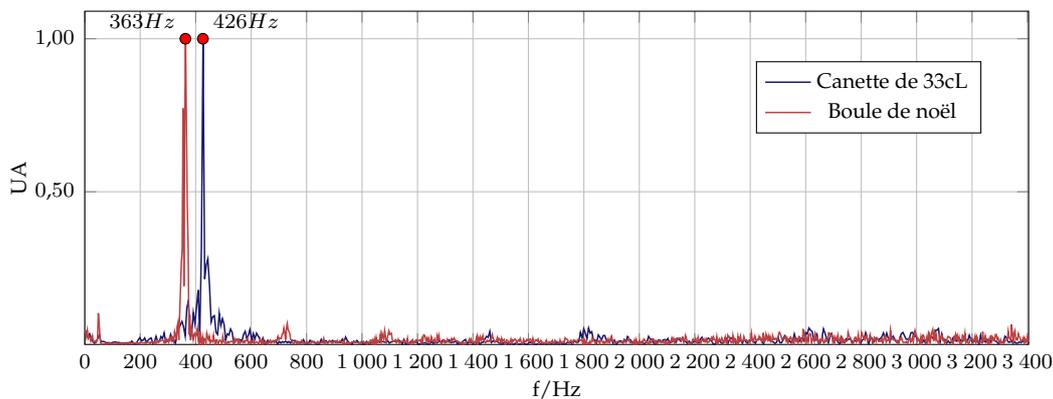


FIGURE 2 – Spectre sonore d'un son au contact d'une canette de 33 cl et d'une boule de Noël

1.C. Mesurer la réponse du résonateur à n'importe quelle fréquence

Matériel nécessaire La mesure de la résonance va s'effectuer avec un générateur basse fréquence (GBF), un oscilloscope, microphone introduit dans le résonateur (que ce soit une canette de soda, une boule de Noël, ou une bouteille) et un haut-parleur placé à proximité du résonateur.

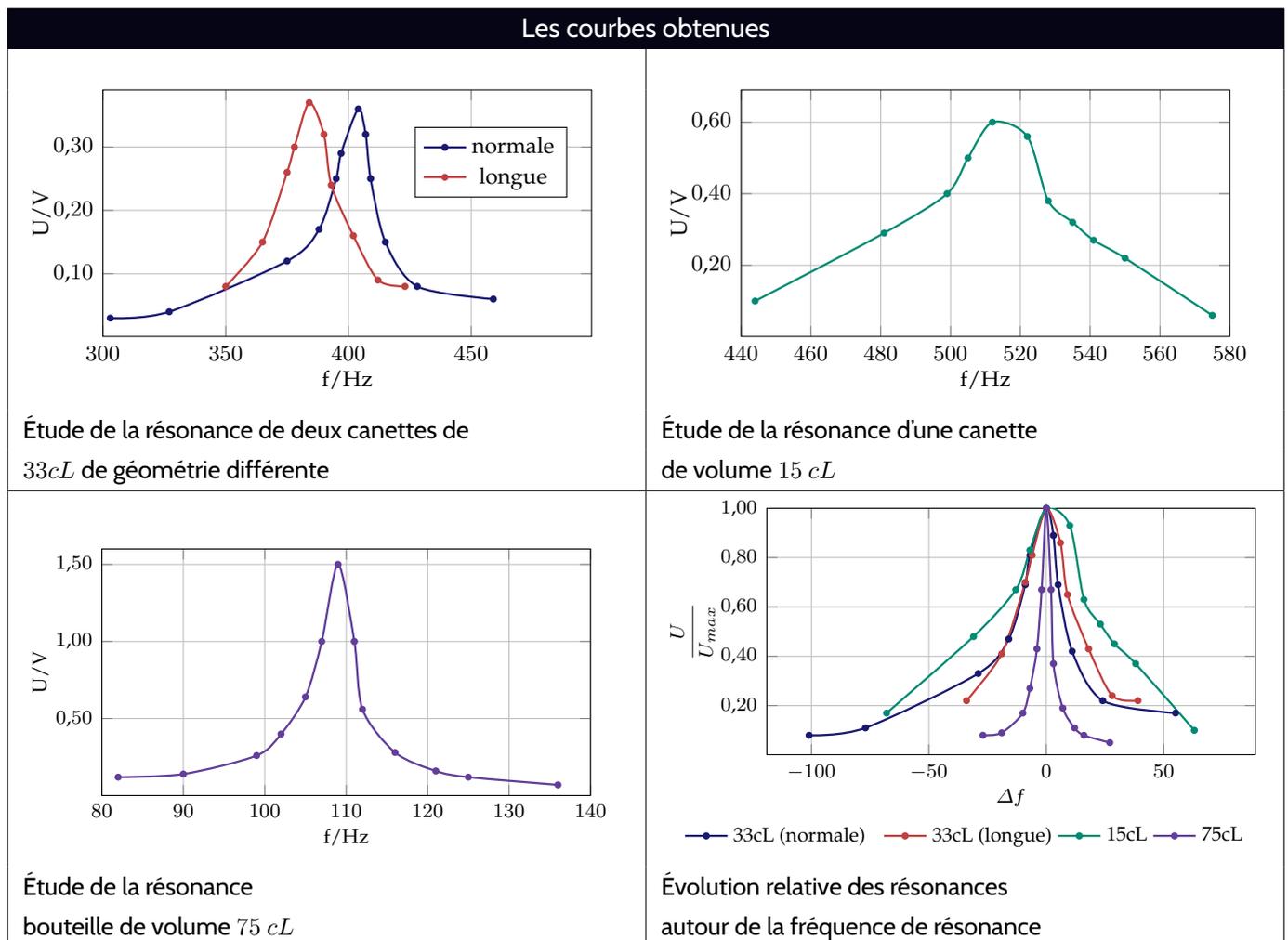
Voir le son! De par la nature des instruments utilisés, on constate que la mesure porte **non pas sur une mesure du son dans le milieu avec un sonomètre, mais sur une mesure de tension : celle du microphone**. De fait, la tension aux bornes du microphone est d'autant plus grande que la quantité de son enregistrée par le microphone est importante. On utilise ainsi un microphone pour transformer l'énergie acoustique du milieu en énergie électrique, dont on peut récupérer les caractéristiques (tension, intensité...) avec un oscilloscope. À cet effet, on utilise les **deux canaux de l'oscilloscope** : le premier pour vérifier la tension délivrée par le générateur qui est transmise au haut-parleur, et le second pour constater la fréquence qui traverse le microphone. Une photo du matériel de l'expérimentation est disponible en page 6.

Protocole Nous avons ainsi placé le résonateur à étudier face au haut-parleur, lui même relié au GBF. Nous pouvions envoyer des ondes sonores sinusoïdales à la fréquence de notre choix et voir comment se comportait le résonateur. Nous mettions ensuite le microphone dans le résonateur : il ne touchait ni les parois ni le fond ni le haut de celui-ci et était positionné toujours à la même profondeur grâce à une marque réalisée sur le cordon. Le microphone était branché à un oscilloscope qui mesurait, sur son premier canal, la tension délivrée par le générateur basse fréquence, ce qui nous permettait de vérifier que l'amplitude de la tension aux bornes du haut-parleur ne variait pas avec la fréquence.

Procédé On constate que la tension aux bornes du microphone passe par un maximum à une certaine fréquence : c'est la fréquence de résonance. On balaie en fréquence autour de la fréquence de résonance et pour chaque f on mesure l'amplitude du signal capté par le microphone par étude sur l'oscilloscope. Pour mieux visualiser le phénomène de résonance, on trace la courbe de la tension U aux bornes du microphone en fonction de la fréquence de l'onde émise au sein du résonateur. On peut ensuite représenter ces données dans un graphique à l'aide des logiciels EXCEL ou REGRESSI. C'est à partir de l'étude de ces graphiques que l'on peut déterminer la fréquence de résonance.

Conditions expérimentales et facteurs d'incertitudes Les expériences ont ainsi été réalisées vers les mois de Mai/Juin 2015 à des températures voisines de 20 à 25°C. L'amplitude choisie pour le générateur a toujours été la même. Quelques difficultés notables influençant l'incertitude qui entoure ces mesures sont à relever :

1. D'une part la sensibilité du générateur basse fréquence qui empêche une sélection facile de la fréquence, ce qui aboutit à des choix de fréquences relativement irréguliers
2. La lecture sur l'oscilloscope, malgré les changements de calibre permettant d'affiner la précision, laisse une part assez importante d'incertitude.
3. Le placement du microphone n'était pas parfaitement identique à chaque fois : la décision a donc été prise de faire une marque sur le cordon qui le relie à l'oscilloscope pour servir de point de repère qui devait correspondre avec le bord haut de l'objet, le microphone était ainsi placé **à l'intérieur de l'objet**.
4. À noter que, plus le *pas* choisi entre deux fréquences testées est faible, plus la détermination de la fréquence de résonance est précise. Idéalement il faudrait mesurer la tension aux bornes du microphone pour toutes les fréquences audibles possibles ce qui était compliqué.



