

**Rapport bibliographique de projet**

***Année scolaire 2020-2021***

***″Laser Speaker : tourelle à ondes sonores unidirectionnelles″***

**Etudiants : Samuel Bronstun, Alix Coin**

**Encadrants : Pascal Masson**

Ecole Polytechnique Universitaire de Nice Sophia-Antipolis, Département électronique

1645 route des Lucioles, Parc de Sophia Antipolis, 06410 BIOT

**SOMMAIRE**

Introduction 7

Chapitre I : L'acoustique 8

I.1. Principes de la propagation du son 8

I.2. Appareils préexistants 8

I.3. Modulation et démodulation des ondes sonores 8

Conclusion 11

Bibliographie 12

Annexe A 13

# 

# Introduction

Le but de ce projet est de créer une tourelle sur laquelle est monté un haut-parleur unidirectionnel. La tourelle est libre de tourner sur elle-même autour de la verticale à plus de 360°, et sa « tête » (le haut-parleur) peut s’incliner à 90° de haut en bas. C’est-à-dire que le haut-parleur peut être pointé vers n’importe quelle direction autour de la tourelle.

Les mouvements de la tourelle sont contrôlés à distance via [ ? Bluetooth ?] par l’utilisateur. [ ? La tourelle peut aussi régler sa direction automatiquement vers une source chaude, et la suivre, grâce à un capteur thermique ?].

Le haut-parleur unidirectionnel permet de reproduire un signal sonore envoyé à distance [ ? en Bluetooth ?] par l’utilisateur. [ ? Il permet aussi de faire converger ce signal sonore à une certaine distance , définie par l’utilisateur, de la tourelle ?].

[ ? De plus, la tourelle possède un haut-parleur omnidirectionnel « classique » statique, dont le son peut être atténué dans certaines directions grâce au haut-parleur unidirectionnel mobile ?]

## Plan du projet :

Le projet peut être divisé en plusieurs parties :

* Acoustique : la théorie derrière le son directionnel, les applications déjà existantes, [ ? la théorie de l’atténuation acoustique active ?]
* Mécanique : les différents types de moteurs, le contrôle des moteurs
* Software : le traitement du signal sonore, l’implémentation du contrôle des moteurs, [ ? la liaison Bluetooth ?], [ ? le suivi de source chaude ?],

# Chapitre I : L’acoustique

## I.1. Principes de la propagation du son

Le son, comme la lumière, se propage sous forme d’ondes. Ces ondes sont caractérisées par leur fréquence, leur amplitude et leur phase. Les ondes sonores émises par une source ne se propagent pas uniquement en ligne droite, mais divergent par rapport à la normale à la surface de la source avec un certain angle. Dans le cas des hauts-pareur « classique », cet angle est très grand et l’on a donc tendance à penser que le son se propage comme la lumière d’une ampoule (et pas comme un LASER).

L’équation qui donne la pression sonore en un point ***A*** à une distance *r* d’une source linéaire de longueur *d*, qui émet une onde sonore de longueur est :

[Beranek’54]

avec *P* la pression en ***A***, l’angle entre ***A*** et la normale,

la pression à la distance *r* de la source à un angle =0

On donne le graphe de *P*() sur [-; ] pour *d* = 0.5m et = 1

Fig.1 = 8.575m , correspond à une onde de 40Hz

Fig.2 = 0.008575m , correspond à une onde de 40kHz

( pour la vitesse du son dans l’air égale à 343m/s )

Graphical user interface, chart, application, table

Description automatically generated

**Figure I.1.** *P*() *pour 40Hz graphe Xcas*

*Chart, shape

Description automatically generated***Figure I.2.** *P*() *pour 40kHz, le pic autour de =0 est très prononcé graphe Xcas*

On caractérise la directivité d’un émetteur par l’angle maximum pour lequel la pression sonore à une certaine distance de l’émetteur ne baisse pas à plus d’un certain nombre de décibels (souvent -3dB ou -6dB).

On observe dans Fig.1 que la pression sonore est la même 180° autour de l’émetteur, celui-ci est donc omnidirectionnel. En revanche, Fig.2 montre un net pic au voisinage de 0°, le reste de la courbe étant nulle. Cet émetteur est unidirectionnel : la pression sonore est approximativement nulle partout sauf directement en face de celui-ci.

