

Projet de Physique P6
STPI/P6/2013 – 33

**Principe et fonctionnement des casques audio
actifs :
effet de compensation des ondes acoustiques**



Étudiants :

Antoine AUGUSTI

Oumaima LAMIRE

Clément OBLIN

Laura FAURITE GENDRON

Matthieu LEMMET

Sébastien WATTIEZ

Enseignant responsable du projet :

Jérôme YON

Cette page est laissée intentionnellement vierge.

Date de remise du rapport : **17/06/2013**

Référence du projet : **STPI/P6/2013 – 33**

Intitulé du projet : **Principe et fonctionnement des casques audio actifs : effet de compensation des ondes acoustiques.**

Type de projet : **expérimental.**

Objectifs du projet (10 lignes maxi) :

- **Étude du phénomène d'interférence des ondes**
- **Découverte de la transformée de Fourier**
- **Principe du casque actif**
- **Mise en pratique de l'atténuation d'une onde acoustique**
- **Mise en évidence des difficultés pour obtenir une atténuation efficace**

Mots-clefs du projet (4 maxi) : **ondes, acoustique, casque audio actif.**

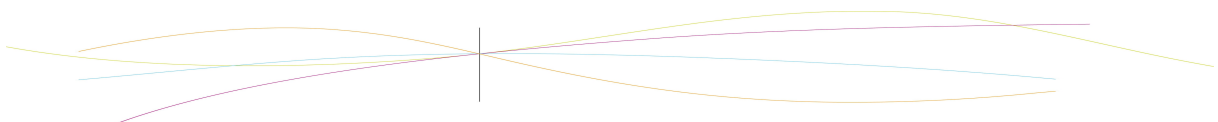
Si existant, n° cahier de laboratoire associé :

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction.....	6
2. Méthodologie / Organisation du travail.....	6
3. Généralités.....	6
3.1. Introduction du son.....	6
3.2. Étude théorique des ondes sonores.....	8
3.3. La perception du son par l'être humain.....	9
4. Les ondes sonores et les interférences.....	11
4.1. Calcul de l'interfrange.....	11
4.2. Expérience mettant en avant ce phénomène d'interférences.....	12
4.3. Analyse des résultats de l'expérience avec les GBFs.....	14
4.4. La transformée de Fourier.....	16
5. Analyse de Fourier avec un fichier audio.....	17
5.1. Introduction.....	17
5.2. Analyse et transformée de Fourier à l'aide de Scilab.....	17
5.3. Atténuation d'un son simple à l'aide de Scilab.....	18
5.4. Atténuation de sons complexes à l'aide de Scilab.....	18
5.5. Remarques sur les observations.....	19
5.6. L'analyse du son avec Audacity.....	19
5.7. Les défis à relever pour un casque actif efficace.....	21
6. Conclusions et perspectives.....	22
7. Bibliographie.....	23
8. Annexes.....	24
8.1. Annexe 1 : calculs de l'interfrange.....	24
8.2. Annexe 2 : Mise en évidence des paramètres dans la transformés de Fourier.....	26
8.3. Annexe 3 : programme permettant d'obtenir un signal stéréo (canal original + canal déphasé).....	26

NOTATIONS, ACRONYMES

- GBF : Générateur Basses Fréquences.
- M8 : Introduction au traitement des données à l'aide de l'informatique.
- P4-2 : Optique ondulatoire.
- dB : décibels



1. INTRODUCTION

L'atténuation acoustique n'est pas une application nouvelle du phénomène d'interférence des ondes. Toutefois, celle-ci s'est démocratisée au cours des dernières années grâce à la commercialisation de casques actifs auprès des particuliers (néanmoins les prix de vente sont encore élevés). L'objectif de ce projet était de découvrir le fonctionnement d'un casque actif.

Pour ceci, nous devons comprendre et mettre en application le phénomène d'interférence des ondes acoustiques. Par ailleurs, la connaissance de la transformée de Fourier s'est révélée nécessaire pour pouvoir appliquer nous-même une atténuation sonore.

Enfin, ces études nous ont permis de comprendre les défis que devaient relever les fabricants de casques actifs pour proposer une atténuation sonore efficace.

2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Pour mener à bien ce projet tous les six, nous avons suivi une démarche logique dans l'avancement du projet, en commençant par des recherches sur le sujet et des expériences simples. Nous avons au cours des premières séances, effectués des recherches sur les thèmes de base du sujet tels que la définition d'une onde, ses caractéristiques, le principe du casque audio actif et enfin nous nous sommes interrogés sur les expériences pertinentes à réaliser afin de comprendre le principe du casque audio actifs.

À la suite de ces recherches, Antoine et Sébastien se sont focalisés surtout sur l'aspect programmation et informatique pendant que Laura et Oumaima se penchaient plus sur les calculs théoriques du domaine de Fourier. L'expérience avec les GBFs décrite plus loin dans ce rapport a été réalisée par Laura, Oumaima et Clément et Matthieu. Matthieu et Clément se sont occupés durant toute la durée du projet d'effectuer des recherches pour approfondir les sujets que nous avons eu besoin d'aborder au cours du temps.

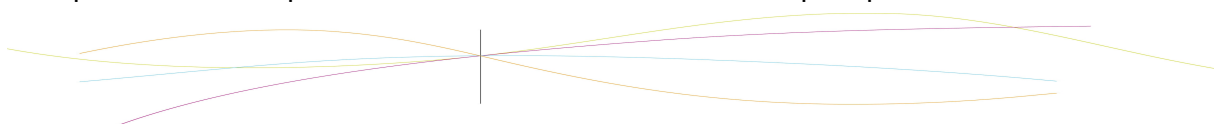
Rapidement, nous avons commencé l'élaboration d'un plan pour le rapport écrit et nous nous sommes répartis les différentes parties en fonction des affinités.

Enfin, Laura et Antoine se sont occupés de rassembler toutes les parties, de les mettre en forme et d'apporter les modifications nécessaires afin de constituer le présent rapport.

3. GÉNÉRALITÉS

3.1. Introduction du son

L'écoute de la musique est probablement l'un des loisirs les plus universel, et cela depuis le début des années 1980 et la sortie pour le grand public du Walkman de la marque nipponne Sony. Avec la sortie de ces appareils nomades, il a fallu développer des casques audio permettant d'écouter ces musiques. Ce n'est qu'à partir des années 2000 que certaines entreprises se sont spécialisées dans la fabrication de casques performants aussi bien au



niveau sonore, qu'en acoustique. En effet, l'insonorisation des casques audio permet de profiter de l'écoute de ses musiques sans pour autant être gêné par les bruits extérieurs. Mais concrètement qu'est-ce que le bruit ?

Tout d'abord, le son est une vibration de l'air qui se propage. Dans un milieu compressible comme l'air, le son se propage sous forme d'une variation de pression (enchaînement de compressions / dépressions) créée par la source sonore. Seules les variations de pression se propagent dans l'air, les molécules ne se déplacent pas. Le bruit est défini comme étant un son qui devient gênant en raison de sa nature, de son intensité ou de sa fréquence. Il est de nature à causer des troubles excessifs aux personnes et à nuire à leur santé ou à l'environnement.

Afin de réduire au maximum ces bruits lors de l'écoute de musique avec des casques audio, les entreprises ont développé deux méthodes d'insonorisation. La première dite "passive" et l'autre appelée insonorisation "active".

a) L'insonorisation dite "passive"

Elle consiste en l'introduction de matériaux particuliers, permettant de minimiser la transmission des ondes acoustiques à l'environnement. Ces matériaux ont des propriétés absorbantes, isolantes et/ou anti-réverbérantes qui atténuent les bruits plutôt aigus. Cette insonorisation est principalement dédiée aux traitements des hautes et moyennes fréquences. L'extension aux basses fréquences impose des épaisseurs de matériaux bien souvent incompatibles avec les contraintes industrielles.

b) L'insonorisation dite "active"

C'est une technique de réduction d'un bruit, par l'utilisation de sources de bruits auxiliaires. Sa paternité est attribuée au physicien Paul Lueg qui en émit le premier principe en 1934. Le bruit est une fluctuation de pression. Si une onde auxiliaire (dites secondaire) émet une onde de pression (un bruit) avec la même amplitude, et en opposition de phase avec le bruit indésirable, les deux champs de pression se superposent pour donner le silence. Dans les systèmes utilisés actuellement, les sources secondaires émettent un bruit calculé en temps réel par des DSP (processeurs dédiés au traitement du signal).

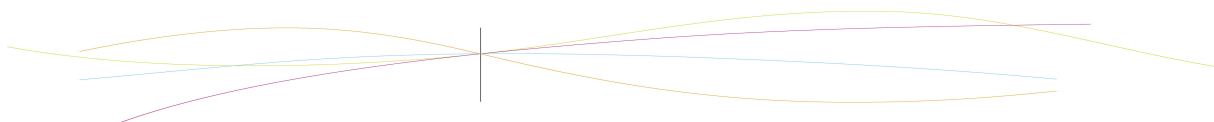
Dans la pratique, ceci se traduit par une réduction du bruit. Les avantages par rapport au contrôle passif sont les suivants :

- une plus grande efficacité pour le traitement des basses fréquences ;
- un encombrement et une masse réduite ;
- une capacité de traitement sélective.

C'est cette technologie qui est actuellement utilisée dans certains casques audio à insonorisation active en vente sur le marché.

Cette technologie est plus efficace pour réduire les sons de basses fréquences, car la fréquence est plus faible, et les DSP seront plus aptes à créer plus facilement une onde de même amplitude et de même fréquence, mais avec un déphasage d'une demie période.

En conclusion , les casques avec un contrôle actif du bruit sont insonorisés à la fois avec une insonorisation "passive" et "active" pour réduire au maximum l'ensemble des fréquences. Les basses fréquences étant comprises entre 30 Hz et 3 kHz et les hautes fréquences entre 4 kHz à 20 kHz.



