

*



FACULTÉ
DES SCIENCES

Projet printemps des sciences

PHYS-F210

Lévitacion acoustique

Auteurs

Sami	ABDUL SATER
Maximilien	DECROIX
Anaïs	DEFOSSEZ
Raphaël	DEKNOP
Nicolas	MOLLER
Estelle	VENERI

Année académique 2020-2021

1 Introduction

Notre projet consiste en la lévitation acoustique ; nous avons mis en place un dispositif qui permet de faire léviter de petits objets au moyen d'ondes acoustiques.

Nous discuterons des lois physiques qui en seraient la cause, et nous décrirons l'expérience qui a été conçue afin de mettre en évidence ce phénomène.

Notons que, malgré que l'on emploie des ondes *sonores*, nous n'entendons rien à cause des fréquences utilisées qui sont trop élevées pour être perçues par l'humain.

2 De la physique dans la lévitation acoustique

Quels sont les notions physiques que nous aborderons pour expliquer la lévitation acoustique ?

Pour qu'un objet puisse être lévité et en équilibre au dessus d'une surface, il faut nécessairement que la résultante des forces qui s'appliquent sur l'objet soit nulle par la **2ème loi de Newton**. Les forces qui s'appliquent sur le corps en lévitation sont le poids de cet objet $m\vec{g}$, et il faut alors une autre force dirigée dans le sens opposé et de même norme, qui sera la **force de pression de l'air** due à des ondes acoustiques afin de contrer le poids.

Pour comprendre l'origine de cette force, nous allons introduire les notions suivantes :

- les ondes mécaniques
- les ondes stationnaires, les interférences
- force de pression

Onde mécanique : Une perturbation d'un milieu matériel va se propager de proche en proche dans le milieu, en faisant un transfert d'énergie (et non de matière!). Ce phénomène de propagation est en fait ce qu'on appelle une **onde mécanique**. Nous pouvons par exemple perturber les molécules d'air en générant des vibrations (battement d'aile, frottement,...), ce qui va faire osciller les molécules d'air autour de leur position d'équilibre. La propagation de ce type de perturbation est appelé onde sonore, faisant en fait référence au son que l'on entend. De manière un peu plus mathématique, on peut modéliser une onde sonore dans sa forme la plus simple, par une fonction sinusoïdale :

$$\psi(x, t) = \cos(\omega t \pm kx)$$

où $\omega = 2\pi f \equiv$ la pulsation ; $f \equiv$ la fréquence ; $k = \frac{2\pi}{\lambda} \equiv$ le nombre d'onde ; $\lambda \equiv$ longueur d'onde ; et l'on écrit \pm car le signe dépend simplement du sens de propagation de l'onde.

La vitesse de propagation de l'onde se trouve par : $v = \lambda f = \frac{\omega}{k}$.

Onde stationnaire : Lorsque deux ondes de *mêmes fréquences* se rencontrent, elles vont pouvoir interagir ; ce phénomène d'interactions entre deux ondes est ce qu'on appelle une interférence. En particulier, si elles se propagent dans des sens opposés, il peut y avoir des interférences qui vont donner lieu à des **ondes stationnaires**. On peut donc construire une fonction pour l'onde stationnaire comme étant la somme de deux ondes sinusoïdales se propageant dans des sens opposés, ce qui se traduit simplement par : $\psi(x, t) = \cos(\omega t - kx) + \cos(\omega t + kx)$. Ces ondes stationnaires possèdent la particularité d'avoir des points fixes (d'où le nom de *stationnaires*), appelés **noeuds de pression**, ainsi que des zones où l'amplitude de l'onde est maximale, appelées **ventres de pression**.

La distance entre un noeud et un ventre est de $d_{noeud-ventre} = \frac{\lambda}{4}$.

Force de pression : La pression est l'équivalent d'une force par unité de surface. Ainsi, la force qu'exerce les molécules d'air par unité de surface dans notre atmosphère définit la pression atmosphérique. Des perturbations dans l'air font vibrer les molécules d'air autour de leur position d'équilibre, et il en résulte ainsi une succession de compression et de dépression des molécules d'air en se propageant. La propagation d'une onde acoustique provoque ainsi de petites variations de la pression atmosphérique.

Il est possible de montrer que la force F exercée par une onde acoustique stationnaire sur un objet lévité, de rayon r_s est :

$$F = 8\pi k r_s^3 E \sin(2kh) \phi\left(\frac{\rho_0}{\rho_s}\right)$$

Cette équation paraît très compliquée mais nous ne nous y attarderons pas ; retenons simplement que la force agissant sur l'objet est proportionnelle au nombre d'onde (et donc la fréquence puisque $k = \frac{2\pi f}{v}$) ; c'est

d'ailleurs pour cette raison que nous utilisons des ultrasons (ondes sonores de hautes fréquences $\approx 40kHz$) pour notre expérience.