1.D. Le facteur de qualité

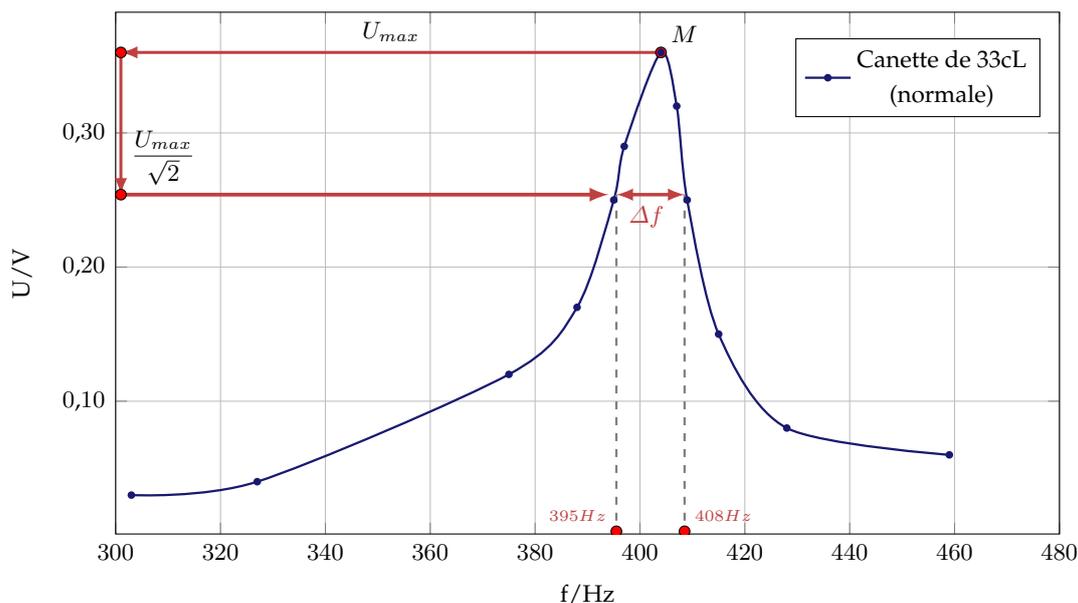


FIGURE 3 – Méthode graphique de détermination du facteur de qualité Q

Méthode de calcul du facteur de qualité Dans ce graphe, on a reporté la tension aux bornes du microphone à diverses fréquences (placées en abscisses). On constate que la courbe forme un V inversé, et qu'on peut donc trouver une valeur f_r pour laquelle on a U_{max} . Ce f_r est ainsi la fréquence de résonance du résonateur testé, ici une canette de 33cL de volume.

Pour calculer le facteur de qualité, on sélectionne la valeur U_{max} et l'on calcule : $\frac{U_{max}}{\sqrt{2}}$. À cette valeur, on regarde les deux points correspondants sur le graphe, qui sont placés de part et d'autre de f_r du point de vue des abscisses et en dessous de U_{max} du point de vue des ordonnées. On reporte leurs deux abscisses et

l'on calcule Δf leur différence.

On obtient ensuite :

$$(6) \quad Q = \frac{f_r}{\Delta f}$$

Un exemple Ici, on a un point M qui a pour coordonnées $(f_r ; U_{max})$ avec $M (404 ; 0,36)$. On calcule ensuite : $\frac{0,36}{\sqrt{2}} \approx 0,254$. On reporte ensuite les deux points A et B tels que leur ordonnée soit aussi 0,254. On obtient ainsi : $A (395 ; 0,254)$ et $B (408 ; 0,254)$. On prend ensuite : $\Delta f = 408 - 395 = 13$.

$$\text{On obtient donc : } Q = \frac{404}{13} \approx 31,1$$

Résonateur	Format	Fréquence de résonance	Facteur de qualité
Canette	33 cL (normale)	404 Hz	28,9
	33 cL (longue)	384 Hz	22,6
	15 cL	512 Hz	20,5
Bouteille	75 cL	109 Hz	31,1
Résonateur	Diamètre du col	Fréquence de résonance	Facteur de qualité
Tube PVC	32 mm	188,7 Hz	29,03
	40 mm	220 Hz	29,72
	50 mm	260,5 Hz	31,01

1.E. Analyse des résultats

Le paramètre Géométrie On constate que les deux canettes de même volume (33 cL) mais de dimensions et de géométrie différentes, ont des facteurs de qualités différents, et des fréquences de résonance différentes. Ce qui est intéressant, c'est de voir en pratique que **le volume n'est pas la seule variable d'ajustement** du facteur de qualité mais que **la géométrie du résonateur est une des composantes** de mesure de ce facteur de qualité. De fait, changer la longueur du col et/ou sa surface, a une incidence sur la résonance du résonateur, même à volume global constant.

Le paramètre Volume En comparant les figures 9 et 10, nous constatons, lors de l'étude de la canette de 15 cl que plusieurs caractéristiques ont changé, à commencer par une fréquence de résonance plus élevée, ce qui est cohérent avec la formule (4) qui montre que le volume est un des paramètres dans l'expression de la fréquence de résonance d'un résonateur. On constate aussi que **le facteur de qualité de cette canette est plus faible** : il n'y a pas de *pic de résonance*, pas de fréquence de résonance clairement délimitée mais une plage de résonance vers 510 Hz.

Des résultats très différents Nous constatons que la bouteille a un facteur de qualité intéressant, la courbe est très resserrée autour du pic de résonance. Cependant, **la bouteille n'est pas un résonateur « idéal »** : sa fréquence de résonance est très faible (vers 107 Hz) ce qui va poser problème lors des expériences futures : de fait c'est une valeur de fréquence très basse, un son très grave, très faible par rapport aux fréquences émises par la parole humaine par exemple.

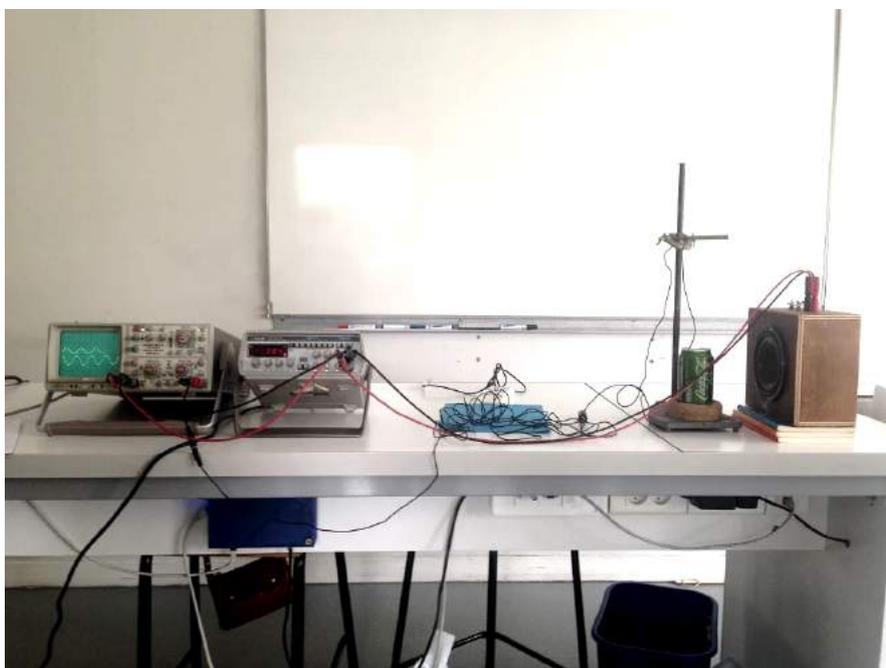


FIGURE 4 – Photo du montage expérimental de mesure du facteur de qualité
De gauche à droite : l'oscilloscope, le GBF, le microphone avec l'objet à tester, et le haut-parleur dirigé vers l'objet

2. Étude approfondie de résonateurs

2.A. De l'étude des volumes

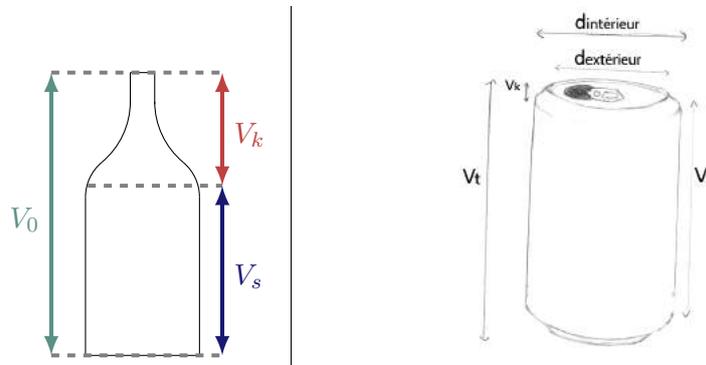


FIGURE 5 – Représentation schématique des différents volumes composant un résonateur

Hypothèses et conditions Nous nous sommes demandés si l'on pouvait faire varier la fréquence de résonance d'une canette en faisant varier le volume d'air qu'elle contenait. Si l'on se réfère à la formule (3), la fréquence de résonance augmente lorsque le volume d'air comprimé diminue. Pour diminuer ce volume, on introduit dans le résonateur un certain volume d'eau qui réduit d'autant le volume V_s . **Nous prévoyons que la fréquence de résonance augmente lorsque le volume du résonateur diminue (lorsque la quantité d'eau ajoutée augmente).** Nous faisons nos mesures pendant une à trois heures dans une salle non climatisée, portes et fenêtres fermées, dans le plus grand calme. La température a varié dans un intervalle de 25 à 30° C en fonction des jours.