3.2. Étude théorique des ondes sonores

Une onde est liée à un mouvement vibratoire d'une source, provoquant une déformation du milieu dans lequel elle se trouve. Sa vitesse dépend des caractéristiques du milieu de propagation. Elle transporte de l'énergie et ne transporte pas de matière. On distingue deux catégories d'ondes : longitudinale, celles qui se déplacent localement selon le sens de propagation, et transversale, celles qui se déplacent localement perpendiculairement au sens de propagation.

Une onde est décrite par son amplitude ϕ ou fonction d'onde. Elle est définie en tout point de l'espace. La fonction amplitude ϕ est caractérisée par le phénomène que représente l'onde :

- Scalaire : par exemple les ondes sonores
- Vecteur : par exemple les ondes mécaniques
- Une matrice : par exemple les ondes sismiques

Dans notre projet, nous allons nous intéresser de plus près aux ondes sonores c'est-à-dire d'une fonction d'amplitude qui dépend d'un phénomène scalaire. L'onde acoustique est une onde longitudinale produite par l'alternance entre des zones de compression et des zones de dépression. Elle est caractérisée par plusieurs grandeurs physiques :

- Une fréquence (la hauteur du son)
- Une longueur d'onde
- Une amplitude
- Une durée du son peut être aussi une caractéristique
- Un timbre

L'onde est aussi décrite par sa fonction d'amplitude $\phi(x, t)$, x étant la position dans l'espace et t le temps. Cette fonction s'écrit sous la forme suivante pour une onde sinusoïdale :

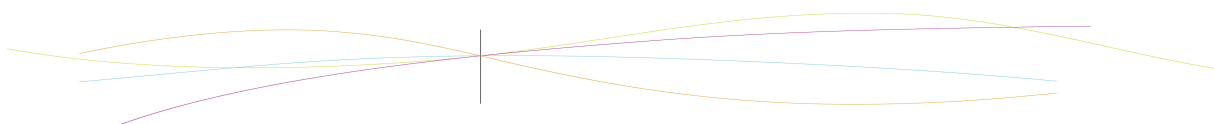
- $\phi(x, t) = A \times \sin(\omega t - kx + e)$
 - A étant l'amplitude
 - e étant la phase à l'origine
 - ω la pulsation de l'onde, $\omega = 2\pi f$
 - k étant le vecteur d'onde, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

Il faut également savoir différencier un son pur d'un son complexe. Un son pur est une fonction sinusoïdale périodique alors qu'un son complexe résulte de la superposition de plusieurs sons purs.

Quand deux ondes de même nature, sonores ou lumineuses, se rencontrent dans un même milieu, elles vont se superposer et interférer entre elles.

L'amplitude résultante de la superposition des deux ondes de même nature est simplement la somme de leurs deux amplitudes $\phi(t) = \phi_1(t) + \phi_2(t)$. Mais cette addition va aboutir en certains points à l'annulation de l'onde et en d'autres endroits au doublement de son amplitude.

Pour comprendre ce phénomène, envisageons le cas le plus simple de deux sources sonores identiques produisant un son pur et générant des ondes acoustiques en phase, de même fréquence et de même amplitude.



Le principe de superposition va faire que les élongations respectives vont s'additionner en tous points de la cuve. Mais, la somme algébrique des deux ondes va aboutir en certains points à l'annulation de l'onde et en d'autres endroits au doublement de son amplitude.

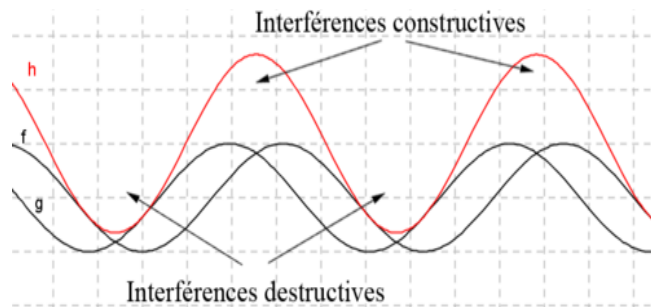


figure 1 : Les interférences constructives et les interférences destructives.

C'est en se basant sur ce principe que les industriels ont développé un casque à réduction actif du bruit.

Pour diminuer un son, (théoriquement l'annuler), ce casque superpose la première onde sonore (le son, le bruit) avec une deuxième onde sonore qui possède la même fréquence et la même amplitude mais avec un déphasage d'une demi-période.

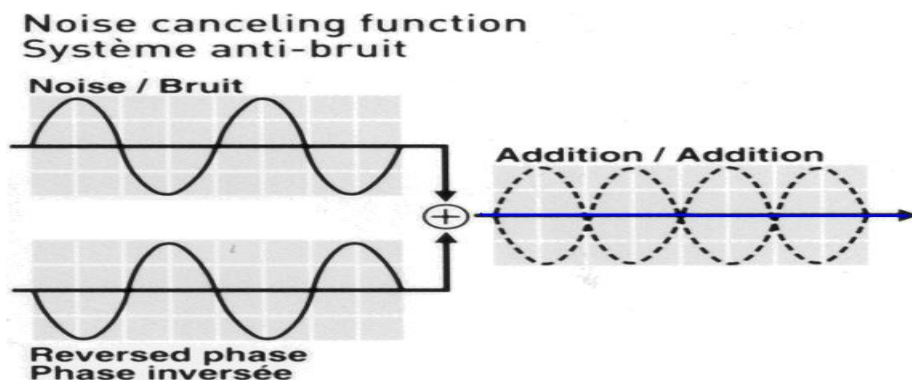


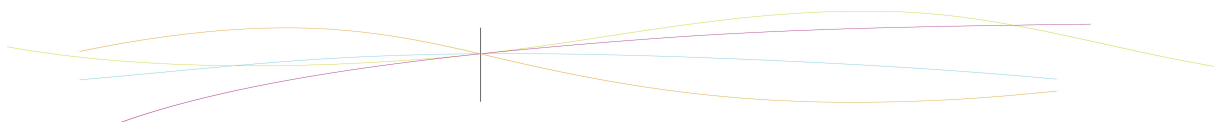
figure 2 : Le principe du système anti-bruit par la méthode des interférences.

Il existe cependant quelques limites à ce dispositif qui seront expliquées dans la suite du dossier.

3.3. La perception du son par l'être humain

Tout d'abord, il faut savoir que l'être humain est capable de percevoir des ondes sonores dont la fréquence varie entre 20 Hz et 20 kHz. Notre capacité à entendre ce son dépend aussi de l'intensité sonore avec laquelle il s'exprime. Pour mesurer cette intensité, on utilise les décibels (dB).

Le décibel est un niveau de pression acoustique. Comme le seuil d'audibilité de l'oreille humaine est de 20 micro-pascals et le maximum admis de l'ordre 20 pascals, les acousticiens ont depuis longtemps utilisé le Bel (en l'honneur d'Alexander Graham Bell) ou plutôt le dixième de bel soit le décibel noté dB.



Le décibel étant mathématiquement parlant, un rapport logarithmique, il faut fixer la référence P_0 , le "0 décibel absolu", et l'on utilise actuellement le seuil d'audibilité soit $20\mu\text{Pa}$ ($20\mu\text{Pa}$ correspond à 0 dB absolu). Le décibel est donc une unité sans dimension, puisque c'est un rapport de deux valeurs.

On exprime plus généralement X dans un sous-multiple du bel, le décibel (dB) :

$$X_{dB} = 10 \log\left(\frac{P_1}{P_0}\right)$$

P_0 est la puissance de référence qui est fixée à 1mW.

Afin de mieux cerner cette échelle voici des repères :

- Moins de 40 dB : calme de nuit à la campagne
- 40 à 60 dB : bruit de la vie en plein jour, dans une petite ville
- 60 à 80 dB : ville bruyante (grande ville ou centre ville)
- 80 à 105 dB : bruit nécessitant une protection si l'exposition est longue (aéroport, chantier, gros trafic...)
- 105 dB et plus : dangereux et destructeur si aucune protection.

En revanche, toutes les mesures se font, sauf indication contraire, à un mètre de la source sonore. Comme la puissance sonore ressentie diminue avec la distance, il a donc fallu normaliser la mesure des décibels afin d'uniformiser les règles d'insonorisation en vigueur.

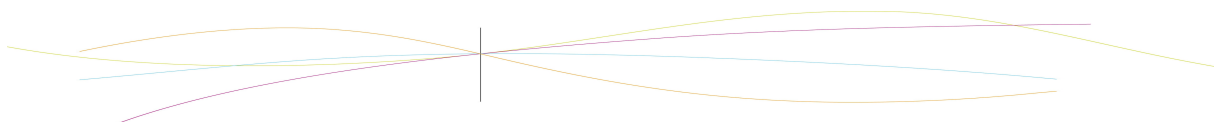
Nos valeurs en décibels dans la seconde partie du dossier sont calculées en fonction de la tension. Le dBu est une unité utilisée pour quantifier l'amplitude d'un signal électrique, et son usage en audio est très fréquent. Voici son expression :

$$X_{dB} = 20 \log\left(\frac{U_1}{U_{ref}}\right)$$

Dans notre expérience (expliquée au 4.3.). La valeur de U_{ref} est la valeur fixée de la tension, lorsqu'il n'y a pas d'atténuation sonore, donc lorsque $U_1 = U_{ref}$. Ainsi, lorsqu'il n'y a pas d'atténuation en tension, les décibels seront nuls.

En revanche, toutes les mesures se font, sauf indication contraire, à un mètre de la source sonore. Comme la puissance sonore ressentie diminue avec la distance, il a donc fallu normaliser la mesure des décibels afin d'uniformiser les règles d'insonorisation en vigueur.