La représentation sur un graphe à coordonnées polaires, avec *p*() = *P*() la distance de chaque point du graphe avec l’origine, permet d’avoir une représentation géométrique de la distribution de la pression par rapport à l’angle. On se place cette fois sur ∈ [; ] (c’est-à-dire 360° autour de l’émetteur)

Chart

Description automatically generated**Figure I.3.** *P*() *pour 40Hz, la pression est la même tout autour de l’émetteur graphe Xcas*

Chart, calendar

Description automatically generated**Figure I.4.** *P*() *pour 40kHz, la pression est concentrée dans la direction graphe Xcas*

*normale à l’émetteur*

Chart, diagram

Description automatically generated

**Figure I.5.** *P*() *pour 2kHz, on observe la formation de « lobes » graphe Xcas*

Fig.3, 4 et 5 montrent qu’a basse fréquence, la pression est répartie de façon globalement circulaire autour de l’émetteur, mais lorsque la fréquence augmente, on observe l’apparition de « lobes » secondaires, en plus du principal : le principal tend à s’allonger dans la direction normale à l’émetteur, et les secondaires raccourcissent et tendent à s’orienter selon le principal.

Cette équation, utilisée pour caractériser la pression produite par un émetteur linéaire de longueur *d*, peut être généralisé à un émetteur plan de surface *a* = *d* 2.

Le critère principal pour créer un émetteur unidirectionnel est donc le ratio entre la surface de l’émetteur *a* et la longueur d’onde du signal sonore : lorsque *a* / augmente, la directivité de l’émetteur s’améliore.

La plage des fréquences audibles pour l’homme est approximativement de 20Hz à 20kHz, un émetteur unidirectionnel produisant un signal sonore sur cette plage de fréquence serait trop grand pour être réalisable et transportable facilement. Il est donc nécessaire d’envoyer un signal sonore composé d’ultrasons. Or, les ultrasons, étant en dehors de la plage de fréquence audible, sont par définition inaudibles. Il semblerait donc que notre appareil soit impossible à créer.

## I.2. Appareils préexistants

Pourtant, d’autres appareils fonctionnant sur le même principe ont déjà été créés, à des tailles raisonnables, et sont même sur le marché (voir par exemple l’ « Audio Spotlight » [AudioSpotlight]). Ils sont utilisés dans plusieurs domaines, principalement dans les expositions, les musés pour créer une expérience immersive ; dans les supermarchés pour envoyer des spots publicitaires sonores à certains endroits précis et des brevets ont été déposé pour des systèmes d’émetteur directionnels dans des voitures.

## I.3. Modulation et démodulation des ondes sonores

Pour comprendre leur fonctionnement, il faut se pencher sur l’équation d’onde d’un signal sonore. L’air est un milieu non-linéaire : la vitesse du son dépend de la température de l’air, qui dépend de la pression. Lorsqu’un signal sonore se propage dans l’air, la vitesse du son en plusieurs points du signal (ex : le maximum et minimum) est donc différente, ce qui résulte en une distorsion de ce signal.

Ce phénomène à pour effet de démoduler le signal sonore (plus précisément, l’enveloppe du signal, si celui-ci a une puissance suffisante). C’est cet effet que nous allons utiliser pour produire un signal audible : le signal modulant (20Hz – 20kHz) va être modulé sur un signal porteur ultrasonique et la nature non-linéaire de l’air va avoir pour effet de démoduler ce signal automatiquement, qui redeviendra donc audible.

L’équation de la modulation d’amplitude est la suivante :

où *sm(t)* est le signal modulé en amplitude, *sa(t)* est le signal audio original (que l’on suppose ici d’amplitude égale à 1), *fp* est la fréquence du signal porteur, *Ap*son amplitude et *m* est appelé « indice de modulation ».

La génération du signal porteur à fréquence ultrasonique peut se faire avec un oscillateur (par exemple en utilisant une puce ne555). Il est possible d’utiliser la carte Arduino pour générer en signal sinusoïdal en utilisant un ‘timer’ et un ‘interrupt’ : on échantillonne un signal sinusoïdal que l’on stock au préalable dans un tableau, et à chaque appel de l’interrupt, on envoi en sortie un signal PWM dont la largeur de pulsation dépend de l’amplitude de l’échantillon courant (en utilisant par exemple un deuxième timer). Ce signal PWM est ensuite filtré pour obtenir une sinusoïde. Cette méthode est néanmoins limitée à des sinusoïdes de fréquence maximale, qui dépend des opérations que le processeur a à exécuter en plus. En pratique, il risque d’être compliqué d’atteindre 40KHz, de plus, cette méthode nécessite de modifier un ou plusieurs timer de la carte Arduino, qui peuvent être utilisés par d’autres parties du code. Il est donc préférable d’utiliser la méthode analogique. La modulation peut se faire en utilisant simplement un transistor et des résistances pour contrôler l’amplitude du signal porteur, ou une puce dédiée peut être utilisé pour générer un meilleur signal (par exemple, MC1496) [3]. Encore une fois la modulation par méthode numérique est possible sur la carte Arduino, mais à de telles fréquences risque d’être très limitée.

