

# Projet lévitation acoustique

Gessay Anaïs, Manouvrier Julie, Mabika Pavel

## 1. Sommaire

|                                                        |          |
|--------------------------------------------------------|----------|
| <b>1. Sommaire.....</b>                                | <b>1</b> |
| <b>2. Introduction.....</b>                            | <b>2</b> |
| <b>3. Étude Théorique.....</b>                         | <b>2</b> |
| <b>4. Cahier des Charges Technique.....</b>            | <b>3</b> |
| <b>5. Conception et Montage.....</b>                   | <b>4</b> |
| Socle.....                                             | 4        |
| Electronique.....                                      | 5        |
| L'Arduino Uno.....                                     | 5        |
| L'amplificateur.....                                   | 6        |
| Transducteur.....                                      | 6        |
| Le câblage des 72 transducteurs.....                   | 6        |
| Schéma du câblage du circuit.....                      | 6        |
| <b>6. Organisation.....</b>                            | <b>7</b> |
| <b>7. Protocole Expérimental.....</b>                  | <b>8</b> |
| <b>8. Analyse des risques et problèmes.....</b>        | <b>9</b> |
| 1. Optimisation des coûts et choix fréquentiel.....    | 9        |
| 2. Adaptation géométrique et dimensionnement.....      | 9        |
| 3. Gestion de l'environnement sonore.....              | 9        |
| 4. Rigidité structurelle et coaxialité.....            | 9        |
| 5. Dispersion des caractéristiques des composants..... | 9        |
| 6. Sensibilité aux conditions thermodynamiques.....    | 9        |

## 2. Introduction

Le but principal de ce projet est de construire un lévitation acoustique à l'aide de documents trouvés sur internet. Nous allons ensuite étudier ses caractéristiques.

**Problématique :** Comment maintenir un objet en équilibre stable contre la gravité en utilisant uniquement la pression acoustique ?

**Objectifs :** Réaliser un montage fonctionnel capable de faire léviter des gouttes d'eau.

### Principe :

Nous allons créer une onde stationnaire en générant plusieurs ondes de sens opposé, les ondes montantes et descendantes se superposent pour former l'onde stationnaire. Le son étant une onde de compression, l'onde stationnaire va créer de grandes différences de pression. Ainsi un petit objet pourra se retrouver à léviter grâce à la force de pression. Plus la fréquence choisie est élevée, plus l'objet doit être petit.

## 3. Étude Théorique

**Principe de l'onde stationnaire :** Une onde stationnaire est une somme d'onde propagative de sens opposé en phase. Celle-ci semble vibrer sur place, ainsi cela permet de créer des trous de pressions constants.

**Condition de lévitation :** Force de pression supérieure à la force de gravitation

**Contraintes de taille :** L'objet en lévitation doit être inférieur en taille à la moitié de la longueur d'onde :  $taille < \lambda/2$

Note : À **20 kHz**,  $\lambda \sim 17$  mm. Donc un objet en lévitation sera d'environ **8mm**.

| Fréquence (f) | Longueur d'onde ( $\lambda$ ) | $\lambda/2$ (Distance inter-nœuds) | Mode (n) | Distance (d) & Rayon (R) idéaux |
|---------------|-------------------------------|------------------------------------|----------|---------------------------------|
| 20 kHz        | $\approx 16,9$ mm             | 8,45 mm                            | 3        | 25,35 mm                        |
| 20 kHz        | $\approx 16,9$ mm             | 8,45 mm                            | 4        | 33,80 mm                        |
| 20 kHz        | $\approx 16,9$ mm             | 8,45 mm                            | 5        | 42,25 mm                        |
| 40 kHz        | $\approx 8,57$ mm             | 4,28 mm                            | 7        | 29,96 mm                        |
| 40 kHz        | $\approx 8,57$ mm             | 4,28 mm                            | 8        | 34,24 mm                        |
| 40 kHz        | $\approx 8,57$ mm             | 4,28 mm                            | 9        | 38,52 mm                        |

Selon la fréquence choisie, la taille du lévitateur va changer. Pour une fréquence plus grande, le lévitateur sera plus petit avec un mode plus grand. Le mode correspond au nombre de points de pression où l'on peut déposer un petit objet. A 20kHz, on pourra en déposer moins mais de plus grande taille.