Nous percevons les sons compris entre 0 dB et 120 dB. Notre système auditif est chargé de transformer cette vibration de l'air en une information décodable par le cerveau en tant que son. Pour ce faire, il est composé d'un ensemble d'organes reliés entre eux : l'oreille, le nerf auditif et les aires auditives du cerveau. Ce système est composé de trois parties : l'oreille externe, l'oreille moyenne et l'oreille interne. C'est cette dernière partie que l'onde sonore va faire vibrer, cette vibration va ensuite être analysée comme étant un son par notre cerveau.



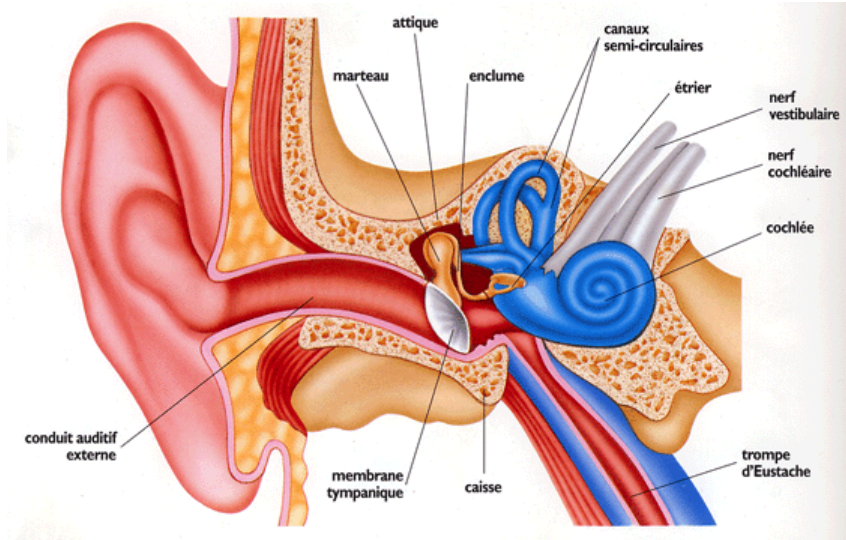


figure 3 : Schéma de l'oreille humaine.

4. LES ONDES SONORES ET LES INTERFÉRENCES

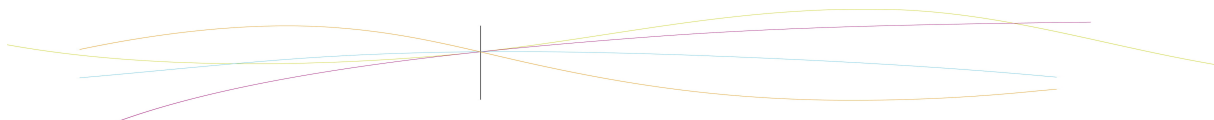
4.1. Calcul de l'interfrange

L'étude du tube de Kundt nous a permis de révéler des zones régulières où le son était inaudible. Ce sont les interfranges.

Pour les obtenir, il faut envoyer une onde vers un point, et décaler de quelques centimètres la source d'une 2^{ème} même onde mais déphasée de $\frac{\pi}{2}$.

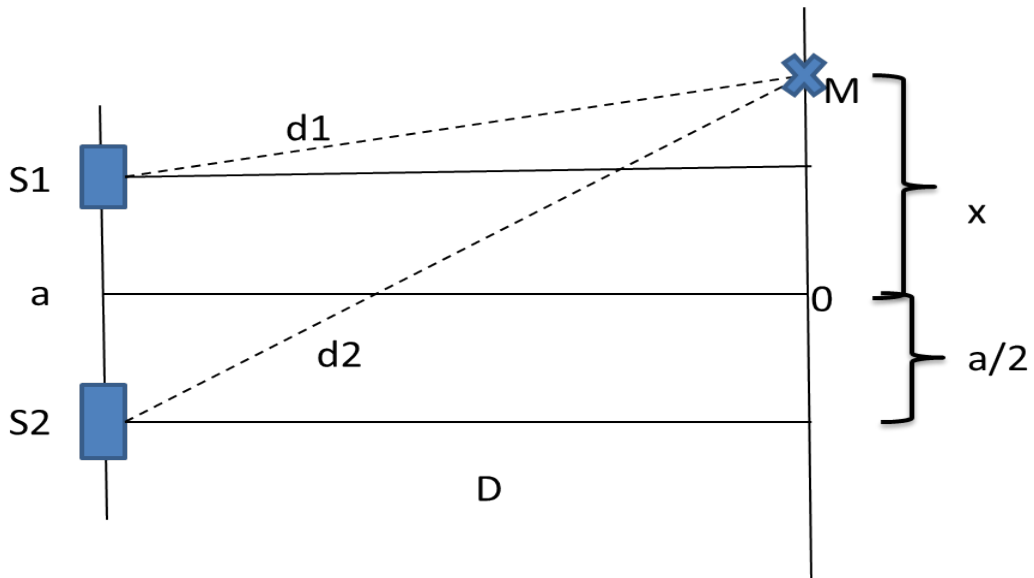
À partir de là, il nous fallait savoir si l'on pouvait mettre en évidence une interférence, à notre échelle. Pour cela nous avons utilisé un TP issu du cours de P4-2. Son thème était le calcul d'un interfrange.

Nous avons effectué les calculs (voir Annexe 1) et le résultat est concluant : l'interfrange est d'une distance de plus de 15 mètres pour un « la » à 440 Hz. Cela signifie qu'entre 2 interférences constructives où l'amplitude sera maximale, on dispose d'une distance d'environ 15 mètres pour entendre le son décroître, jusqu'à disparaître, alors que la source sonore est parfaitement audible sans l'interférence.



Calcul d'un interfrange

Schéma :



Soient $P_1 = P_0 \cos(\omega(t - \frac{d1}{c}))$; $P_2 = P_0 \cos(\omega(t - \frac{d2}{c}))$ issues de S1 et S2.

Au point M, on a $P = P_1 + P_2$

La différence de marche $\delta = d1 - d2$ et $\phi = \frac{\omega \delta}{c} = \frac{2\pi \delta}{\lambda}$

On passe en complexe : $P = P_0 e^{j\omega t} e^{-j\phi/2} (1 + e^{j\phi})$

L'amplitude est $A = |P| = \sqrt{P \bar{P}}$

4.2. Expérience mettant en avant ce phénomène d'interférences

Nous savons désormais que les ondes sonores, caractérisée par une fréquence f et une amplitude a sont sujets aux interférences engendrées par leurs rencontres. Nous allons déphaser deux signaux pour mettre en évidence le phénomène d'ondes destructives.

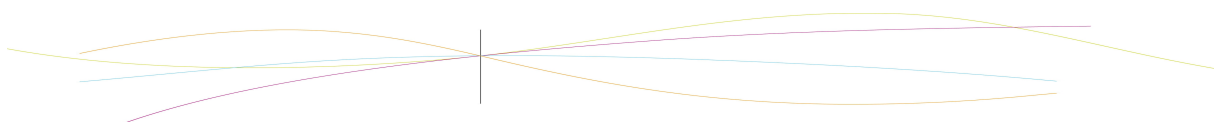
Nous avons donc souhaité illustrer ce phénomène d'interférence à l'aide d'un cas simple.

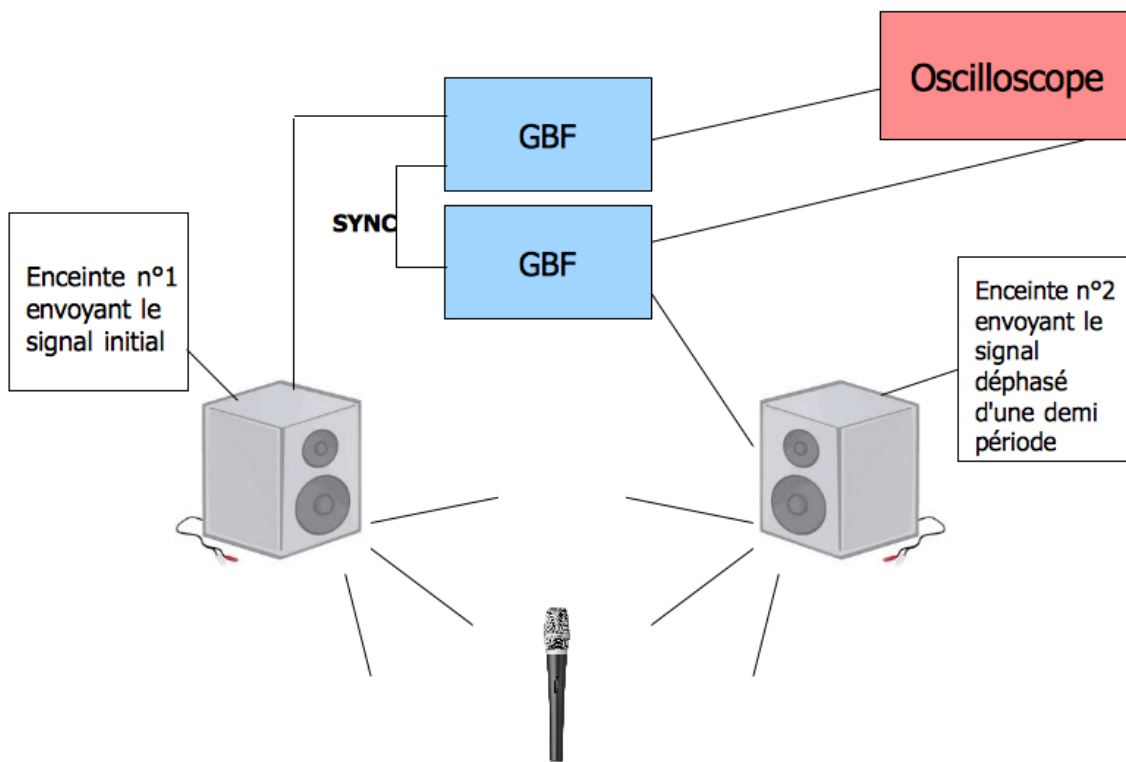
Au cours de cette expérience, nous avons utilisé le matériel suivant :

- deux enceintes
- deux GBF
- un oscilloscope

Nous avons relié les deux GBFs entre eux à l'aide de la fonction synchrone afin de synchroniser les deux signaux entre eux. Chaque enceinte était reliée à un GBF. Nous avons envoyé un signal électrique de fréquence f et d'amplitude a vers la première enceinte provenant du premier GBF. Nous avons ensuite envoyé le même signal vers l'autre enceinte provenant du deuxième GBF. A l'aide de l'oscilloscope, nous avons pu représenter les deux signaux sinusoïdaux. Pour mettre en évidence le phénomène étudié, nous avons joué sur le déphasage entre les deux signaux grâce au deuxième GBF.