Les volumes La forme de la bouteille s'éloigne de la forme «idéale» d'un résonateur de Helmholtz tel que présenté en figure 1. Dans la figure ci-dessus le volume d'air qui coulisse, qui joue le rôle de masse, correspond au volume noté V_k sur la figure. Le volume de l'enceinte de ce résonateur de Helmholtz est noté V_s : c'est le volume d'air qui joue le rôle de ressort. Dans la situation initiale, en absence d'eau dans le bouteille, on a :

$$(7) \quad V_r = V_s$$

$$(8) \quad V_s = V_0 - V_k$$

où V_0 est le volume total du résonateur

En présence d'un volume V_{eau} dans la bouteille on a :

$$(9) \quad V_r = V_s - V_{eau}$$

En combinant la formule (4) et la formule (17), on peut écrire :

$$(10) \quad f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{s}{l V_r}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{s}{l (V_s - V_{eau})}}$$

$$(11) \quad \Leftrightarrow f_r^2 = \frac{c^2 s}{4\pi^2 l} \cdot \frac{1}{V_s - V_{eau}}$$

On peut ensuite réécrire (11) sous la forme :

$$(12) \quad f_r^2 = \frac{a}{V_s - V_{eau}}$$

$$\text{avec} \quad a = \frac{c^2 s}{4\pi^2 l}$$

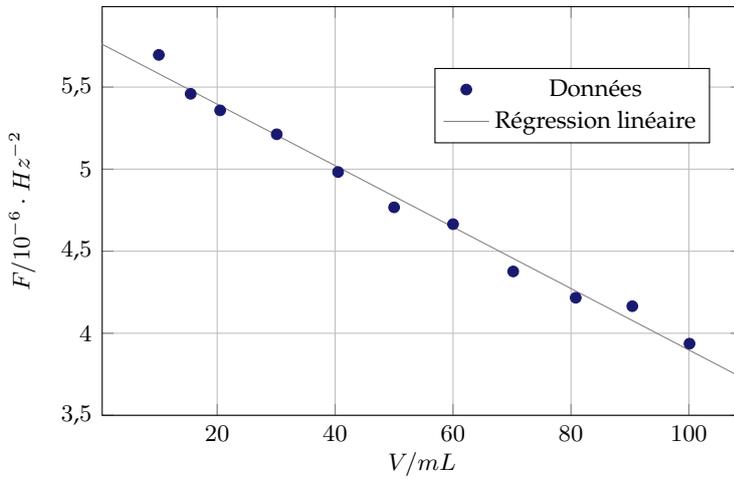
On peut donc définir, à partir de la formule (12) que :

$$(13) \quad \frac{1}{f_r^2} = \frac{V_s}{a} - \frac{V_{eau}}{a}$$

Courbe obtenue La courbe de $F = \frac{1}{f_r^2}$ en fonction du volume d'eau ajouté doit donc être une **droite décroissante**. Les paramètres de cette courbe permettent de déterminer V_s donc V_k qui représente le volume d'air qui coulisse. L'étude permet de modéliser la bouteille (ou la canette ou la boule de Noël) comme un résonateur de Helmholtz.

Les courbes obtenues

Étude de la fréquence de résonance selon le volume d'eau ajouté (pour la canette)



$$\frac{1}{f_r^2} = F = A \cdot V_{eau} + B$$

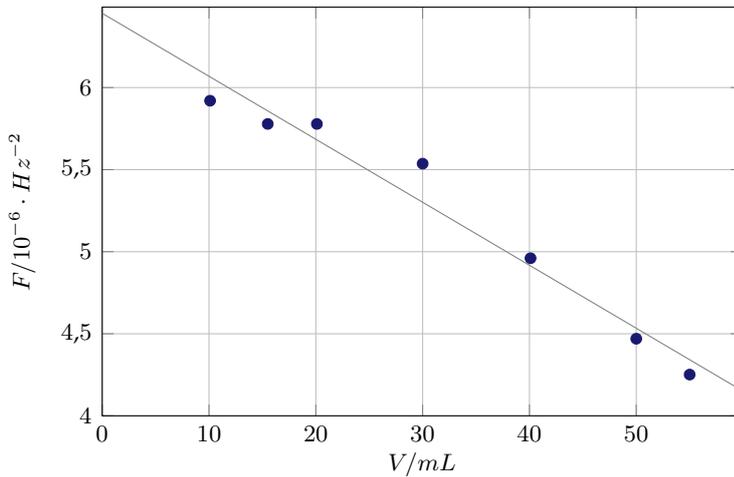
$$A = (-1,9 \pm 0,1) \times 10^{-5} \text{ L}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-2}$$

$$B = (5,77 \pm 0,09) \times 10^{-6} \text{ Hz}^{-2}$$

Écart-type sur $F = 146 \cdot 10^{-9} \text{ Hz}^{-2}$

Intervalle de confiance à 95%

Étude de la fréquence de résonance selon le volume d'eau ajouté (pour la boule de Noël)



$$\frac{1}{f_r^2} = F = A \cdot V_{eau} + B$$

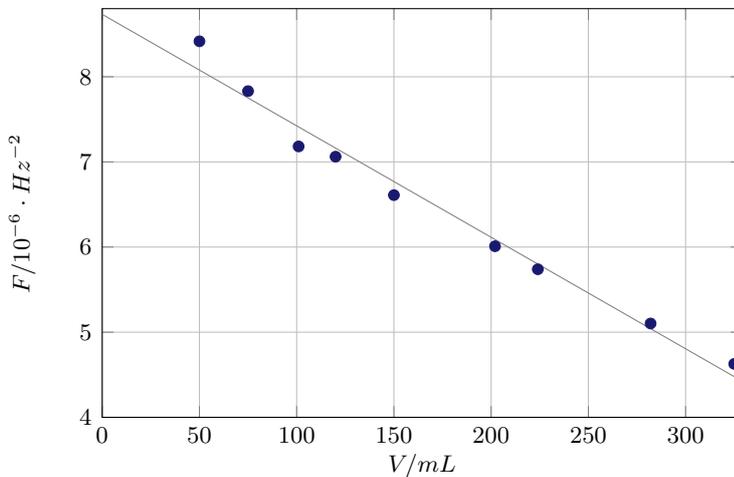
$$A = (-4,38 \pm 0,9) \times 10^{-6} \text{ L}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-2}$$

$$B = (6,39 \pm 0,3) \times 10^{-6} \text{ Hz}^{-2}$$

Écart-type sur $F = 146 \cdot 10^{-9} \text{ Hz}^{-2}$

Intervalle de confiance à 95%

Étude de la fréquence de résonance selon le volume d'eau ajouté (pour la bouteille)



$$\frac{1}{f_r^2} = F = A \cdot V_{eau} + B$$

$$A = (-1,2 \pm 0,17) \times 10^{-4} \text{ L}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-2}$$

$$B = (8,7 \pm 0,3) \times 10^{-5} \text{ Hz}^{-2}$$

Écart-type sur $F = 146 \cdot 10^{-9} \text{ Hz}^{-2}$

Intervalle de confiance à 95%

2.B. De l'exploitation des données

De l'exploitation du coefficient directeur

En combinant la formule (21) et l'expression de F avec la régression linéaire effectuée dans REGRESSI de forme :

$$(14) \quad F = A \cdot V_{eau} + B$$

$$(15) \quad A \cdot V_{eau} + B = \frac{V_s}{a} - \frac{V_{eau}}{a} = -\frac{1}{a}V_{eau} + \frac{V_s}{a}$$

On peut ici identifier que $A = -\frac{1}{a} \iff a = -\frac{1}{A}$ d'où on peut remplacer : $\frac{V_s}{a} = \frac{V_s}{-\frac{1}{A}}$, en rappelant que $\frac{V_s}{a} = B$ on peut écrire :

$$(16) \quad \frac{V_s}{-\frac{1}{A}} = B \iff V_s = -\frac{B}{A}$$

Pour la canette On peut donc calculer pour la canette : $V_s = -\frac{-5,77 \times 10^{-6}}{1,9 \times 10^{-5}} = 3,03 \times 10^{-1} L = 30,3 \text{ cL}$. Et l'on peut calculer : $V_k = V_0 - V_s = 33,0 - 30,3 = 2,7 \text{ cL}$.

Résonateur	Volume V_0	Volume V_s	Volume V_k
Bouteille	75 cL	72,5 cL	2,5 cL
Boule de Noël	16,3 cL	14,6 cL	1,7 cL
Canette	33 cL	30,3 cL	2,7 cL

2.C. Application à la canette

Paramètre	Valeur
Section s	3,4 cm ²
Fréquence de résonance f	404 Hz
Coefficient directeur	$-1,9 \times 10^{-2} \text{ m}^{-3} \cdot \text{Hz}^{-2}$
Célérité du son c	344,85 m · s ⁻¹

$$1,9 \times 10^{-2} = \frac{4\pi^2 \times l}{(344,85)^2 \times 3,4 \times 10^{-4}}$$

$$\iff (344,85)^2 \times 3,4 \times 10^{-4} \times 1,9 \times 10^{-2} = 4\pi^2 \times l$$

De l'exploitation de l'ordonnée à l'origine

On se réfère dans les expressions suivantes aux volumes V_s et V_k définis dans les expressions (15) et (16), on peut rappeler :

$$(17) \quad f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{s}{l V_r}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{s}{l (V_s - V_{eau})}}$$

$$(18) \quad f_r^2 = \frac{c^2 s}{4\pi^2 l} \cdot \frac{1}{V_s - V_{eau}}$$

Que l'on peut réécrire comme :

$$(19) \quad f_r^2 = \frac{a}{V_s - V_{eau}}$$

avec $a = \frac{c^2 s}{4\pi^2 l}$

à partir de (26) on peut écrire que :

$$(20) \quad \frac{1}{f_r^2} = \frac{1}{a} \cdot V_s - \frac{1}{a} \cdot V_{eau}$$

$$(20') \quad \frac{1}{a} = \frac{4\pi^2 l}{c^2 s}$$

$$(21) \quad l = \frac{c^2 s}{4\pi^2} \cdot \frac{1}{a}$$

$\frac{1}{a}$ étant le coefficient directeur

$\frac{1}{a}$ est le coefficient directeur de l'expression, c^2 peut être déterminé - étant une valeur tabulée - et s estimé ou mesuré, donc on peut déterminer la hauteur du col pour n'importe quel résonateur.

$$\iff l = \frac{(344,85)^2 \times 3,4 \times 10^{-4} \times 1,9 \times 10^{-2}}{4\pi^2}$$

$$\iff l = \frac{0,768}{4\pi^2} \text{ m}$$

$$\iff l = 0,0195 \text{ m} = \boxed{2,0 \text{ cm}}$$

La longueur du col l de la canette fait donc 1,95 cm ce qui est un ordre de grandeur tout à fait cohérent avec sa géométrie. En annexe est placée le détail de la détermination de l'incertitude pour l .