## 4. Cahier des Charges Technique

### matériel utilisé :

- **Transducteurs** : transforme le signal électrique délivré par drivers à une certaine fréquence en une onde acoustique a cette même fréquence.
- **Carte Arduino** : microprocesseur qui envoie un signal électrique dès qu'il est alimenté.
- **Amplificateur** : composant qui amplifie le signal reçu par l'arduino uno et qui le transfère ensuite jusqu'aux transducteurs.
- **fils de câblage**
- **interrupteur**
- **Alimentation**
- **Socle + plaque**

### Coût :

| matériel             | choix                                             | prix     | URL                                                                                                                                                                                                                                                               | coût total |
|----------------------|---------------------------------------------------|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Transducteur<br>(80) | Plastique<br>40kHz                                | 90,00 €  | <a href="#">MCUSD16P40B12RO MULTICOMP PRO, TRANSCIEVER, 40KHZ, 16MM   Farnell® France</a>                                                                                                                                                                         | 138,00 €   |
|                      | Alu 40kHz                                         | 160,00 € | <a href="#">MCUSD16A40S12RO MULTICOMP PRO, CAPTEUR, ULTRASONIC, 700MM-18M   Farnell® France</a>                                                                                                                                                                   | 206,00 €   |
|                      | 20kHz                                             | 54,00 €  | <a href="#">KECG2740PBJ KINGSTATE, Microphone, Electret, Omnidirectionnel   Farnell® France</a>                                                                                                                                                                   | 102,00 €   |
| carte Arduino        | A000073ARDUINO UNO CMS, KIT DE DEV                | 20,00 €  | <a href="#">A000073 ARDUINO, ARDUINO UNO CMS, KIT DE DEV   Farnell® France</a>                                                                                                                                                                                    |            |
| Amplificateur        | 105990007DEVELOPMENT BOARD, H-BRIDGE MOTOR DRIVER | 21,00 €  | <a href="https://www.google.com/search?q=https://fr.farnell.com/seeed-studio/105990007/development-board-h-bridge-motor/dp/4060368">https://www.google.com/search?q=https://fr.farnell.com/seeed-studio/105990007/development-board-h-bridge-motor/dp/4060368</a> |            |
| fils de câblage      |                                                   | 2,00 €   |                                                                                                                                                                                                                                                                   |            |

|               |  |        |                                                                                                                                                                                             |
|---------------|--|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| interrupteur  |  | 2,00 € | <a href="https://fr.farnell.com/multicomp-pro/mp004645/commut-bascule-spdt-5a-120vac/dp/3489599">https://fr.farnell.com/multicomp-pro/mp004645/commut-bascule-spdt-5a-120vac/dp/3489599</a> |
| Alimentation  |  | 1,00 € |                                                                                                                                                                                             |
| socle/ plaque |  | 2,00 € |                                                                                                                                                                                             |

**Critères à essayer de réussir :**

- Capacité à maintenir un objet pendant au moins 30 secondes sans chute.
- Socle amovible

## 5. Conception et Montage

### Socle

**La hauteur d** du lévitateur doit suivre la formule telle que :  $d = n \cdot \lambda / 2$  (n = mode)

**Le rayon de courbure** permet de faire converger l'énergie en un point. Toutes les ondes acoustiques partant de la surface du transducteur arrivent au même moment au point focal. Au lieu d'avoir une pression uniforme, cela crée un point de pression très intense. C'est cette surpression qui permet de soulever des objets un peu plus lourds ou de stabiliser la goutte malgré les courants d'air dans la pièce. Il faut choisir un rayon ni trop petit, car le point de lévitation serait collé au transducteur, ni trop grand car l'énergie serait trop diluée.

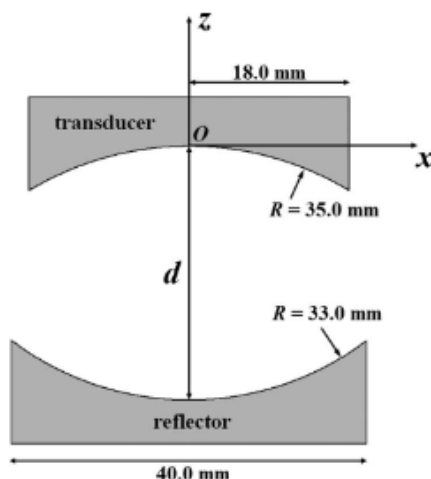


FIG. 1. Geometry of the levitation cavity.