Enfin, nous avons perçu une atténuation du son initial, en plaçant notre oreille à mi-chemin entre les deux enceintes qui émettaient donc exactement le même signal mais avec un déphasage d'une demi-période.





Lors de notre première tentative, le résultat fut très satisfaisant. En jouant sur l'orientation des haut-parleurs, on percevait clairement une forte atténuation du son dans une certaine position des enceintes.

Cependant lors d'autres essais, les résultats nous ont laissés plus perplexes et nous n'avons pas retrouvé une telle atténuation du son malgré des réglages et un protocole identique. Nous avons également remarqué que le déphasage théorique à appliquer ne donnait pas toujours l'atténuation maximale. Nous avons été étonné de ce résultat et nous avons voulu vérifier cette observation en faisant de nouvelles expériences.

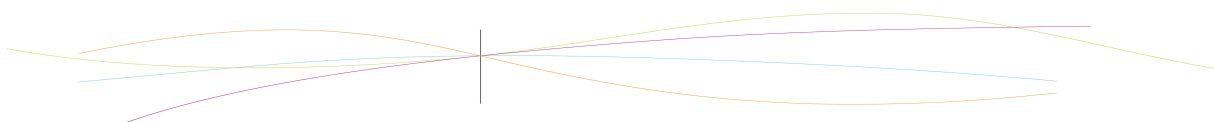
Nous avons donc refait l'expérience en faisant varier la fréquence de 100 Hz à 1 000 Hz, et l'amplitude de 6 à 12 V. Cependant le son ne présentait pas d'atténuation avant 330 Hz puis de nouveau plus de résultats avant une fréquence proche des 600 Hz. Comme constaté précédemment, l'atténuation maximale n'était pas atteinte à chaque fois pour le déphasage théorique que nous devons appliquer. Nous pouvons expliquer ce résultat par le fait que nos enceintes ne transmettent pas exactement de la même façon les différentes fréquences (nos enceintes étaient de très mauvaise qualité) et nous pensons qu'il soit possible que nos enceintes atténuent « naturellement » certaines fréquences plus que d'autres.

Afin de déterminer si réellement cette expérience présentait une atténuation du son, nous avons utilisé un micro que nous avons relié à l'ordinateur afin de pouvoir comparer les décibel émis lors de l'émission du son sans le déphasage, puis après le déphasage. Grâce à Scilab, nous avons obtenu les résultats suivant :

- Son initial : -0,5 dB
- Son constitué des deux ondes déphasées : -1,5 dB

Il y a donc bien une atténuation mais celle-ci est faible.

Cette expérience a donc constitué une première approche du phénomène d'interférence des ondes sonores, mais les résultats étant trop aléatoires et ne nous permettant pas de



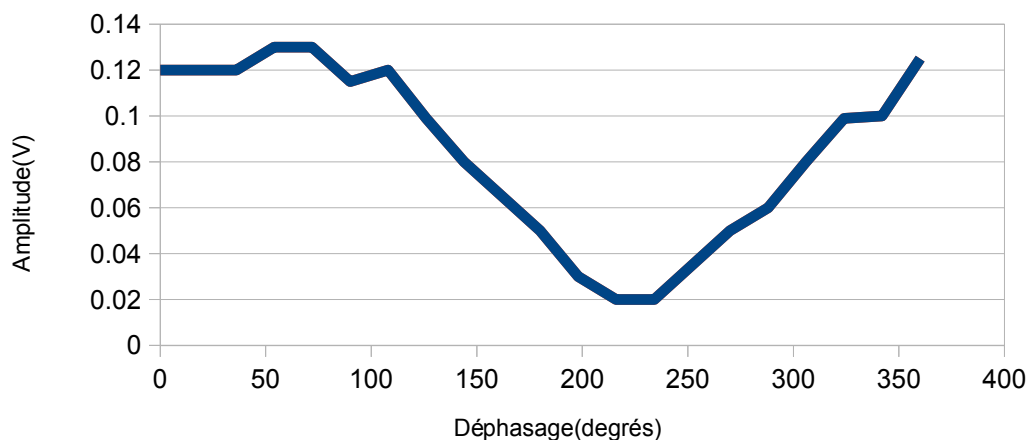
conclure, nous sommes donc passés dans le domaine de Fourier pour une étude plus poussée avec des sons complexes.

4.3. Analyse des résultats de l'expérience avec les GBFs

Nous avons souhaité mettre en évidence l'impact du déphasage entre les deux signaux sur l'amplitude et donc sur l'atténuation du son. Pour cela, nous avons refait une dernière fois l'expérience en fixant une fréquence $f = 330$ Hz et une amplitude $A = 6,08$ V (constantes au cours de l'expérience). La distance entre les deux enceintes est de 6,5 cm et la distance enceintes-microphone est de 22 cm.

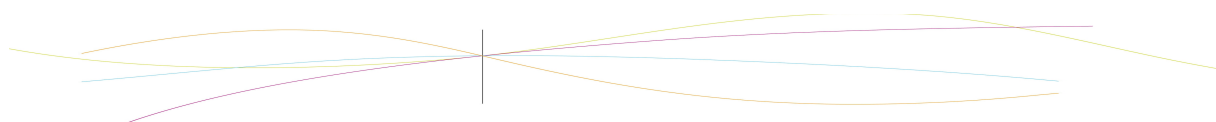
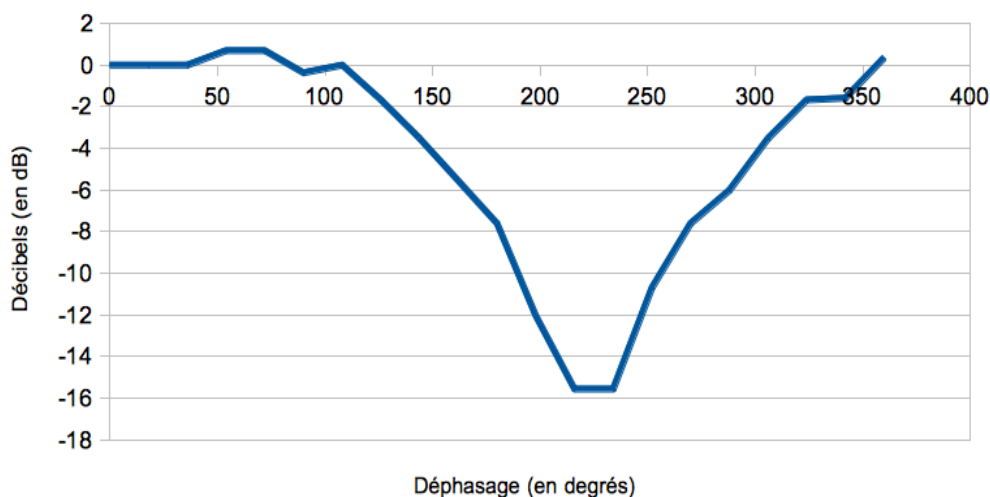
Pour commencer, nous avons fait varier le déphasage et observé l'évolution de l'amplitude grâce à l'oscilloscope.

Evolution de l'amplitude en fonction du déphasage entre les deux signaux



Nous avons également pu observer l'évolution des décibels perçus en fonction de l'amplitude entre les deux signaux. L'analyse donnant les décibels à partir du signal capturé par le microphone est effectuée par Audacity. On remarque une corrélation nette entre les décibels et le déphasage.

Évolution des dB perçus en fonction du déphasage entre les deux signaux

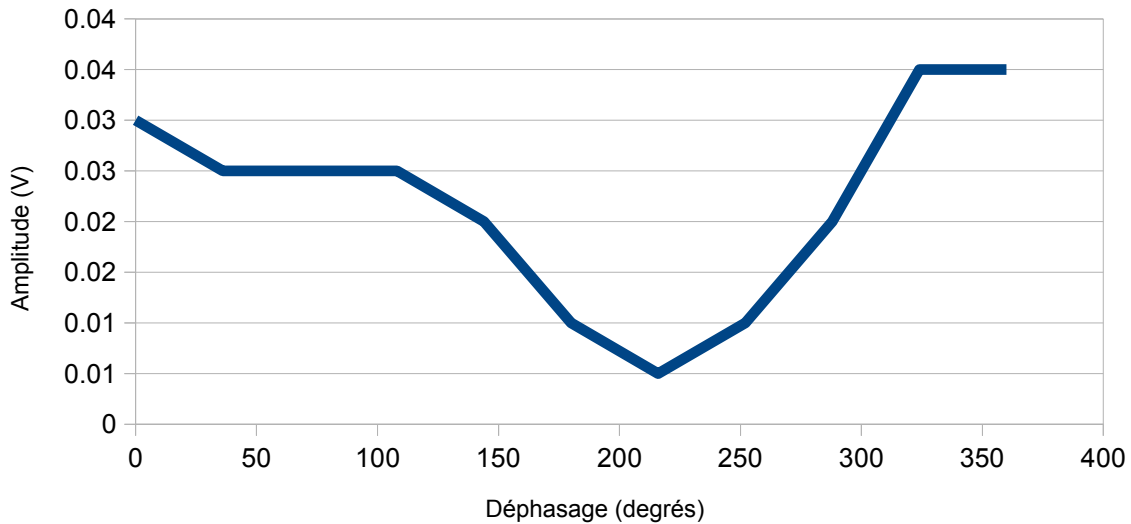


Nous nous sommes ensuite demandé si la distance entre les enceintes et le microphone pouvait avoir une influence sur la qualité des résultats. Nous avons donc effectué la même expérience mais avec cette fois-ci avec le microphone plus loin.

