

Utilisation des résonateurs de Helmholtz pour l'exploitation de la puissance mécanique du son

C'est en explorant YouTube que j'ai trouvé une vidéo présentant une expérience de "propulsion acoustique". Celle-ci a suscité mon intérêt, et m'a mené à étudier la théorie des résonateurs de Helmholtz.

Mon TIPE consiste à explorer la façon dont les résonateurs de Helmholtz peuvent convertir l'énergie d'une onde acoustique en énergie cinétique macroscopique. Également, celui-ci s'inscrit dans le cadre de la transition écologique, en proposant une solution permettant d'exploiter la pollution sonore dans nos villes et aéroports.

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- *PHYSIQUE (Mécanique)*
- *PHYSIQUE (Physique Ondulatoire)*
- *PHYSIQUE (Physique de la Matière)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français) Mots-clés (en anglais)

Résonateur de Helmholtz *Helmholtz resonator*

Analyse spectrale *Spectral analysis*

Fréquence propre *Natural frequency*

Moment cinétique *Angular momentum*

Dynamique des fluides *Fluid dynamics*

Bibliographie commentée

Lorsqu'un individu souffle dans une bouteille[7] ou lorsqu'une fenêtre est laissée ouverte dans une voiture roulant à grande vitesse[6], un son peut être entendu. On constate expérimentalement que ce son dépend des dimensions de la cavité et de l'embouchure considérées[3][7].

Ces propriétés motivent au XIXème siècle le physicien Hermann Von Helmholtz à établir la théorie des résonateurs portant son nom.

Le phénomène de résonance qu'il étudie intervient notamment au sein de cavités creuses munies d'un col. En effet, lorsque l'air présent dans ledit col est excité par une onde acoustique, la colonne d'air qui s'y situe se met à osciller[3][7].

Elle entre en résonance à une fréquence propre qui dépend exclusivement de la géométrie de la cavité considérée et des propriétés du gaz qui y oscille[3][7]. Helmholtz se servira donc surtout de ses résonateurs en analyse spectrale, dû à leur capacité à agir en filtres passe-bande d'ondes acoustiques[3].

Il faut en effet attendre la deuxième moitié du XIXème siècle pour que l'intérêt mécanique du dispositif soit découvert.

En 1878, de manière indépendante, le croate Vinko Dvorak et l'Américain Alfred Marshall Mayer[4] constatent l'apparition d'effets de non linéarité lorsque l'amplitude des oscillations au sein des résonateurs est trop forte[5]. Ils l'illustrent par le dispositif du « moulin à son »[4], lequel présage des applications en mécanique.

La conséquence principale de ces effets est l'éjection périodique rapide de jets d'air[1], laquelle propulse les résonateurs à la manière d'une fusée[2].

En effet, lorsque la pression acoustique est assez importante, le flux d'air qui passe au travers du col des résonateurs devient assez élevé pour que les hypothèses initiales de Helmholtz ne soient plus applicables. En conséquence, à chaque oscillation, une partie de l'air contenue dans le col des résonateurs est propulsée hors du système, dans l'axe de leurs embouchures[2][1]. L'air éjecté est alors immédiatement remplacé par de l'air qui entre quant à lui dans le col par toutes les directions.

À l'aube du XXème siècle, dans sa *Théorie des sons*, Lord Rayleigh concilie le théorie de Helmholtz avec ces découvertes[2]. En effet, il établit que les phénomènes susmentionnés engendrent une différence de pression moyenne non nulle entre l'intérieur et l'extérieur des résonateurs, laquelle se traduit par l'apparition d'une force s'exerçant sur ceux-ci à la manière de la poussée sur une fusée[2].

Plus tard, en 1992, Ricardo R. Boullosa et Felipe Orduña-Bustamante proposent un dispositif pour étudier la force qui s'applique sur les résonateurs de Helmholtz exposés à une pression acoustique importante, par analogie avec un poids. Ils révèlent ainsi un lien de proportionnalité entre cette force et la pression acoustique environnante[5].

Problématique retenue

Comment peut-on exploiter les propriétés mécaniques des résonateurs de Helmholtz pour produire un mouvement exploitable à l'échelle macroscopique à partir d'une onde sonore ?

Objectifs du TIPE du candidat

L'objectif du TIPE est double :

- 1) D'une part, il s'agit de mettre en oeuvre un mécanisme simple, construit avec les moyens du bord, qui permet de transformer la puissance acoustique du son en puissance mécanique macroscopique.
- 2) D'autre part, il s'agit, par l'expérience, de mettre en évidence certaines propriétés des résonateurs de Helmholtz qui vont à l'encontre des modélisations classiques du phénomène, puis de proposer une modélisation alternative qui tient compte des résultats expérimentaux.

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

- [1] KARL UNO INGARD : Notes on Acoustics : *Infinity Science Press, 2008*
- [2] LORD RAYLEIGH : The Theory of Sound, Volume II, Second Edition : *Macmillan, 1896*
- [3] HERMANN VON HELMHOLTZ : On the sensations of tone as a physiological basis for the theory of music : *Longmans, Green & Co., original de 1877, traduction d'Alexander John Ellis, 1885*
- [4] VINKO DVORAK : On acoustic repulsion : 1878, *American Journal of Science, s3-16(91)*
- [5] RICARDO R. BOULLOSA, FELIPE ORDUÑA-BUSTAMANTE : The reaction force on a Helmholtz resonator driven at high sound pressure amplitudes : 1992, *American Journal of Physics, 60(8)*
- [6] JOHN PEARLEY HUFFMAN : Explained: That Weird Throbbing When You Open One Car Window : <https://www.caranddriver.com/news/a15344069/explained-that-weird-throbbing-when-you-open-one-car-window/>, lu le 9 octobre 2024
- [7] WIKIPÉDIA : Bouteille (instrument de musique) : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Bouteille_\(instrument_de_musique\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Bouteille_(instrument_de_musique)), lu le 9 octobre 2024

Références bibliographiques (ÉTAPE 2)

- [1] L. LIU ET AL. : An Ultra-high Power Density Helmholtz Resonance Acoustic Energy Converter Based on Triboelectric Nanogenerator : 2021, *IEEE 16th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*

DOT

- [1] : Avril 2024 : Visualisation d'une vidéo au sujet des résonateurs de Helmholtz sur YouTube. Celle-ci m'a permis de découvrir leurs propriétés surprenantes

- [2] : *Septembre - Novembre 2024 : Compréhension de la théorie des résonateurs de Helmholtz et rédaction de premières démonstrations*
- [3] : *Novembre 2024 : Réalisation d'un protocole expérimental permettant de vérifier les propriétés des résonateurs de Helmholtz*
- [4] : *Décembre 2024 : Premières mesures de fréquences propres, sur des bouteilles obtenues dans le commerce*
- [5] : *Janvier 2025 : Échecs successifs. Je ne parviens pas à obtenir de mouvement concluant, ce qui m'amène à réévaluer la fidélité fréquentielle de mes haut-parleurs*
- [6] : *Février 2025 : Réussite de l'expérience et mise en place du programme de pointage pour son exploitation*
- [7] : *Mai 2025 : Réalisation des schémas et courbes pertinentes pour la présentation, exploitation informatique des résultats*