3. Jouons avec les résonateurs

3.A. Construisons notre résonateur

Atelier pratique Après les Olympiades régionales, nous avons décidé de construire nous même un résonateur d'un format différent de ceux déjà étudiés. Nous avons commencé par créer un modèle de résonateur en PVC qui reprenait la forme basique d'une canette sauf que l'extrémité était droite et non en forme de base de cône.

Construction Nous avons créé ce résonateur à partir de deux tubes en PVC. L'un était un tube normal (complètement ouvert à ses deux extrémités) tandis que l'autre était bouché à seulement l'une de ses extrémités. Cette extrémité bouchée possédait un trou dont nous avons fait varier la circonférence (32, 40 ou 50 millimètres de diamètre). Nous avons ensuite assemblé les deux extrémités ouvertes des tubes à l'aide d'un scotch renforcé pour empêcher toute fuite d'air du résonateur. Ainsi, nous obtenions un résonateur de Helmholtz dont nous connaissions plusieurs paramètres : sa section et son volume.

La section s L'étude de notre résonateur s'est déroulée en deux phases d'expériences. En premier lieu, nous avons étudié la fréquence de résonance et le facteur de qualité du résonateur en faisant varier la section s de l'ouverture. Pour réaliser ces mesures, nous avons utilisé le même protocole que pour l'étude des canettes.

Système étudié	Fréquence de résonance (/Hz)	Facteur de qualité
$d_s = 32mm$	188,7	29
$d_s = 40mm$	220	30
$d_s = 50mm$	260,5	31

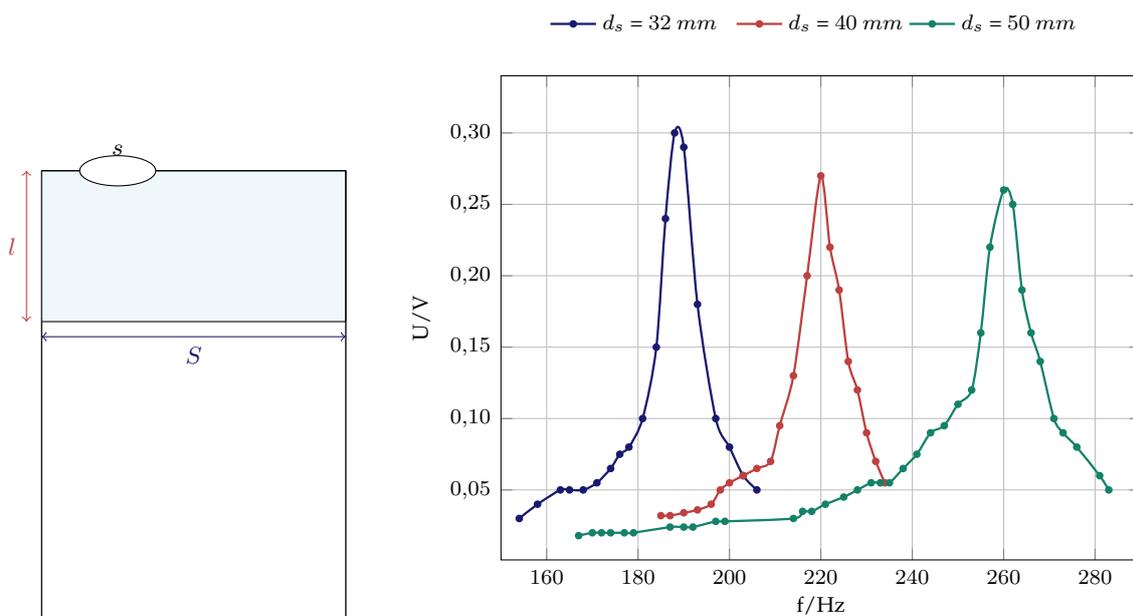
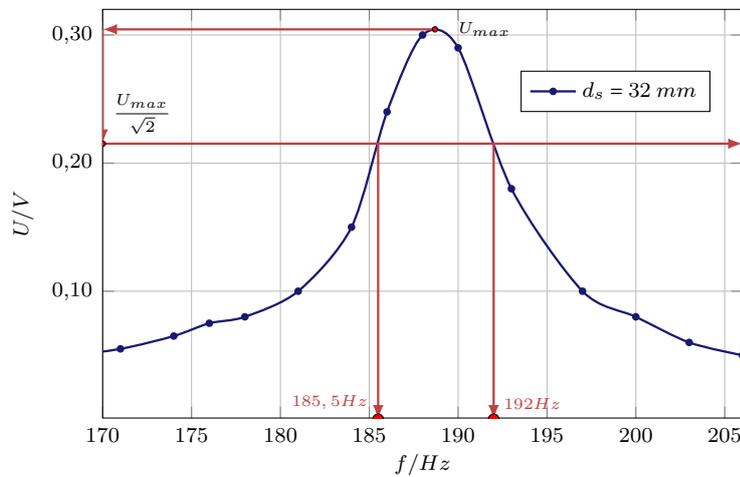


Schéma des paramètres s , S et l

Les courbes obtenues

Étude pour le résonateur ayant un diamètre de col de 32 mm



$$\frac{U_{max}}{\sqrt{2}} = 0,3044V$$

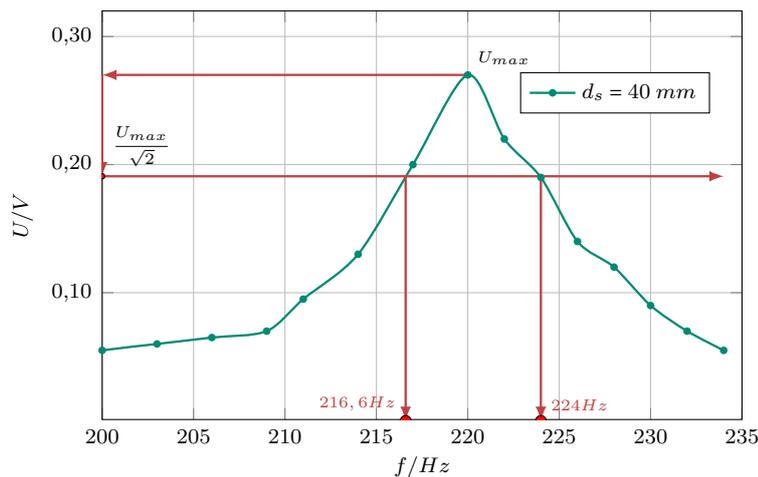
$$f_1 = 185,5\text{ Hz et } f_2 = 192\text{ Hz}$$

$$\Delta f = 6,5\text{ Hz}$$

$$f_r = 188,7\text{ Hz}$$

$$Q = \frac{f_r}{\Delta f} = \frac{188,7}{6,5} = 29$$

Étude pour le résonateur ayant un diamètre de col de 40 mm



$$\frac{U_{max}}{\sqrt{2}} = 0,1964V$$

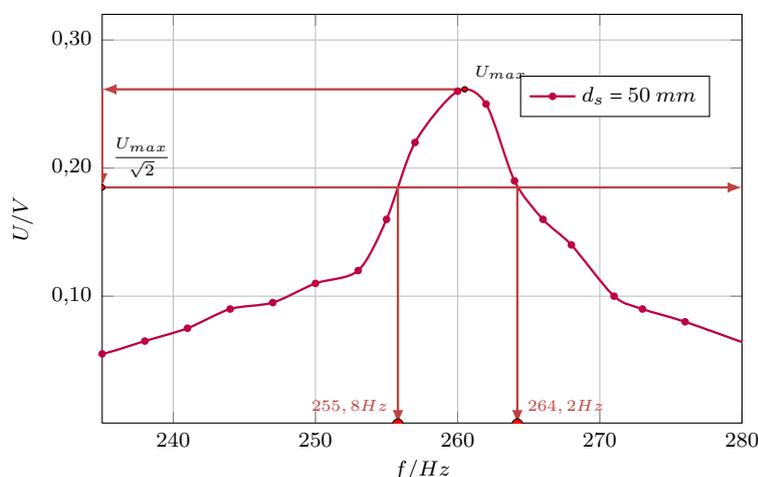
$$f_1 = 216,6\text{ Hz et } f_2 = 224\text{ Hz}$$