Dans le cas d'un **transducteur avec un réflecteur** (comme imagé), le rayon de courbure du réflecteur doit être un peu plus petit pour recentrer les rayons qui se diffracte un peu

Ici nous n'utilisons pas de réflecteur mais **2 plaques de transducteurs**. Ainsi les rayons de courbures doivent être identiques. Il faut que les deux fronts d'onde soient parfaitement en "miroirs" l'un de l'autre.

**Modélisation 3D** : Les modèles en ligne trouvés sont pour des lévitateurs de 40kHz. Si nous voulons en faire un de 20kHz, il faut donc re-modéliser un socle.

- Les dimensions pour un socle de 40kHz selon les différents mode :

| Fréquence (f) | Longueur d'onde ( $\lambda$ ) | $\lambda/2$ (Distance inter-nœuds) | Mode (n) | Distance (d) & Rayon (R) idéaux |
|---------------|-------------------------------|------------------------------------|----------|---------------------------------|
| 40 kHz        | ≈8,57 mm                      | 4,28 mm                            | 7        | 29,96 mm                        |
| 40 kHz        | ≈8,57 mm                      | 4,28 mm                            | 8        | 34,24 mm                        |
| 40 kHz        | ≈8,57 mm                      | 4,28 mm                            | 9        | 38,52 mm                        |

- les dimensions pour un socle de 20kHz :

| Fréquence (f) | Longueur d'onde ( $\lambda$ ) | $\lambda/2$ (Distance inter-nœuds) | Mode (n) | Distance (d) & Rayon (R) idéaux |
|---------------|-------------------------------|------------------------------------|----------|---------------------------------|
| 20 kHz        | ≈16,9 mm                      | 8,45 mm                            | 3        | 25,35 mm                        |
| 20 kHz        | ≈16,9 mm                      | 8,45 mm                            | 4        | 33,80 mm                        |
| 20 kHz        | ≈16,9 mm                      | 8,45 mm                            | 5        | 42,25 mm                        |

## Electronique

Avec deux plaques de transducteurs, le plus grand défi n'est plus la géométrie, mais la synchronisation électronique. Le rôle de l'électronique est de transformer le courant continu en un signal alternatif puissant. Pour créer une onde stationnaire, les deux plaques doivent vibrer à la même fréquence exacte, mais avec une relation de phase constante.

Le flux d'énergie suit ce chemin :

**Alimentation (9V-12V) → Amplificateur → Transducteurs**

*L'Arduino, commande l'amplificateur avec un signal de faible puissance (5V).*

## **L'Arduino Uno**

Il génère un signal carré à 20,3 kHz. Le driver a besoin d'un signal de commande pour savoir à quelle vitesse ouvrir et fermer les vannes de courant. Nous devons coder cette carte pour avoir une phase constante entre les deux côtés du Léviteur.

Comme il y a deux plaques (Haut et Bas), l'Arduino doit envoyer deux signaux. Pour que l'onde stationnaire se forme bien au milieu :

- Signal A (Plaque du **haut**) : 5V — 0V — 5V — 0V
- Signal B (Plaque du **bas**) : 0V — 5V — 0V — 5V

**À la sortie de l'Arduino** : signal carré de commande 0-5V/ 0,02A.

## L'amplificateur

Il permet d'envoyer un signal alternatif puissant aux transducteurs en suivant les commandes de la carte Arduino. Il prend le 12V de l'alimentation et l'envoie aux transducteurs en alternant le sens du courant.

**À la sortie de l'amplificateur :** Un signal carré de forte puissance (0-12V/ 2A).

## Transducteur

Le signal de sortie est un signal carré. Les transducteurs piézoélectriques vont filtrer naturellement les harmoniques pour ne vibrer qu'à leur fréquence de résonance.