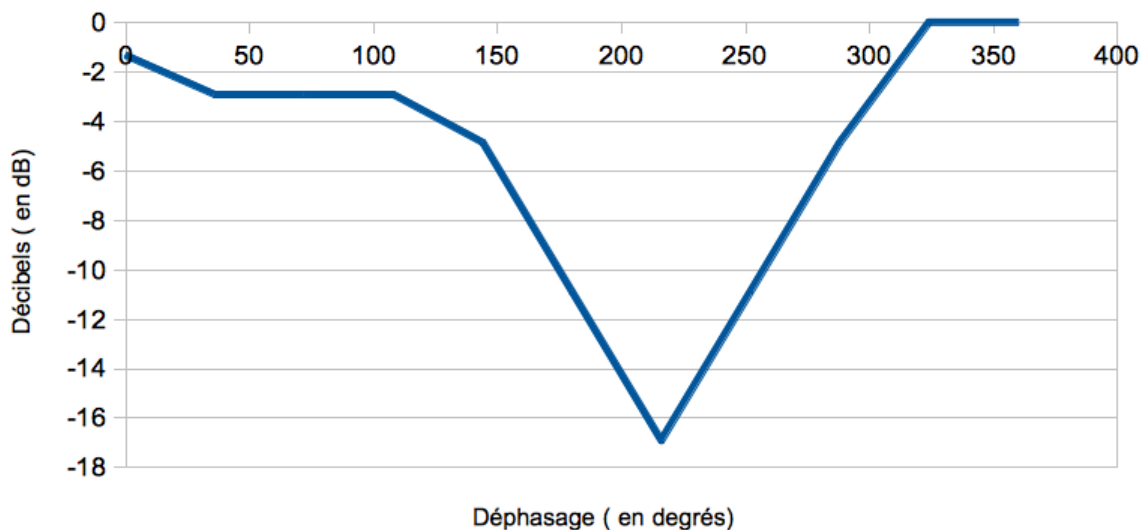
La distance entre les deux enceintes est toujours de 6,5 cm et la distance enceintes-microphone est cette fois de 55 cm.

Voici les résultats que nous avons obtenus avec la même procédure.

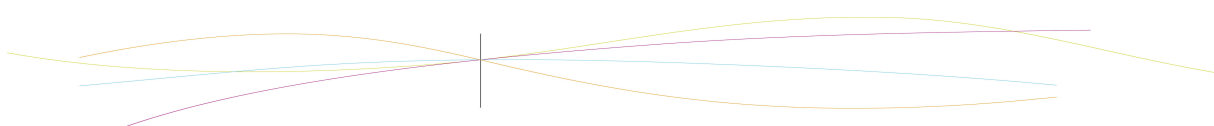
Evolution de l'amplitude en fonction du déphasage entre les deux signaux



Evolution des dB perçus en fonction du déphasage entre les deux signaux



Cette expérience met donc bien en évidence le phénomène d'interférence des ondes sonores ainsi que leur destruction lorsque l'on joue sur le déphasage entre les signaux.



4.4. La transformée de Fourier

Concentrons-nous maintenant sur le fonctionnement, au niveau physique du terme, des casque audio à réduction active du bruit. L'ensemble du système de réduction des bruits extérieur est composé de trois parties principales :

- Le micro receveur qui va capter les ondes sonores venant de l'extérieur
- Une carte son qui va analyser les différentes ondes sonores qui compose les bruits captés. Cette dernière va décomposer chaque onde sonore, pour ensuite les déphaser d'une demi-période. La carte va enfin recomposer le signal déphasé pour le renvoyer vers des haut-parleurs.
- La dernière partie du système est un haut-parleur, qui va renvoyer l'onde créée par la carte son, pour « détruire » l'onde incidente.

C'est la carte son du système qui va utiliser la transformée de Fourier afin d'étudier les ondes sonores incidentes. En effet, les composants électroniques ne sont pas capables d'analyser à proprement parler des « sons ». La carte son va donc utiliser cette transformation mathématique pour passer d'une phénomène physique à une suite de chiffres qu'elle pourra ensuite analyser.

Prenons un signal périodique $f(t)$ et de période T , auquel on va associer un série de Fourier :

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n \omega t) + b_n \sin(n \omega t)$$

Ce développement unique est appelé « développement en série de Fourier ».

Les coefficients a_n et b_n sont les coefficients de la série de Fourier.

Le terme pulsation ω est la fondamentale et les termes pulsation $n\omega$ sont les harmoniques.

Ce que la carte son va calculer sont les coefficients de Fourier a_n et b_n qui vont lui permettre de traduire mathématiquement les fréquences des ondes sonores.

Calcul des coefficients de Fourier :

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n \omega t) dt \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n \omega t) dt$$

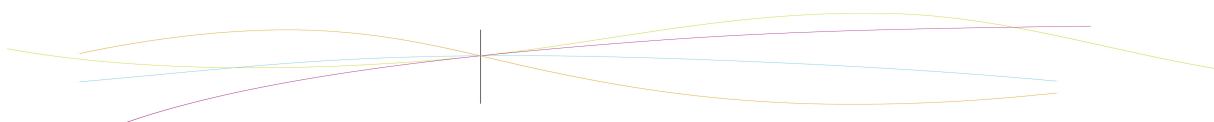
L'expression des coefficients varie aussi en fonction de la parité de la fonction (paire ou impaire). Si la fonction est paire alors l'expression du coefficient a_n sera :

$$a_n = \frac{4}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} f(t) \cos(n \omega t) dt$$

Pour mieux comprendre le fonctionnement de l'analyse de Fourier, nous avons tout d'abord commencé à étudier la théorie mathématiques. Nous avons choisi plusieurs fonctions périodiques simples puis nous avons calculé les coefficients de Fourier de ces fonctions.

Au niveau de l'étude sonore, la série de Fourier sert à étudier les fonctions périodiques particulièrement pour la décomposition de signaux périodiques. On obtient alors à partir d'un signal une suite d'harmoniques avec chacune une amplitude et une phase différente. L'étude de ces harmoniques est plus bien plus facile qu'étudier la fonction de base.

Il faut tout d'abord analyser la fonction afin de déterminer les coefficients de Fourier. Ces coefficients sont obtenus grâce à la formule suivante :



$$c_n(f) = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) e^{\frac{-i2n\pi}{T}t} dt$$

Avec $f(t)$ la fonction étudiée et T sa période. Ces coefficients caractérisent la fonction et permettent de la reproduire facilement. C'est par exemple ce processus qui est utilisé par les cartes sons pour retransmettre de la manière la plus fidèle possible de la musique.

Dans le cas de notre projet, ce qui nous intéresse réellement est ce qu'on appelle la transformée de Fourier. Elle permet de décomposer la fonction correspondant au son que l'on étudie en une somme de sinusoïdes. On peut ainsi appliquer ensuite une transformée inverse qui permettra d'obtenir un son déphasé capable d'atténuer le son d'origine : c'est-à-dire un son avec un déphasage Φ qui permet d'avoir le son déphasé et le son origine en opposition de phase.

5. ANALYSE DE FOURIER AVEC UN FICHER AUDIO

5.1. Introduction

Suite à l'étude théorique de la transformée de Fourier, nous avons souhaité avoir une approche plus expérimentale à l'aide de GBFs numériques et de haut-parleurs. Nous avons fixé une fréquence d'émission identique sur deux GBFs, chacun étant relié à un haut parleur. Nous avons fait varier la phase d'un des deux signaux pour mettre en évidence le phénomène d'interférence et afin entendre une atténuation (voire une quasi disparition) des sons émis par les hauts parleurs.

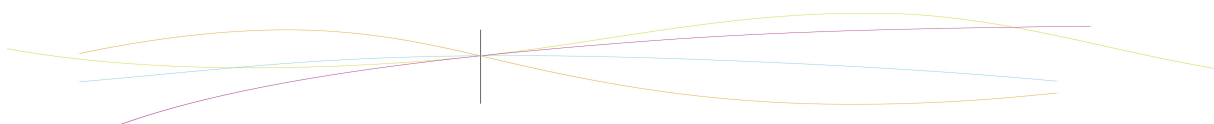
Grâce à cette expérience, nous avons déjà un aperçu du fonctionnement d'un casque actif. Nous voulions aller plus loin et nous rapprocher un petit peu plus encore du fonctionnement réel du casque actif. Toutefois, il n'était pas possible de reproduire en totalité le processus d'atténuation du bruit : nous ne pouvions pas effectuer une capture puis une analyse de Fourier rapide pour conduire à un déphasage du son précédemment capturé. En effet nos connaissances sont limitées et nous ne possédons pas de matériel d'électronique et de traitement avancé.

L'expérience menée précédemment nous a permis de traiter le cas des ondes monochromatiques tandis que celle-ci est dédiée à l'étude des ondes polychromatiques.