En règle générale, *m* doit être compris entre 0 et 1 : s’il est égal à 0, le signal n’est plus modulé (seul le signal porteur est présent), s’il est supérieur à 1, le signal est « surmodulé ». Dans le cas de notre projet, une réduction de l’index de modulation mène à une réduction de la distorsion du signal audible, mais aussi à une réduction du niveau sonore de ce signal. [Pompei’02,1]

Il faut donc expérimenter pour trouver la valeur de *m* qui offre un signal audible le plus clair possible, tout en ayant un niveau sonore suffisant.

La relation entre le signal démodulé *s’*(*t*), et *sm(t)* est la suivante:

s’(t) ∝ Ap2 [Pompei’02,2]

On voit que la puissance du signal audible augmente avec le carré de la puissance du signal porteur.

De plus, si aucune compensation n’est mise en place, le signal modulant subit des distorsions lors de sa démodulation. Pour les mitiger, le signal d’entrée devrait donc être mis à la puissance ½ et intégré 2 fois au préalable, c’est-à-dire :

sc(t) =

où *sc(t)*est le signal compensé, *s(t)* le signal audio original

L’implémentation de cette compensation peut se faire de façon numérique ou analogique. Si l’appareil qui transmet le signal audio sans fil possède un processeur suffisamment performant, il est possible de modifier le signal en temps réel pour appliquer cette compensation avant son envoi vers la carte Arduino en modifiant le programme.

La méthode analogique consiste en un ampli-op dont la sortie est connectée à un multiplicateur (configuré pour fournir en sortie le carré du signal d’entrée), la sortie duquel est connectée à l’entrée inverseuse de l’ampli-op en plus du signal audio original : c’est le circuit qui donne la racine carrée d’un signal [6] . L’intégration se fait encore une fois grâce un ampli-op, dont la sortie est connectée via un condensateur à son entrée inverseuse, où est aussi connecté le signal audio original via une résistance.

Diagram

Description automatically generated

A close up of a logo

Description automatically generated

**Figure I.6/7.** *circuit pour appliquer respectivement la racine et l’intégration d’un signal image Paint*

Or, cette compensation (la partie qui applique la racine du signal) introduit beaucoup d’harmoniques dans le signal. Ces fréquences sont visibles grâce à son analyse de Fourier. Par exemple, si l’on prend un signal simple composé de 2 sinusoïdes (le cosinus est un sinus déphasé) :

avec *f* = 20Hz

On s’attend à ce que son analyse spectrale montre 2 pics, un pour 20Hz ( *f* ) et un autre pour 100Hz ( 5*f* ). Effectivement, on observe sur Fig.8 que c’est le cas.

En revanche, l’analyse de Fourier de présentée sur Fig.9 montre que le nombre d’harmoniques a fortement augmenté.

A picture containing chart, histogram

Description automatically generated

**Figure I.8.** *analyse spectrale de s(t) application JavaScript*

A picture containing screenshot, measure

Description automatically generated

**Figure I.9.** *analyse spectrale de application JavaScript*

Un critère principal dans le choix de l’émetteur est donc sa largeur de bande, c’est-à-dire la taille de l’intervalle de fréquences pour lequel la puissance de l’émetteur reste plus ou moins constante (en particulier, celle-ci est souvent caractérisée par la fréquence à partir de laquelle la puissance de l’émetteur baisse de 3dB ou 6dB par rapport à la puissance nominale). Une largeur de bande maximale est préférable. Hélas, la plupart des émetteurs ultrasoniques actuels ont une largeur de bande très faible, de l’ordre de 1kHz à 2kHz, alors qu’il faudrait une largeur de bande au moins autour de ~20kHz pour couvrir la bande son utilisée dans les enregistrements audios et une partie des harmoniques générées par la compensation du signal.

Néanmoins, de multiples vidéos sur internet prouvent que l’utilisation de ces émetteurs à faible largeur de bande produisent tout de même une qualité sonore acceptable. De plus,

# Bibliographie

[Beranek’54] Leo L. Beranek “Acoustics” Chap 4, p. 96, 1954

[AudioSpotlight] « Audio Spotlight », émetteur unidirectionnel commercialisé par Holosonics, <https://www.holosonics.com/>

[3] <https://www.sound-au.com/articles/am-modulation.htm>, 4 - Practical Amplitude Modulator

[Pompei’02,1] F. Joseph Pompei “Sound From Ultrasound: The Parametric Array as an Audible Sound Source” Chap 3, p. 26, 2002

[Pompei’02,2] F. Joseph Pompei “Sound From Ultrasound: The Parametric Array as an Audible Sound Source” Chap 3, p. 20, 2002

[6] fiche technique de la puce MC1494 « ON Semiconductor », p.12