Les transducteurs reçoivent le 12V de l'amplificateur et le transforment en vibration mécanique

## Le câblage des 72 transducteurs

**Montage en Parallèle ( soudure ) :** Pour chaque plaque de 36 transducteurs, tous les "+" sont reliés ensemble et tous les "-" ensemble. Il faut faire attention à ce que les masses soient bien reliées entre elles

**Phase :** Il est important que les 36 transducteurs soient en phase sur chacune des plaques.

## Schéma du câblage du circuit

### 9 – Driving Board circuit.

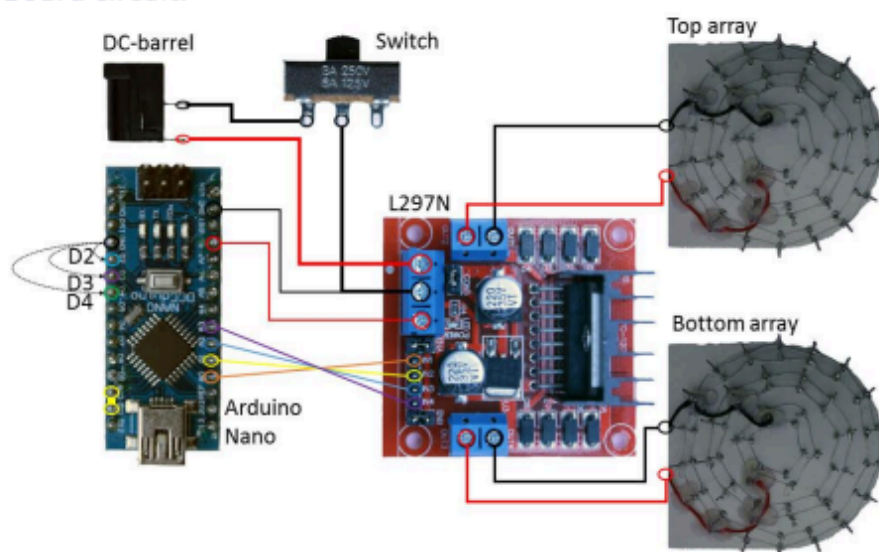


**Figure 9.1. Schematic of the driving circuit. The main components are an Arduino Nano and a motor driver L278N. It can generate two driving signals and their relative phase is controlled by connecting ground to D2 or D3 in the Arduino Nano (D4 resets to the starting position).**

## 6. Organisation

Ce projet de lévitation acoustique est réalisé sur l'ensemble du semestre. Afin d'assurer une progression cohérente, nous allons structurer notre travail en plusieurs phases successives.

### Répartition des rôles dans le groupe :

Afin d'assurer une progression efficace du projet, nous avons réparti les tâches selon les préférences de chacun :

- **Anaïs** : Recherche théorique et étude de la conception/ montage.
- **Julie** : Élaboration du protocole expérimental, réflexion sur les tests et les mesures.
- **Pavel** : Organisation générale du projet.

### Déroulement du projet sur le semestre :

Le travail est organisé en différentes phases, correspondant à l'avancement du semestre :

#### 1. Phase de recherche et compréhension

- Étude du principe de la lévitation acoustique.
- Choix de la fréquence (20 kHz).
- Analyse des contraintes techniques.

#### 2. Phase de conception

- Modélisation 3D du socle adapté au 20 kHz.
- Préparation du câblage des 72 transducteurs.
- Début de la programmation Arduino (signaux déphasés pour créer l'onde stationnaire).

#### 3. Phase de montage

- Assemblage mécanique du dispositif.
- Soudure et mise en parallèle des transducteurs.
- Programmation de l'arduino
- Ajustements mécaniques.

#### 4. Phase expérimentale

- Mise en place du protocole expérimental.
- Vérification de la formation des nœuds.
- Tests de lévitation.
- Ajustements techniques.

## 7. Protocole Expérimental

**Combien de nœuds pouvons nous créer ?** Le nombre de nœuds est lié au mode fondamental. Par exemple au mode  $n=1$  il n'y a aucun nœud. Au mode  $n=2$  il y a un seul nœud, donc un seul point de lévitation. Puis au mode  $n=3$  il y a 2 nœuds, et ainsi de suite.

Afin de faire varier le nombre de nœuds, nous pouvons allonger le dispositif : il faudrait ainsi le créer de sorte à ce qu'il puisse être réglable en hauteur. Nous pourrions aussi changer la fréquence d'excitation, ce qui est impossible au vu du matériel choisi. Ou alors, nous pouvons varier la vitesse de l'onde au moyen d'une modification du milieu (température ambiante).