5.2. Analyse et transformée de Fourier à l'aide de Scilab

La réalisation d'une analyse de Fourier en temps réel étant impossible à réaliser pour notre groupe, nous nous sommes décidés à réaliser une analyse de Fourier sur un son préalablement enregistré. Nous ne pourrions pas atténuer un son émis en direct mais nous voulions pouvoir atténuer un son préalablement enregistré et stocké sous la forme d'un fichier audio. Pour pouvoir arriver à ce résultat, M. Yon nous a conseillé d'utiliser le logiciel libre Scilab qui est capable d'effectuer une analyse et une transformée de Fourier sur un fichier audio.

Initialement, nous avons pensé utiliser deux fichiers audio. Le fichier audio initial serait joué sur un haut parleur et nous jouerions sur un deuxième haut parleur (placé en face du premier haut parleur) le même signal préalablement déphasé à l'aide d'une transformée de Fourier réalisée par Scilab. Toutefois, un problème de taille se présentait : nous avons déjà observé



qu'une variation, même infime, de la fréquence ou de la phase du signal avait un impact immédiatement audible lors de la tentative d'atténuation des sons. Nous ne serions pas capable de coordonner précisément la lecture des deux sons sur les deux hauts parleurs indépendants et il paraissait donc difficile de mettre en évidence une atténuation efficace à l'aide de ce procédé.

Pour éviter de faire face à ce problème, nous avons choisi d'utiliser un seul fichier audio stéréo et de séparer les deux canaux : le premier canal serait réservé au son initial et le deuxième au canal au son du premier canal déphasé à l'aide de Scilab. Scilab traite les fichiers audio comme des vecteurs, ce qui est un comportement similaire à Matlab que certains de nous utilisons dans notre cours de M8. La manipulation des variables est très similaire à Matlab (ce qui nous a facilité la tâche) mais nous avons déploré une documentation des fonctions du logiciel incomplète et peu claire.

5.3. Atténuation d'un son simple à l'aide de Scilab

Nous avons commencé les tests de déphasage à l'aide de Scilab à l'aide d'un fichier audio simple : un « la » à la fréquence de 440 Hz, d'une durée de 30 secondes. Nous avons écrit quelques lignes de code pouvant s'adapter à n'importe quel fichier source.

Le déroulement de l'algorithme écrit est le suivant :

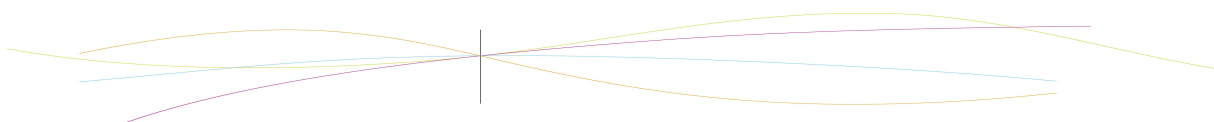
1. Ouverture du fichier audio se trouvant dans le dossier spécifié.
2. Transformation du fichier audio en un signal mono.
3. Analyse de Fourier du signal mono.
4. Déphasage de $\frac{\pi}{2}$ du signal mono.
5. Analyse inverse de Fourier du signal mono déphasé.
6. Création d'un nouveau vecteur
 1. Première colonne du vecteur : son initial
 2. Deuxième colonne du vecteur : son déphasé à l'aide de l'analyse de Fourier
7. Enregistrement du vecteur de deux colonnes sous la forme d'un fichier audio.

Pour nous assurer du fonctionnement de notre algorithme nous avons affiché sur un graphique le signal final obtenu pour constater graphiquement une option de phase des deux signaux. Nous avons eu quelques difficultés à enregistrer convenablement le fichier audio final à cause de la documentation incomplète de Scilab mais nous y sommes finalement arrivés. À la lecture du fichier audio final obtenu sur des hauts parleurs, nous avons constaté une atténuation du son initial conséquente, mais moins flagrante que le résultat obtenu à l'aide des sons générés par les GBFs.

5.4. Atténuation de sons complexes à l'aide de Scilab

Après le succès de l'atténuation d'un son simple à l'aide de Scilab, nous avons voulu tester les possibilités de Scilab sur des sons plus complexes. Nous avons tout d'abord essayé avec une musique proposée par défaut sur le système d'exploitation Windows. Nous avons dû réduire la durée du fichier audio (Scilab n'ayant malheureusement pas assez de mémoire pour traiter un fichier audio WAV d'une durée de 3 minutes). Nous avons enregistré les fichiers audio suivants :

- Le signal original en stéréo après avoir appliqué une transformée de Fourier puis son inverse sans appliquer de déphasage.



- Le signal déphasé en stéréo obtenu en appliquant une transformée de Fourier puis son inverse avec un déphasage.
- L'association du signal initial sans déphasage en mono et du signal déphasé en mono pour former un fichier stéréo.

Nous avons constaté que le traitement par la transformée de Fourier ne semblait pas altérer la qualité du son. Il était impossible d'entendre une différence entre le son original et le son doublement déphasé. Nous avons constaté une atténuation nette, mais toutefois moins prononcée qu'avec un son simple lorsque nous écoutions le fichier contenant l'association du son initial et du son ayant subi un déphasage.

Suite à cette expérience avec un fichier audio, nous avons souhaité tenter de nouvelles expériences avec Scilab en générant le son directement à partir de Scilab. Ceci se fait en générant des vecteurs : il suffit alors de spécifier une amplitude et une fréquence sur une fonction périodique pour générer une note voulue.

Nous avons tout d'abord voulu savoir si l'atténuation se faisait de la même manière pour une note très grave et une note de hauteur moyenne. Nous avons alors généré un son de 30s superposant une note à 300 Hz et une note à 440 Hz de même amplitude. Le procédé d'analyse a été le même que pour celui d'une musique. Nous n'avons pas remarqué une atténuation plus marquée pour une des deux fréquences. L'atténuation semblait homogène pour ces deux fréquences superposées.

De plus, nous avons souhaité voir s'il y avait un retard dans l'atténuation lors d'un changement de fréquence. Pour essayer d'observer ceci, nous avons généré un son composé d'une alternance de deux tons, chacun joué pendant 1,5s. Comme dans l'expérience précédente, nous avons utilisé les fréquences de 300 Hz et 440 Hz. Nous avons conservé le même procédé d'analyse que précédemment. Nous n'avons pas observé une forme de « retard à l'atténuation » lors d'un changement de fréquence, l'atténuation semblant se faire immédiatement après le changement de note.

5.5. Remarques sur les observations

Il est primordial de noter que toutes les observations réalisées ont été faites de manière qualitative. Nous avons constaté ces atténuations seulement grâce à notre ouïe. Ces observations ont été faites à l'aide d'un casque audio et par plusieurs personnes.

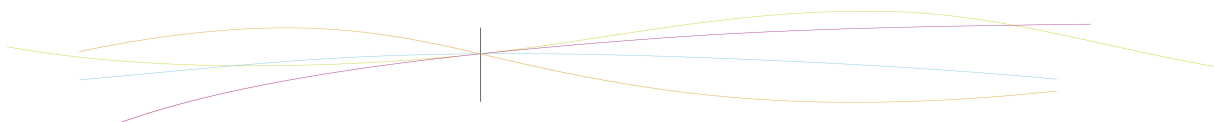
Nous avons été étonnés de constater des atténuations et une conservation de la musique car nous avons effectué des analyses de Fourier sur l'ensemble du fichier. Théoriquement, nous aurions dû effectuer plusieurs analyses, sur de courtes parties du fichier, à la manière de la méthode utilisée pour numériser un son enregistré par un microphone.

5.6. L'analyse du son avec Audacity

Afin de savoir si le déphasage atténuait vraiment le son, nous avons utilisé le logiciel libre Audacity. Il a permis, entre autre, d'enregistrer les sons stéréo créés avec Scilab : en plaçant un microphone entre deux haut-parleurs, nous pouvions visualiser les différents signaux.

Audacity se propose de mesurer le volume d'un échantillon en décibels. Or le bel est un rapport entre deux puissances, le décibel est le logarithme à base 10 du bel. Audacity ne nous donnait que des résultats négatifs car il calculait sur une base spéciale que nous n'avons pas pu déterminer : tout ce que nous savions était que 0 dB représente la saturation de la carte son de l'ordinateur.

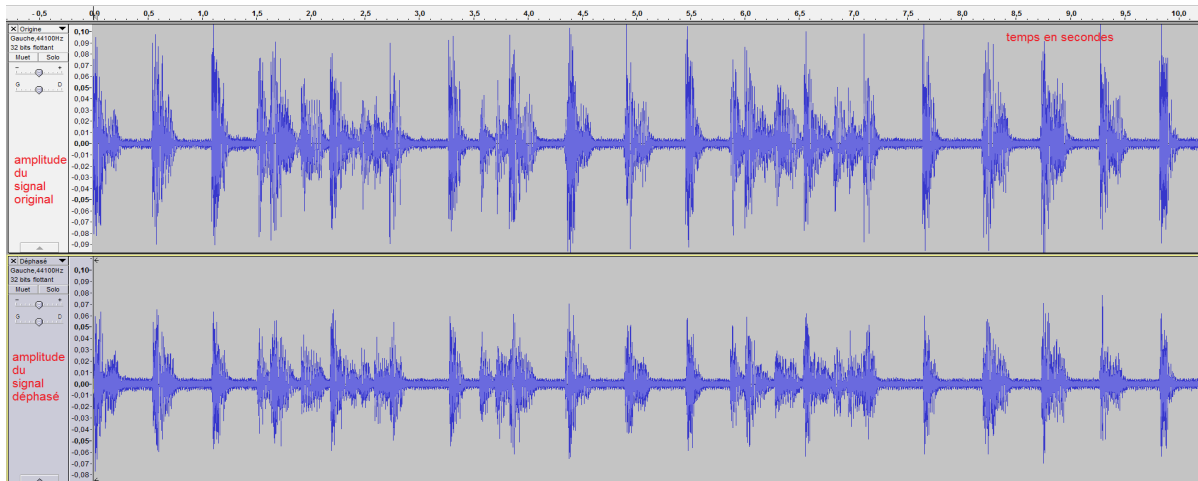
Nous avons alors comparé les amplitudes des signaux originaux et déphasés. En effet, plus l'amplitude est importante, plus le signal est fort. Nous avons analysé plusieurs sons différents allant du très simple au très compliqué.