$$\Delta f = 7,4\text{ Hz}$$

$$f_r = 220,7\text{ Hz}$$

$$Q = \frac{f_r}{\Delta f} = \frac{220}{7,4} = 30$$

Étude pour le résonateur ayant un diamètre de col de 50 mm



$$\frac{U_{max}}{\sqrt{2}} = 0,1849V$$

$$f_1 = 255,8\text{ Hz et } f_2 = 264,2\text{ Hz}$$

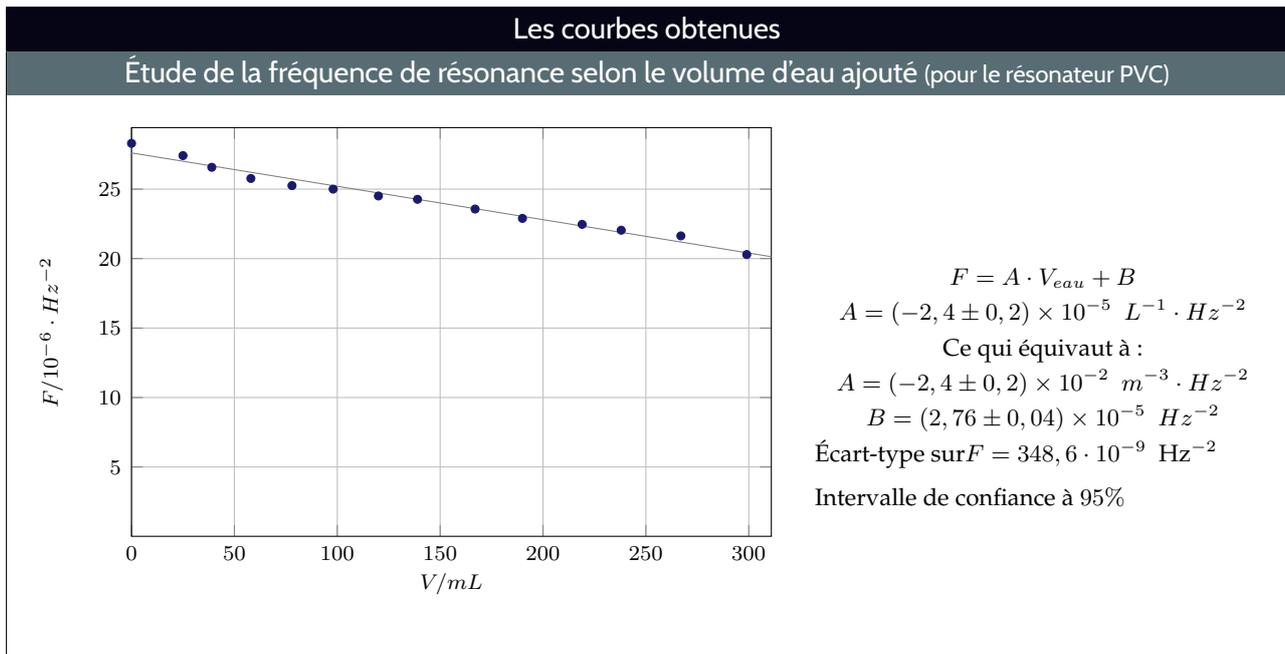
$$\Delta f = 8,4\text{ Hz}$$

$$f_r = 260,5\text{ Hz}$$

$$Q = \frac{f_r}{\Delta f} = \frac{260,5}{8,4} = 31$$

Conclusion Les mesures effectuées sont très proches des valeurs théoriques calculées. Nos résultats nous permettent de revenir à l'une des propriétés du résonateur de Helmholtz : quand on réduit la section, la fréquence de résonance augmente.

Volume d'eau La seconde phase de notre étude expérimentale avait pour but d'étudier l'évolution de la fréquence de résonance de notre résonateur (avec une section s de diamètre 32 mm) en fonction du volume d'air dans son enceinte. Pour cela nous avons ajouté de l'eau petit à petit dans le résonateur, comme lors de l'étude de la fréquence de résonance en fonction de l'eau dans les canettes de 330 mL.



Information sur la section Il est aussi important de remarquer que le dispositif, pourvu d'un diamètre indicatif de 32 mm à son extrémité, est également pourvu d'un petit décrochement qui est visible en rouge sur l'image ci-joint. Ce décrochement a été mesuré et c'est la section minorée qui est utilisée dans l'application numérique suivante.

Application numérique

$$2,4 \times 10^{-2} = \frac{4\pi^2 \times l}{(342,5)^2 \times 6,2 \times 10^{-4}}$$

$$\Leftrightarrow l = \frac{2,4 \times 10^{-2} \times (342,5)^2 \times 6,2 \times 10^{-4}}{4\pi^2}$$

$$\Leftrightarrow l = \frac{1,75}{4\pi^2}$$

$$\Leftrightarrow l = 0,044 m$$

$$\Leftrightarrow l = 4,4 cm$$

Paramètre	Valeur
Section s	$\pi \cdot \frac{(2,8)^2}{4} \approx 6,2 cm^2$
Fréquence de résonance f	188,7 Hz
Coefficient directeur	$-2,4 \times 10^{-5} L^{-1} \cdot Hz^{-2}$
Célérité du son c à 18,5°C	342,5 m · s ⁻¹

3.B. Réverbération & Résonateur

Onde et paroi La **réflexion** de l'onde sonore contre la paroi qui est à l'origine de l'écho, une réverbération néfaste, puisque le décalage entre l'onde sonore directe et l'onde sonore réfléchie est trop important, dépassant 0,1 s. Elle devient perceptible à l'oreille humaine, ce qui perturbe le confort acoustique de l'utilisateur.

Le temps de réverbération On peut ainsi définir un **temps de réverbération**, qui correspond au temps que met le son en un endroit à **décroître de 60 dB** à partir du moment où la source sonore n'émet plus. La réverbération a un avantage indéniable (si elle n'est pas trop faible, ce qui donnerait un rendu sonore sec, ou au contraire si elle est trop importante, rendant un « *effet cathédrale* », fatigant pour l'auditeur) c'est qu'elle permet de **soutenir l'intensité sonore** qui décline avec la distance puisque la réverbération permet de **rediriger le son vers l'auditeur**. D'où l'intérêt d'une conception architecturale prenant en compte cette réverbération pour soutenir le confort acoustique de ses utilisateurs.

La canette de soda : un résonateur approprié Après avoir trouvé les fréquences de résonances de différents objets du quotidien, nous avons montré que la canette de soda 33 cl est le meilleur résonateur. Nous avons donc voulu mettre en pratique la théorie et tenter de voir si le fait de mettre des canettes dans un lieu clos pouvait faire diminuer le temps de réverbération. Cette expérience est analogue aux amphores placées dans les murs des églises, ayant la fonction de réduire le temps de réverbération et ainsi améliorer l'acoustique de l'église¹.

Expérimentation, objectifs La manipulation a donc consisté à envoyer du son dans un lieu clos à l'aide d'un haut-parleur branché à un GBF (sur fréquence fixe correspondant à la fréquence de résonance des canettes) puis de couper le haut parleur à l'aide d'un interrupteur et de mesurer le temps de réverbération à l'aide d'un sonomètre relié à un dispositif EXAO qui permettait d'afficher en temps réel les données mesurées par le sonomètre et de les retraiter pour obtenir un temps de réverbération (le logiciel utilisé est SYNCHRONIE). Nous nous sommes inspirés du protocole mis au point par M. ALAIN JOUVE au lycée Rosa Parks de l'Académie de Lyon.

Exploitation des données Il existe plusieurs méthodes pour calculer le temps de réverbération. Pour ces expériences nous avons utilisé le logiciel SYNCHRONIE, qui nous a permis de récupérer et de traiter les données. Grâce à celui-ci nous avons pu fixer un seuil de déclenchement de la mesure exactement au moment où nous éteignons le GBF. Ainsi, le logiciel permettant de tracer des courbes de l'intensité sonore en fonction du temps, nous avons pu relever, à l'aide d'un réticule, le temps qu'il a fallu au son pour décroître de 60 dB, établissant ainsi le temps de réverbération.

Échec de la manipulation dans une salle de classe Nous avons en premier lieu essayé cette manipulation dans une salle de classe (environ 100 m³) avec et sans un lot de 16 canettes. Cependant, les résultats n'ont pas été satisfaisants, car les temps de réverbération étaient les mêmes avec ou sans les canettes. Nous en avons alors conclu que la pièce était probablement trop grande et qu'ainsi la différence avec et sans les canettes ne pouvait pas être observée.

1. Se référer à l'introduction

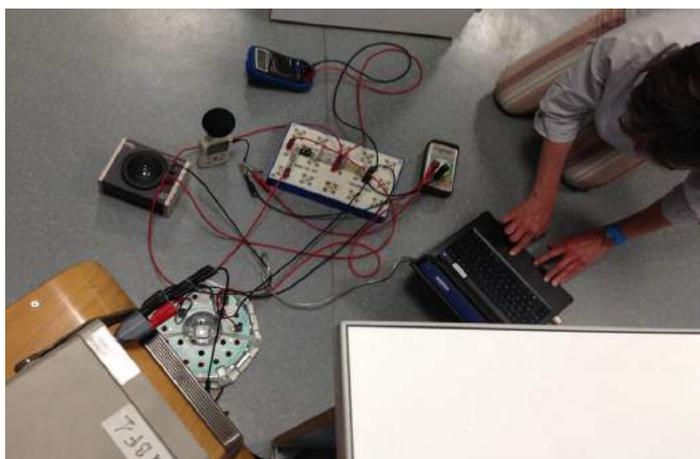


FIGURE 6 – Dispositif de mesure du temps de réverbération

Le montage consiste en un haut-parleur, un GBF, un sonomètre, une console ExAO, et un montage électrique comportant un interrupteur

Nouvelle tentative Nous avons donc voulu essayer la même expérience mais dans un lieu moins volumineux. Nous nous sommes donc procurés quatre cartons de déménagement que nous avons fixés ensemble pour former une seule grande boîte d'environ $1m^3$. Nous avons répété le même montage que dans la salle en insérant le sonomètre et le haut parleur dans le carton. Les résultats ont été très nuancés : nous avons mesuré un temps de réverbération d'environ 300 ms dans le carton seul et très légèrement inférieur dans le carton muni des 16 canettes de soda, en tout cas beaucoup plus lisible et satisfaisant que lors de la première expérience. L'effet des canettes n'étant pas mesurable avec certitude dans nos conditions d'expérimentations, il nous est difficile de conclure avec certitude de l'effet de la présence de résonateurs.