3 Expérience

3.1 Description de l'expérience

Afin de parvenir à léviter un objet, nous avons besoin de cette force de pression engendrée par des ondes stationnaires acoustiques. Ainsi, on peut en déduire que d'une part, l'expérience fait intervenir des ondes acoustiques, et d'autre part, nécessite la formation d'une onde stationnaire.

Pour ce faire, nous avons principalement besoin du matériel suivant :

- des *transducteurs émetteurs ultrason* ; ce sont des composants qui transforment le signal électrique délivré par le Driver à une certaine fréquence en une onde acoustique à cette même fréquence.
- un *arduino UNO* ; micro-processeur préalablement programmé, qui envoie un signal électrique dès qu'il est alimenté
- un *Driver* ; composant qui amplifie le signal reçu par l'arduino UNO, et qui le transfère ensuite jusqu'aux transducteurs
- une *batterie ou un adaptateur* ; sert d'alimentation externe de 9V pour le Driver

Ainsi, en mettant deux transducteurs alimentés de la même manière, donnant donc des ondes de même fréquence l'un en face de l'autre à une distance L , il peut se former une onde stationnaire ; et cette distance L doit être un multiple de la distance $d_{noeud-ventre}$ (*i.e.* $L = (2n)\frac{\lambda}{4}$ ou $L = (2n + 1)\frac{\lambda}{4}$, avec n un entier naturel).

Nous avons fait l'expérience une première fois avec uniquement 2 transducteurs suivant ce schéma, et ensuite avec 72 transducteurs que l'on dispose sur un support qui nous permet d'avoir 36 transducteurs l'un en face de l'autre.

Il est important que la position des transducteurs soit stable durant l'expérience, autrement les ondes pourraient ne pas interférer correctement.

L'expérience aurait éventuellement pu être effectuée avec une source d'onde acoustique d'un côté, et avec une surface réfléchissante de l'autre, et non avec 2 sources d'onde. De cette manière, une onde stationnaire aurait résulté de l'interférence entre l'onde émise et l'onde réfléchi par la surface.

3.2 Résultats

Maintenant que nous avons brièvement décrit notre expérience, ainsi que les aspects physiques de la lévitation acoustique, nous allons discuter des résultats que nous avons obtenu en faisant cette expérience.

Taille et masse des objets lévités : La taille d'un objet ne doit avant tout pas dépasser une demi longueur-d'onde, autrement une trop grande surface de l'objet se retrouvait dans les ventres de pression, là où la pression varie le plus fortement, et perdrait ainsi de la stabilité. Dans notre cas, la taille de l'objet ne pouvait donc dépasser les $4mm$. Nous avons remarqué que les objets les plus facilement lévités étaient des boules de frigolites (de polystyrène) ; de manière plus générale, il nous fallait en fait des petits objets sphériques de masse volumique très faible. Pour une même dimension (environ $3mm$ de diamètre), une bille de polystyrène de masse volumique de $1,05 \text{ g.cm}^{-3}$ pouvait être lévité, alors que la bille en acier de masse volumique de $7,85 \text{ g.cm}^{-3}$ ne pouvait pas.

Distance entre les noeuds de pression : La fréquence utilisée f étant de : $f = 40 \text{ kHz}$, nous pouvions estimer que la longueur d'onde associée, dans une pièce chauffée à température ambiante (à 25°C environ) : $\lambda = \frac{v_{son}}{f} = 0,0086 \text{ m}$, où $v_{son} \approx 346 \text{ m.s}^{-1}$ dans l'air à 25°C . En mesurant la plus distance qui séparait deux objets lévités, l'un au dessus de l'autre, ce qui revient à mesurer la distance entre deux noeuds, nous avons eu que : $d_{noeud-noeud} = 0,41 \text{ cm} = 2d_{noeud-ventre} = \frac{\lambda}{2}$. Nous avons donc bien vérifié le fait que $d_{noeud-ventre} = \frac{\lambda}{4}$.

Une dernière chose qui a pu être expérimentée, est qu'en changeant la phase d'une onde (grâce au driver qui contient un moteur pour les transducteurs du dessus, et un autre pour ceux du dessous), tout en maintenant la phase de l'autre onde constante, il était possible de faire monter ou descendre le petit corps en lévitation !