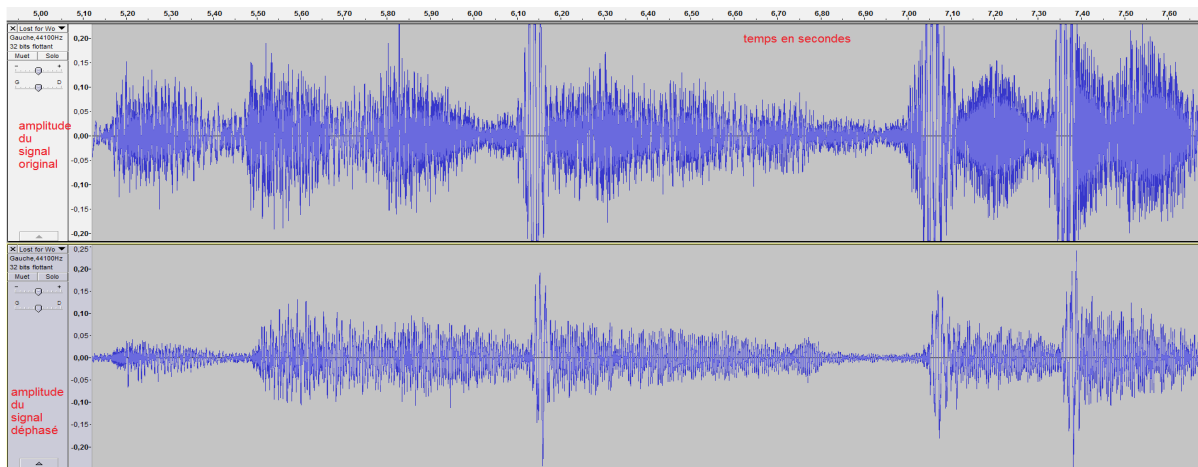
On remarque qu'à chaque fois, la forme du signal est conservée. C'est une surprise car cela signifie que le son est facilement reconnaissable, seul le volume change.

Voici quelques exemples de fichiers son issus de morceaux différents avec des tonalités, des vitesses et un nombre d'instruments différent.

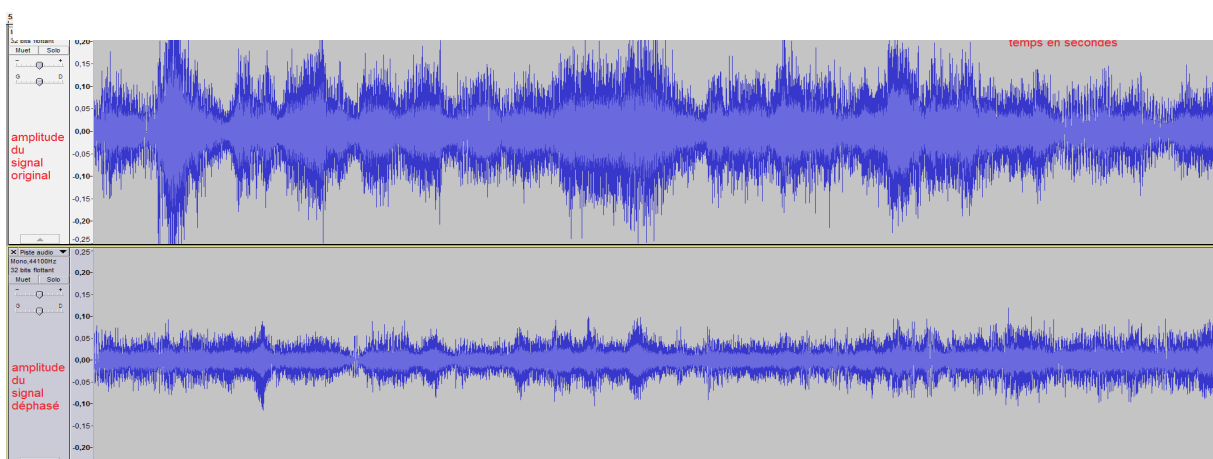
En abscisse, nous avons le temps exprimé en secondes et en ordonnée, le signal placé en haut est le signal original tandis que celui placé en bas est le signal capturé avec la superposition du canal original et du canal déphasé.



Another one bites the dust, Queen



Lost for words, Pink Floyd



The musical box, Genesis (extrait 1)

On remarque que dans chaque cas, à mêmes conditions d'enregistrement, l'amplitude du signal déphasé (en bas) est bien souvent deux fois plus faible que l'amplitude d'origine. Et ce peut importe la forme du signal initial (en haut).

Cette différence au niveau de l'amplitude nous prouve que le signal est atténué dû au phénomène d'interférences.

5.7. Les défis à relever pour un casque actif efficace

Notre approche expérimentale ne nous permet pas d'atteindre le niveau d'atténuation proposé par un casque actif vendu dans le commerce. Le protocole d'atténuation suivit par un tel objet est en réalité bien différent de ce que nous avons effectué et les défis à relever sont multiples.

Tout d'abord, nous nous sommes très peu intéressés à la partie matérielle de l'objet. Les fabricants de casques actifs doivent tenir compte de cette contrainte, le son entendu à l'intérieur du casque n'étant pas le même que celui qui a été capté à l'extérieur du casque. En effet, le coussin du casque et la membrane atténuent le son extérieur, et ceci de manière différente pour chaque fréquence. Il faut noter que les fabricants de casques actifs utilisent l'insonorisation active et passive pour aboutir à une insonorisation efficace.

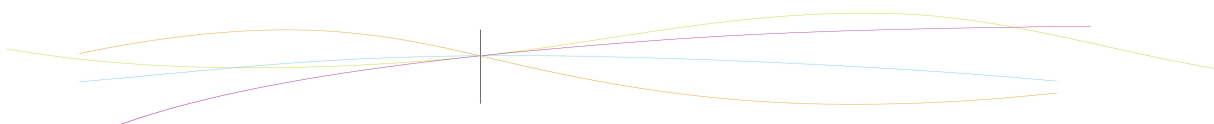
De plus, dans nos expériences avec des fichiers audio, nous avons effectué des analyses de Fourier sur des fichiers préalablement enregistrés. Ces analyses ont été effectuées sur la totalité du fichier, et non sur plusieurs petites parties du fichier. En réalité, l'analyse de Fourier est réalisée quasiment en « temps réel » sur les casques actifs : dès que le son est capturé par le microphone, il est enregistré et analysé par intervalles de quelques dizaines de secondes avant d'être déphasé (onde par onde) et joué dans les haut-parleurs internes du casque. Cette analyse rapide permet de s'adapter quasiment immédiatement aux sons extérieurs.

6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'objectif de ce projet était de comprendre le fonctionnement d'un casque audio actif. Notre but était également de pouvoir mettre en pratique le phénomène d'interférence des ondes acoustiques dans le but d'obtenir une atténuation sonore. Nous sommes fiers d'avoir réussi à reproduire ce phénomène à l'aide de générateurs basses fréquences ou d'un ordinateur. Nous avons été très impressionnés par les résultats obtenus, certaines atténuations ayant été très marquées.

Par ailleurs, nous pouvons dire que ce projet a été complet puisqu'il nous a fallu procéder à des études théoriques avant de pouvoir tenter d'atténuer des sons. Nous pouvons dire que cette approche théorique nous a permis de mieux comprendre comment étaient composées les ondes acoustiques et quelles sont les méthodes pour numériser un son et le modifier. Ces connaissances nous sont précieuses car nous sommes tous des amateurs de musique ! Enfin, nous sommes heureux d'avoir découvert l'une des applications de la transformée de Fourier, outil incontournable pour tout ingénieur.

Suite à ce projet nous pouvons appréhender la difficulté la difficulté du travail à fournir pour proposer une atténuation sonore efficace. Nous avons compris que les casques actifs, objets destinés maintenant au grand public, recelaient de défis scientifiques et techniques très intéressants et surtout très délicats. Nous sommes conscients que notre travail n'a fait qu'effleurer ces défis et nous aimerions beaucoup avoir connaissance de toutes les techniques mises en œuvre réellement pour amener à un tel niveau d'atténuation sonore.



7. BIBLIOGRAPHIE

Tous les hyperliens étaient valides à la date du 10 juin 2013.