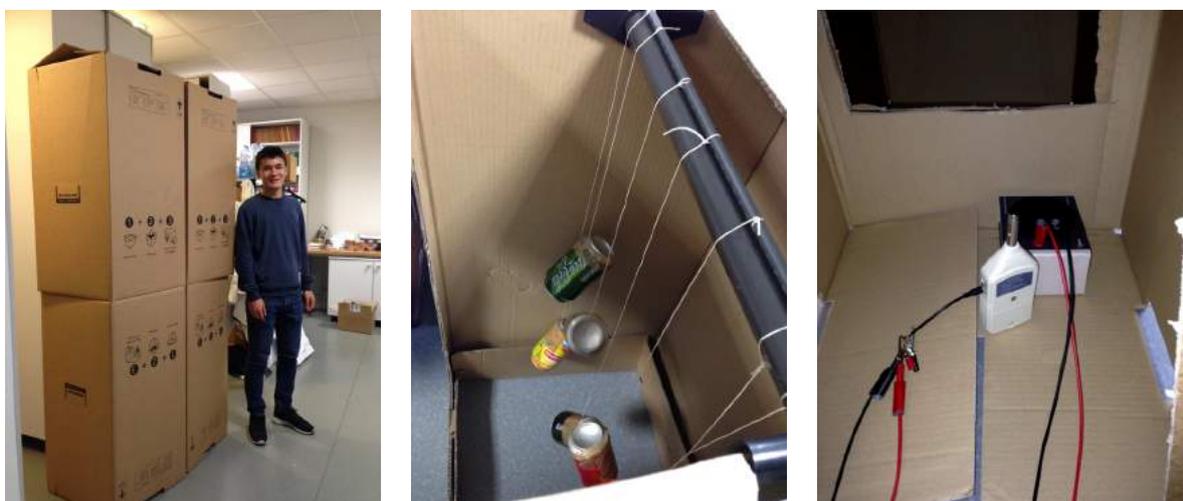


FIGURE 7 – Photos des expérimentations de temps de réverbération

*À gauche, la vue d'ensemble de la construction réalisée
Au milieu, les canettes suspendues à une tringle à l'intérieur de la construction
À droite, le sonomètre et le haut-parleur, placé sous les canettes suspendues*

Les courbes fournies ci-dessus sont celles de la dernière expérience en date qui a été réalisée avec un sonomètre de meilleure qualité, nous permettant d'avoir des courbes plus précises.

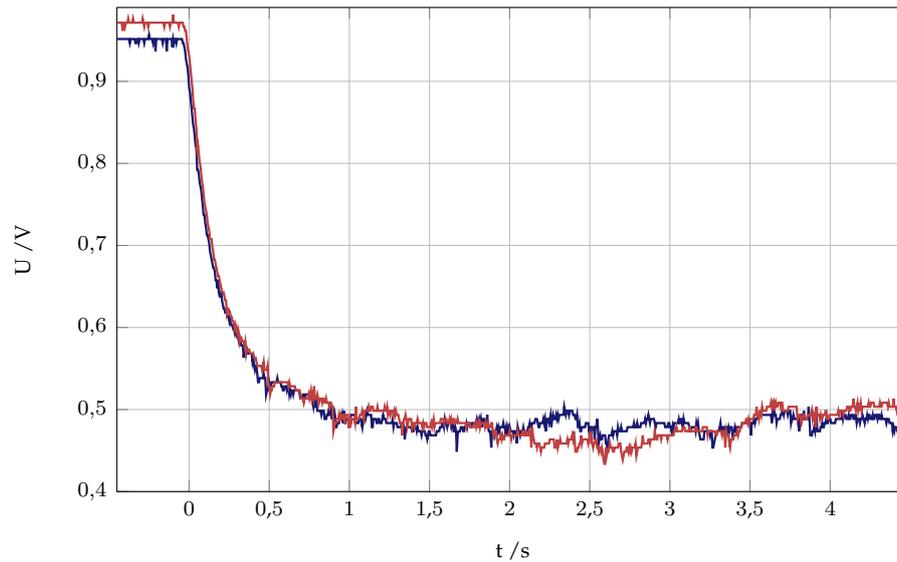


FIGURE 8 – Graphiques de la tension mesurée en fonction du temps

Nous mesurons ici le temps de réverbération d'une onde sonore de fréquence 417 Hz

Avec les cannettes en bleu

Sans les cannettes en rouge

Avec un autre résonateur Enfin, nous avons répété cette expérience en changeant les résonateurs pour voir si nous trouverions un temps de réverbération meilleur que dans le carton seul mais moins bien que dans le carton muni des cannettes (les cannettes ayant été préalablement désignées comme les meilleurs résonateurs). Nous avons donc essayé avec des petites bouteilles. Cependant, cette fois-ci, les résultats n'ont pas été concluants : nous avons trouvé environ le même temps de réverbération avec et sans les bouteilles. Nous avons alors pensé que les trous laissés dans le carton composé pouvait être le facteur à l'origine de ces résultats inattendus. En effet, il y avait présence au niveau des jointures entre les quatre cartons d'espaces communiquant avec le reste de la salle.

Conclusion

Nous avons eu l'occasion, au cours de notre recherche, de découvrir cet objet qu'est le résonateur de Helmholtz, quelles en sont les propriétés et tenter de cerner ses possibles utilisations pratiques et ludiques.

Propriétés du résonateur Dans le cadre de ces travaux, nous avons d'abord tenté de distinguer ses propriétés physiques et les formules mathématiques qu'on peut lui appliquer. Ce sont principalement les formules de détermination de la fréquence de résonance et le modèle masse-ressort qu'on peut appliquer au résonateur qui ont attiré notre attention.

Mise en mouvement d'une masse d'air dans le col De fait, un résonateur de Helmholtz est un système masse-ressort d'une remarquable efficacité : on peut tout à fait observer expérimentalement la mise en mouvement de la masse d'air dans le col du résonateur. Ceci par l'importance de l'intensité acoustique qu'elle induit. C'est à partir de ce point remarquable que nous avons travaillé.

Des caractères propres Nous les avons examinés sous toutes les coutures ces objets du quotidien, si simples et pourtant si complexes, que ce soit la canette de soda, la boule de Noël ou les résonateurs en PVC que nous avons construits. Nous avons travaillé à leur attribuer des caractéristiques propres : facteur de qualité, détermination des volumes en mouvement et jouant le rôle de ressort, impact sur la réverbération dans un milieu ouvert puis fermé...

Des informations clés Mieux encore, par étude de leur résonance en fonction du volume de l'enceinte du résonateur, nous avons pu retrouver les caractéristiques acoustiques et distinguer la masse d'air qui oscille et celle qui joue le rôle de ressort. Nous sommes même allés jusqu'à créer notre propre modèle de résonateur de Helmholtz.

Nos conclusions Nos conclusions sont les suivantes : les résonateurs sont uniques entre eux et ils ont chacun des propriétés propres, un facteur de qualité propre. Si leurs caractéristiques ont été étudiées avec succès, leur utilisation concrète est plus complexe. Cependant, la mise en évidence de l'effet des résonateurs sur la réverbération n'est pas évident au premier coup d'œil, nos résultats sont mitigés du fait des multiples facteurs qui entrent en jeu lors de la mesure de la réverbération.

Le mystère des vases *Depuis l'Antiquité, les vases incrustés dans les murs des édifices religieux sont connus pour leurs propriétés acoustiques. Alors, ces vases, résonateurs ou non ? Difficile de conclure, bien que nous ayons étudié plusieurs résonateurs, plusieurs dispositions lors de la mesure de la réverbération, il nous est impossible de vous offrir une réponse claire. Ce qui est certain, c'est que c'est ces vases n'ont pas encore livré tous leurs secrets !*

Nos remerciements

Nous tenons à adresser tous nos remerciements aux personnes qui nous ont aidées dans la réalisation de ce projet.

Nos remerciements les plus chaleureux vont bien évidemment à Mme Piveteau qui tout au long de cette aventure nous a apporté soutien, conseils et bonne humeur. Son écoute et son dévouement nous ont vraiment aidé tout au long de ce parcours scientifique complexe mais passionnant.

Nous souhaiterions aussi remercier tous ceux qui nous ont permis de mener à bien ce projet. Geoffroy Lerosey et Fabrice Lemoult tout d'abord, qui nous ont accueilli à l'Institut de Physique du Globe et nous ont permis de pouvoir avancer dans notre recherche. Jean Rosin, acousticien à Aéroports de Paris nous a également donné de précieux conseil concernant la réverbération.

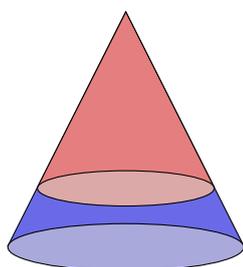
M. Ménétrier ensuite, professeur de Physique-Chimie à l'École Alsacienne, qui nous a également grandement aidé au cours de notre recherche ; l'équipe pédagogique de l'École et tous ceux qui ont rendu ce projet possible par leur soutien, leurs conseils et leur aide.

Pour finir, nous aimerions vous remercier de nous avoir donné cette chance rare de travailler dans ce cadre différent, stimulant et enrichissant qu'est celui de la recherche. Cela a été un réel plaisir pour nous de construire pas à pas notre étude et d'avoir la chance de vous la présenter.