La modification du nombre de nœuds est corrélée à la mesure suivante.

**Est ce que le nombre de nœuds influe sur la taille de l'objet lévitant ?** La théorie prévoit qu'augmenter le nombre de nœuds implique une taille d'objet diminuée.

En effet,  $L = n \frac{\lambda}{2}$  avec  $L$  la hauteur du dispositif,  $\lambda$  la longueur d'onde de l'onde et  $n$  le mode (donc lié au nombre de nœuds). Or nous avons vu que : *taille de l'objet*  $< \lambda/2$ .

**Mesure de la distance inter-nœuds :** La théorie prévoit que la distance inter-nœuds est égale à la moitié de la longueur d'onde. Nous allons vérifier cela expérimentalement.

**Test de charge maximale :** Quelle est la masse maximale qu'une goutte ou une bille peut avoir avant de tomber ?

**Test volume maximal :** Quel est le volume maximal de l'objet lévitant (en le considérant sphérique) ? Nous avons vu que *taille de l'objet*  $< \lambda/2$ , mais cela se réfère t'il au diamètre, au rayon, au volume... ?

**Influence de la forme de l'objet lévitant :** Plusieurs tests de volumes et masses ont été réalisées sur des objets lévitant sphériques (goutte d'eau, bille de polystyrène...). Pouvons nous faire léviter des objets de forme cubiques, planes, irrégulières ?

**Mesure de la vitesse du son :** En utilisant la distance inter-objet et la fréquence nous pouvons mesurer la vitesse de l'onde sonore avec la formule  $v = f\lambda$ . Il faudra donc mesurer  $\lambda$  et utiliser la fréquence  $f$  de l'onde excitatrice afin de calculer la vitesse de l'onde sonore.

La théorie prévoit que la vitesse de l'onde sonore dépend de la température du milieu, paramètre que nous pourrions aussi mesurer.

## 8. Analyse des risques et problèmes

### 1. Optimisation des coûts et choix fréquentiel

Le coût unitaire des transducteurs constitue le principal poste de dépense. Pour respecter notre enveloppe budgétaire tout en conservant une efficacité optimale, nous avons opté pour une fréquence de **20 kHz**.

Ce choix impose une modification structurelle car la majorité des ressources en open-source sont dimensionnées pour du **40 kHz**.

### 2. Adaptation géométrique et dimensionnement

Le passage de 40 kHz à 20 kHz double la longueur d'onde. Les modèles 3D standards ne sont donc plus adaptés. Nous devons recalculer et redessiner :

- **Le rayon de courbure (R)** des matrices pour assurer un point de focalisation.
- **La distance inter-plaques (D)** pour garantir la résonance selon les modes de l'onde stationnaire.

### 3. Gestion de l'environnement sonore

Une fréquence de 20 kHz se situe à la limite supérieure de l'audition humaine. L'émission peut générer une gêne auditive. Il sera peut être important de réfléchir à créer un caisson d'isolation phonique.

### 4. Rigidité structurelle et coaxialité

La lévitation repose sur un alignement parfait des forces acoustiques. Deux problèmes majeurs de précision émergent :

- **Coaxialité** : Si les centres optiques des deux plaques de transducteurs ne sont pas parfaitement alignés, la lévitation devient impossible.
- **Résonance du châssis** : La structure doit être rigide. Si le socle entre lui-même en résonance avec les transducteurs, les vibrations parasites briseront la stabilité du champ de pression et ainsi un problème de coaxialité.

### 5. Dispersion des caractéristiques des composants

L'incertitude de fabrication des transducteurs est un facteur de risque. Si les fréquences de résonance individuelles des 72 composants diffèrent trop, l'onde résultante perdra en cohérence. Un tri préalable devra être fait.

### 6. Sensibilité aux conditions thermodynamiques

Il existe un écart non négligeable entre la théorie et la réalité lié à la vitesse du son. Celle-ci est dépendante de la température de l'air :

- **Température élevée** : La vitesse augmente, donc  $\lambda$  s'allonge.
- **Température basse** : La vitesse diminue, donc  $\lambda$  raccourcit.