Pour la première partie :

Pour l'introduction :

- <http://www.quietys.com/moins-de-bruit/bruit>
- <http://www.ecudap.com/frances/3.pdf>

Pour la partie sur les ondes:

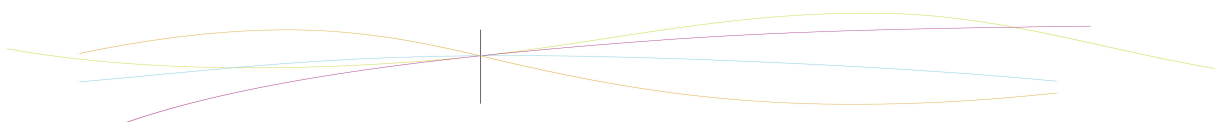
- Cours de P4-1 de M. Guillotin
- http://alainrobichon.free.fr/cours/Physique/Ondes/Approche_exp_interf.pdf
- <http://aune.lpl.univ-aix.fr/~ghio/diaporama/DiapoAcou01FR/sld002.htm>
- http://chercheurs.lps.u-psud.fr/gr_15/SMPEHTML/polypdf/ondchap7.pdf

Pour les séries de Fourier :

- http://alainrobichon.free.fr/cours/Maths/Series_de_Fourier.pdf

Pour les décibels :

- http://www.sonelec-musique.com/mao_mesures_decibel.html



8. ANNEXES

8.1. Annexe 1 : calculs de l'interfrange

Expression de l'amplitude A de l'onde résultante P en , en fonction de P_0 et ϕ

$$A^2 = P_0 e^{j\omega t} e^{-j\phi/2} (1 + e^{j\phi}) \times P_0 e^{-j\omega t} e^{+j\phi/2} (1 + e^{-j\phi})$$

$$e^{j\omega t} e^{-j\phi/2} \times e^{-j\omega t} e^{+j\phi/2} = 1$$

$$A^2 = P_0^2 \times (1 + e^{j\phi}) (1 + e^{-j\phi})$$

$$A^2 = P_0^2 (2 + e^{j\phi} + e^{-j\phi})$$

$$\text{Or } e^{j\phi} + e^{-j\phi} = \cos \phi + j \sin \phi + \cos \phi - j \sin \phi = 2 \cos \phi$$

$$A = \sqrt{2} P_0 \sqrt{1 + \cos \phi}$$

Donner les valeurs de ϕ et de δ pour que A soit max :

$$A_{\max} \text{ pour } \cos \phi = 1$$

$$\text{donc } \phi = 0 + 2k\pi = \frac{2\pi \delta_{\max}}{\lambda}$$

$$\delta_{\max} = k\lambda$$

En considérant les 2 triangles rectangles de la figure, donner l'expression de δ en fonction de a, D et l'abscisse x du point. On suppose a et x petits devant D.

$$\delta = d_2 - d_1$$

$$d_2^2 = D^2 + \left(\frac{a}{2} + x\right)^2 = D^2 + D^2 \left(\frac{a}{2D} + \frac{x}{D}\right)^2 \quad (\alpha)$$

$$d_1^2 = D^2 + \left(x - \frac{a}{2}\right)^2$$

$$d_2^2 - d_1^2 = (d_2 - d_1)(d_2 + d_1)$$

$$D^2 + \left(\frac{a}{2} + x\right)^2 - D^2 - \left(x - \frac{a}{2}\right)^2 = \delta \times 2D$$

Note : $d_2 + d_1 = 2D$ par approximation du fait que x et a soient très petits devant D (*dev limité de α*)

$$\left(\left(\frac{a}{2} + x\right) + \left(x - \frac{a}{2}\right)\right) \left(\left(\frac{a}{2} + x\right) - \left(x - \frac{a}{2}\right)\right) = 2\delta D$$

$$2ax = 2\delta D$$

$$\delta = \frac{ax}{D}$$

Donner l'écart entre deux positions consécutives de M où l'amplitude est maximale. Cet écart noté i , s'appelle l'interfrange.

$$\delta_{max} = \frac{a \cdot x_{max}}{D} = k\lambda$$

$$x_{max} = \frac{k\lambda D}{a}$$

$$i = x_{max}(k+1) - x_{max}(k)$$

$$i = (k+1)\frac{\lambda D}{a} - k\frac{\lambda D}{a}$$

$$i = \frac{\lambda D}{a}$$

Pour notre problème :

On souhaite ajouter un déphasage de π . Donc on a

$$P_1 = P_0 \cos\left(\omega\left(t - \frac{d1}{c}\right) + \pi\right) \text{ et } P_2 = P_0 \cos\left(\omega\left(t - \frac{d2}{c}\right)\right)$$

$$P_1 = -P_0 \cos\left(\omega\left(t - \frac{d1}{c}\right)\right)$$

Le tout est de calculer un interfrange i suffisamment grande pour qu'elle puisse être « écoutée » (largeur de la tête), ou au mieux enregistrée au micro.

On refait les calculs avec un moins et on doit s'arranger dans les valeurs pour avoir le i correct. (Il faut sûrement prendre une bonne fréquence)

Calculs :

$$P_1 = -P_0 \cos\left(\omega\left(t - \frac{d1}{c}\right)\right)$$

Donc

$$P = P_0 e^{j\omega t} e^{-j\phi_2} (1 - e^{j\phi})$$

$$A^2 = P_0^2 \times (1 - e^{j\phi}) (1 - e^{-j\phi})$$

$$A^2 = P_0^2 (2 - e^{j\phi} - e^{-j\phi})$$

$$\text{Or } e^{j\phi} \times e^{-j\phi} = \cos\phi + j\sin\phi + \cos\phi - j\sin\phi = 2\cos\phi$$

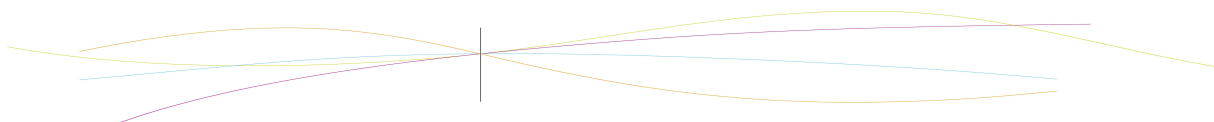
$$A = \sqrt{2}P_0 \sqrt{1 - \cos\phi}$$

Or il faut que l'amplitude soit minimale $\Rightarrow \cos\phi = 1$

$$\phi = 0 + 2k\pi$$

Donc on retombe sur les mêmes calculs que précédemment.

Après on sait que $\lambda = \frac{c}{f}$ où c est la célérité du son (340 m.s^{-1})
 f est la fréquence en Hz = s^{-1}



Prenons la fréquence de la note la (440Hz), d'une distance entre les haut-parleurs HP=10cm et d'une distance D=2 mètres, soit 20HP.

$$i = \frac{cD}{fa} ; i = \frac{340 \times 2}{440 \times 0.1} ; i = \frac{680}{44} ; i = 15,45 \text{ Mètres.}$$

8.2. Annexe 2 : Mise en évidence des paramètres dans la transformés de Fourier

$$f(t) = \cos\left(\frac{t}{2} + \phi\right); w = 2\pi; T = 1;$$

$$c_n(f) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{i(\frac{t}{2} + \phi)} + e^{-i(\frac{t}{2} + \phi)} \times \left(\frac{e^{-nit}}{2}\right) dt$$

$$c_n(f) = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{i(\frac{t}{2} + \phi - nt)} + e^{i(\frac{-t}{2} + \phi - nt)} dt$$

$$c_n(f) = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{e^{i(\frac{t}{2} + \phi - nt)}}{i(\frac{1}{2} - n)} + \frac{e^{-i(\frac{t}{2} + \phi - nt)}}{i(\frac{-1}{2} - n)} dt$$

$$c_n(f) = \frac{1}{4i\pi} \times \left(i(-1)^n \frac{e^{i\phi}}{\frac{1}{2} - n} - i(-1)^n \frac{e^{i\phi}}{\frac{-1}{2} - n} - (-i(-1)^n \frac{e^{i\phi}}{\frac{1}{2} - n}) - i(-1)^n \frac{e^{i\phi}}{\frac{-1}{2} - n} \right)$$

$$c_n(f) = \frac{1}{4\pi} \times \left(2(-1)^n \frac{e^{i\phi}}{\frac{1}{2} - n} + 2(-1)^n \frac{e^{i\phi}}{\frac{1}{2} + n} \right)$$

$$c_n(f) = \left((-1)^n \frac{e^{i\phi}}{\pi} \right) \left(\frac{1}{1 - 2n} + \frac{1}{1 + 2n} \right)$$

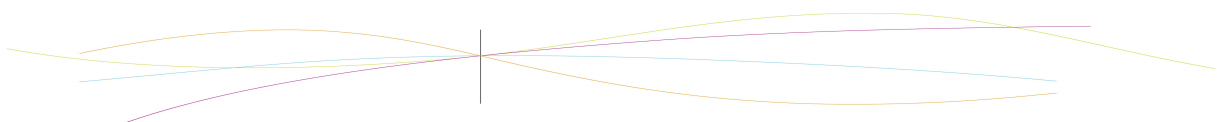
$$c_n(f) = \left((-1)^n \frac{e^{i\phi}}{\pi} \right) \left(\frac{-2}{4n^2 - 1} \right)$$

8.3. Annexe 3 : programme permettant d'obtenir un signal stéréo (canal original + canal déphasé)

```
// Exemple d'analyse de Fourier
clear
stacksize('max')

// On se place le répertoire où se trouve le son
cd 'C:\Users\labphys\Documents\';

// Nom du fichier à traiter
NomFichierSon = "440Hz_44100Hz_16bit_30sec.wav";
```



```

// Corps du programme
// Lecture du fichier
[sonInitial, frequence, bits] = wavread(NomFichierSon);
// On récupère le signal en mono
sonInitial = sonInitial(1, :);
[tmp, Nbp] = size(sonInitial);
DureeSignal = Nbp / frequence;
basetemporelle = linspace(0, DureeSignal, Nbp)';
// FFT du signal
Fomega = fft(sonInitial, 1);
Fomega = Fomega * exp(%i * %pi);
SignalDephase = fft(Fomega, -1);
// On applique la transformée de Fourier inverse et on ne récupère que la
partie réelle
SignalDephase = real(SignalDephase);
// On met sur le 1er canal le son déphasé et sur le 2ème canal le son
initial
sonFinal = [SignalDephase ; sonInitial];
// Ecriture du fichier en stéréo
savewave('son_final.wav', sonFinal, frequence, bits);

// Affichage d'un graph sur le 1er dixième de seconde pour vérifier
l'opposition de phase
Select = (basetemporelle < 0.01);
clf
plot2d(basetemporelle(Select), sonFinal(:, Select)');

```