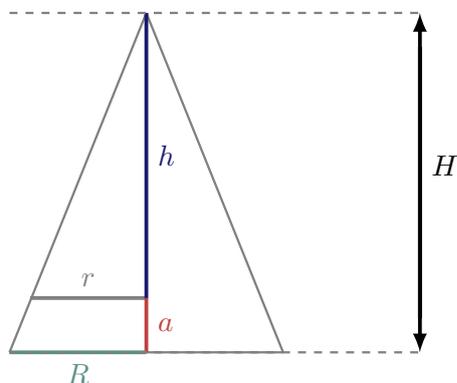
Annexes

De la géométrie de la canette

On peut composer plusieurs volumes différents avec la canette. Pour pouvoir mieux comprendre la géométrie même de la canette nous avons essayé d’en proposer un modèle géométrique permettant de comprendre intuitivement la géométrie de cet objet et d’en proposer une mesure de volume fondée sur ce modèle particulier. On constate que la canette n’est ni plus ni moins qu’un cylindre particulier : il possède une terminaison particulière à ses deux extrémités. Or, on peut géométriquement assimiler ces volumes particuliers à des **tranches de cônes**. Sur la figure ci-dessous, le dessus de la canette peut être assimilé à la tranche bleue du cône ci-dessous. Pour calculer le volume de cette portion bleue, on peut calculer le volume total du grand cône (la réunion des sections rouges et bleues) auquel on soustrait le volume du petit cône rouge.



Or, si l’on coupe ce cône selon un plan vertical sur sa diagonale on obtient une figure :



Du fait que nous nous plaçons ici dans une situation de Thalès, nous pouvons écrire :

$$\frac{r}{h} = \frac{R}{H} = \frac{r}{H-a}, \text{ d'où l'on déduit :}$$

$$H(R-r) = aR$$

$$\iff H = \frac{aR}{R-r}$$

Nous avons déterminé la mesure de H on peut donc utiliser la formule de volume du cône ($V = \frac{1}{3}\pi r^2 h$) où r est le rayon du cercle à la base et h la hauteur du cône pour mesurer ce qui nous intéresse.

Si l’on note V_H le volume du grand cône (réunion des sections rouges et bleues) et V_h le volume du petit cône (le cône rouge sur la figure) :

$$V_H - V_h = \frac{1}{3}\pi(R^2H - r^2h)$$

$$\iff V_H - V_h = \frac{\pi}{3}(R^2H - r^2H + r^2a)$$

$$\iff V_H - V_h = \frac{\pi}{3}\left(\frac{aR}{R-r}(R^2 - r^2) + r^2a\right)$$

$$\iff V_H - V_h = \frac{\pi}{3}(aR(R+r) + r^2a)$$

$$\iff \boxed{V_H - V_h = \frac{a\pi}{3}(R^2 + Rr + r^2)}$$

On peut donc calculer à partir des estimations faites pour les mesures :

$$\begin{cases} a = 1,2 \text{ cm} \\ R = \frac{6,59}{2} \text{ cm} \\ r = 2,5 \text{ cm} \end{cases}$$

D’où l’on déduit que le volume de cette section de cône est égal à :

$$v \approx 32 \text{ mL soit } 3,2 \text{ cL}$$

ce qui est légèrement supérieur au volume $V_k = 2,7 \text{ cL}$ d’air oscillant à la fréquence de résonance calculé au cours de l’étude

Protocole pour la mesure du temps de réverbération

Dans le cadre de cette expérience, nous nous sommes inspirés du protocole mis au point par M. ALAIN JOUVE au lycée Rosa Parks de l'Académie de Lyon. C'est à dire l'étude simultanée de la tension délivrée par le générateur et la tension délivrée le sonomètre. Ces deux informations sont récupérées par dispositif EXAO sur le logiciel SYNCHRONIE afin de pouvoir afficher les courbes de tension en fonction du temps pour les deux dispositifs.

À ce titre, SYNCHRONIE nous a permis de paramétrer un seuil de déclenchement à partir duquel les mesures étaient enregistrées.

Circuit électrique Pour pouvoir récupérer ces données correctement, nous avons utilisé un schéma électrique similaire à celui proposé par M. JOUVE :

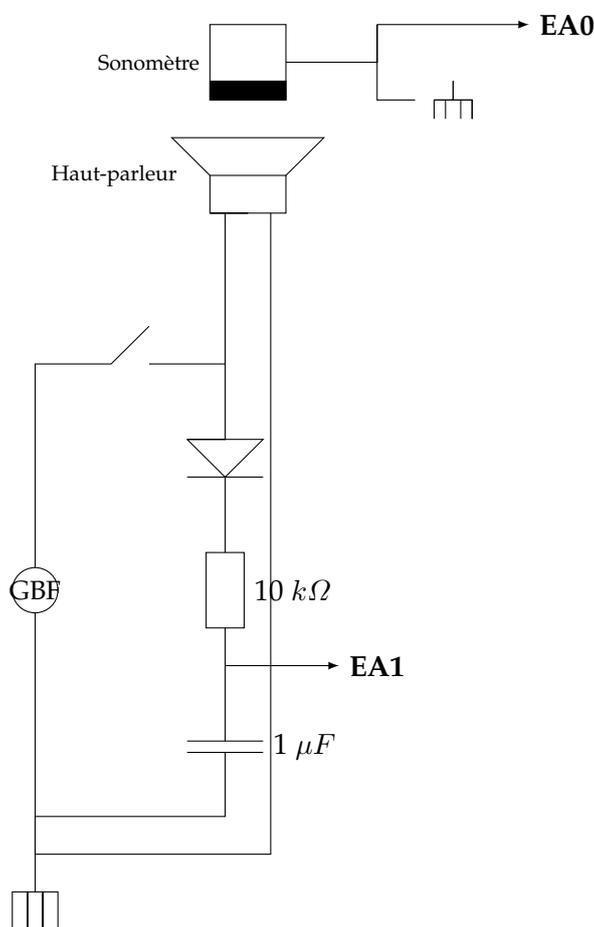


FIGURE 9 – Circuit électrique utilisé pour la mesure du temps de réverbération

Incertitudes

Incertitude pour l

On rappelle :

$$l = \frac{c^2 s}{4\pi^2} \cdot \frac{1}{K}$$

Ainsi on peut déterminer :

$$u(l) = l \cdot \sqrt{\left(\frac{u(s)}{s}\right)^2 + \left(\frac{u(K)}{K}\right)^2 + \left(\frac{2u(c)}{c}\right)^2}$$

Si l'on étudie l'incertitude du l du résonateur PVC :

$$U(K) = 2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-3} \cdot \text{Hz}^{-2}$$

$$u(K) = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-3} \cdot \text{Hz}^{-2}$$

Pour $u(c)$, on a une incertitude de lecture sur le thermomètre de $0,1^\circ\text{C}$, on peut donc déterminer les valeurs de c pour l'intervalle défini par l'incertitude de mesure. Or l'incertitude-type de c pour les deux valeurs extrêmes est très faible, on l'évalue à $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

$$u(c) = 1 \cdot 10^{-1} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Pour déterminer la surface du col du résonateur, on a utilisé une règle graduée au millimètre en faisant deux mesures :

- Celle du diamètre du col noté D
- Celle du décrochement noté e

→ On obtient un diamètre corrigé d par $d = D - 2 \cdot e$

$$s = \pi \cdot \frac{d^2}{4}$$

$$u(s) = 2 \cdot \frac{s}{d} \cdot u(d) \iff \frac{u(s)}{s} = \frac{2 \cdot u(d)}{d}$$

On peut estimer :

$$u(d) = \sqrt{u^2(D) + 4u^2(e)}$$

$$u(D) = u(e) = \frac{\sqrt{2} \cdot 0,1}{\sqrt{12}} \text{ cm}$$

$$u(d) = \sqrt{5 \cdot u^2(D)} \text{ cm}$$

$$u(d) = \sqrt{5} \cdot u(D) \text{ cm}$$

À partir de ces données, on peut déterminer :

$$\frac{u(s)}{s} = 2 \cdot \frac{\sqrt{5} \cdot \sqrt{2} \cdot 0,1}{\sqrt{12} \cdot d}$$

$$\frac{u(s)}{s} = \frac{0,1 \cdot \sqrt{10}}{\sqrt{3} \cdot 2,8} = 6,5 \cdot 10^{-2}$$

On peut donc établir :

$$u(l) = l \cdot \sqrt{(6,5 \cdot 10^{-2})^2 + (4,5 \cdot 10^{-5})^2 + (6 \cdot 10^{-4})^2} \text{ m}$$

En réalité, seule l'incertitude sur la section comporte un réel impact sur l'incertitude globale de la détermination de la longueur l du col. Ainsi, on peut approximer :

$$u(l) = l \cdot \sqrt{(6,5 \cdot 10^{-2})^2} = 4,4 \cdot 6,5 \cdot 10^{-2}$$

$$u(l) = 0,3 \text{ cm}$$

Avec un intervalle de confiance de 95 %

$$U(l) = 0,6 \text{ cm}$$

$$l = (4,4 \pm 0,6) \text{ cm}$$

Couplages de résonateurs

Premiers résultats Nous allons essayer d'observer ce qu'il se passe lorsqu'on assemble plusieurs canettes ensemble côte à côte. Lorsqu'on couple deux canettes, un échange d'énergie entre les deux systèmes résonants a lieu. Ces deux systèmes devraient alors former à eux deux un seul système masse-ressort, dont la particularité est qu'il possède deux fréquences de résonance, appelées **modes**. Il y aura un mode pour lequel les deux systèmes vont résonner en phase, puis un autre pour lequel ils raisonneront en **antiphase**. Pour reprendre l'analogie avec un système *masse-ressort*, deux masses qui se déplacent en phase ont un mouvement identique et simultané. Elles se déplacent ensemble, et restent à la même distance l'une de l'autre. Lorsque deux masses résonnent en antiphase, leurs mouvements sont opposés ou bien en décalage.

Encore plus de canettes Similairement, dans un ensemble de canettes collées les unes aux autres, chaque canette interagit avec sa voisine pour récupérer du son et en émettre. Ce comportement se répète pour chaque canette de l'ensemble. L'énergie est alors transportée partout dans l'ensemble, créant ainsi un grand ensemble de résonance. Cet ensemble présente n modes de résonance où n est le nombre de canettes. Expérimentalement, on retrouve cela en traçant l'amplitude en fonction de la fréquence dans le grand ensemble. On obtient non plus un grand pic comme dans l'étude avec une canette mais n pics distincts.

Avec deux canettes Nous avons tout d'abord assemblé deux canettes côte à côte et avons placé le microcravate dans l'une d'entre-elles. Nous avons ensuite mesuré les variations en fonction de la fréquence, comme avec une seule canette. Nous attendions une courbe avec deux pics distincts, représentant les deux modes. Or, celle que nous avons obtenu n'avait qu'un seul grand pic.

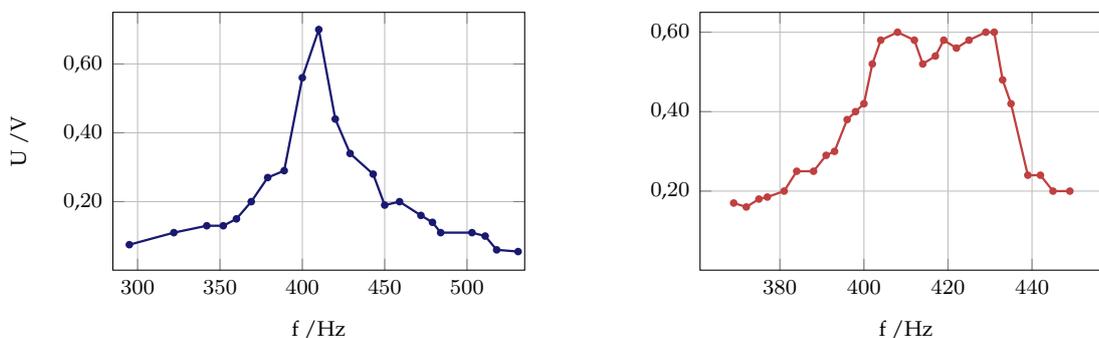


FIGURE 10 – Résonance de deux canettes couplées **horizontalement** puis **verticalement**

Couplage vertical Nous avons ensuite décidé d'assembler les deux canettes en les superposant. Nous voulions savoir s'il y aurait une différence dans nos résultats si nous changions leur arrangement. Avec les deux mêmes canettes, nous avons en effet trouvé une courbe très différente, dont l'allure se rapprochait déjà plus du profil bimodal recherché.

Correspondance avec M. Lerosey Cherchant à comprendre où était le problème, nous avons contacté GÉOFFROY LEROSEY, un des intervenants de la conférence *Manipuler les sons avec des canettes*. Il nous a expliqué que « à cause de la dissipation visqueuse et thermodynamique, les modes propres ne sont pas réellement séparés en fréquence, mais se mélangent les uns les autres, d'où la difficulté de les mesurer ».

A l'occasion de sa conférence, lui aussi avait mesuré avec son équipe les modes d'un ensemble de 49 canettes, disposées dans un carré de 7 par 7. Son protocole consistait à placer 8 hauts parleurs autour du carré de canettes, puis d'émettre avec chaque haut-parleur indépendamment et mesurer la tension au-dessus de toutes les canettes avec un micro, et ce pour tous les haut-parleurs.

M. Lerosey nous a cependant conseillé de mesurer individuellement la tension en fonction de la fréquence dans chaque canette de l'ensemble étudié, puis de faire la moyenne des tensions à chaque fréquence. Nous avons donc refait notre expérience, mais cette fois avec un ensemble de 4 canettes, disposées en carré.

Lors d'un échange ultérieur que nous avons eu avec lui et Fabrice Lemoult à l'Institut de Physique du Globe, il nous a expliqué que le modèle des couplages de canettes ne fonctionne réellement qu'en simulation. Dans la réalité, du fait des perturbations sonores, des paramètres de la salle d'expérience, etc... il est impossible d'aboutir à des résultats aussi probants.

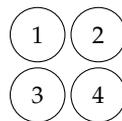


FIGURE 11 – Disposition des canettes lors du couplage horizontal à 4 canettes

Conditions expérimentales Nous avons mesuré la tension entre 346 et 446 Hz. Tous les 7 Hz, nous plaçons le microphone dans une canette. Nous attendions environ une minute pour que la canette se mette à résonner, puis nous mesurons la tension avant de changer le microphone de canette. De par la durée d'attente pour que chaque canette se mette à résonner et par le nombre de mesures faites, cette manipulation qui nous a pris un certain temps. Voici le graphe que nous avons obtenu :

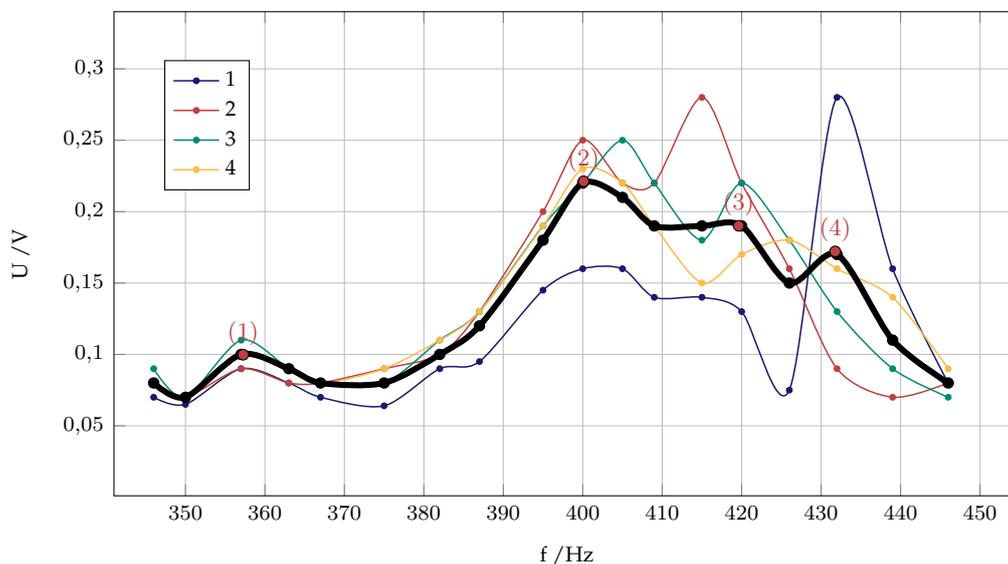


FIGURE 12 – Mesure de la résonance en fonction de la fréquence pour chacune des 4 canettes

Résultats peu probants En faisant la moyenne des résonance de chaque canette comme suggéré, quatre pics semblent à peu près se distinguer sur le graphe. Cependant, les résultats ne sont pas très probants.

Graphiques, images et schémas

1	Schéma simplifié d'un résonateur de Helmholtz.....	2
2	Spectre sonore d'un son au contact d'une canette de 33 cl et d'une boule de Noël	3
3	Méthode graphique de détermination du facteur de qualité Q.....	5
4	Photo du montage expérimental de mesure du facteur de qualité.....	6
5	Représentation schématique des différents volumes composant un résonateur	7
6	Dispositif de mesure du temps de réverbération.....	14
7	Photos des expérimentations de temps de réverbération.....	14
8	Graphiques de la tension mesurée en fonction du temps.....	15
9	Circuit électrique utilisé pour la mesure du temps de réverbération	19
10	Résonance de deux canettes couplées horizontalement puis verticalement	21
11	Disposition des canettes lors du couplage horizontal à 4 canettes	22
12	Mesure de la résonance en fonction de la fréquence pour chacune des 4 canettes.....	22

Bibliographie & Références

Valeur actuelle de l'acoustique musicale de Helmholtz

Patrice Bailhache

Revue d'histoire des sciences, 1986

Un archétype d'oscillateur : le résonateur acoustique de Helmholtz

Frédérique Bernardot, Janine Bruneaux et Jean Matricon

Bulletin de l'Union des Physiciens, 2002

Seuils d'oscillation de la clarinette : validité de la représentation exciteur-résonateur

Didier Ferrand, Fabrice Silva et Christophe Vergez

10ème Congrès Français d'Acoustique de Lyon, 2010

Les vases dits acoustiques dans les églises médiévales : un programme d'étude interdisciplinaire

Bénédictine Palazzo-Bertholon, Jean-Christophe Valière

4e Congrès International d'Archéologie Médiévale et Moderne, 2007

Experimental study of the Helmholtz resonance of a violin

Guy Vandergrift

American Journal of Physics n° 61, 1993

Quality factors and conductances in Helmholtz resonators

Michael J. Moloney

American Association of Physics Teachers, 2004

Sculpter les sons

Jean-Michel Courty et Edouard Kierlik

Pour la science n° 436, 2014

Manipuler les ondes acoustiques avec des canettes de soda

Geoffroy Lerosey, Nadège Kaina et Fabrice Lemoult

Les Conférences Expérimentales de l'ESPCI ParisTech, 23 septembre 2013

École Alsacienne - PARIS
Olympiades de Physique

29 et 30 Janvier 2016