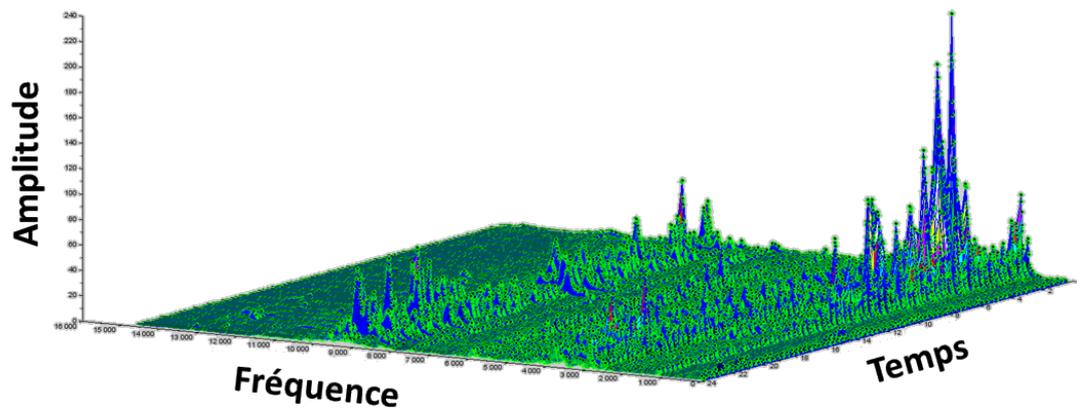


LA DISPERSION DU SON MISE EN EVIDENCE DANS UN BOL DE LAIT



Etudiants :

Thomas LEMERLE Anne-Sophie BONABAL

Charlotte NACE Lucas RAMAGE

Alice DUVIVIER

Enseignant-responsable du projet :

M. Jérôme YON

Date de remise du rapport : **08/06/2016**

Référence du projet : **STPI/P6/2016 – 45**

Intitulé du projet : **La dispersion du son mise en évidence dans un bol de lait**

Type de projet : **expérimental**

Objectifs du projet :

- **Comprendre un phénomène physique**
- **Étudier la hauteur du son**
- **Étudier la vitesse du son dans différents milieux**
- **Utiliser des outils informatiques pour étudier et modéliser un son**
- **Travailler en groupe sur une période de 6 mois**

Mots-clefs du projet :

Son: Le son est une vibration mécanique d'un fluide, qui se propage sous forme d'ondes longitudinales grâce à la déformation élastique de ce fluide.¹

Milieu dispersif: un milieu est dit dispersif si la vitesse de propagation du son dans ce milieu dépend de la fréquence de l'onde.

Onde stationnaire: Une onde stationnaire est le phénomène résultant de la propagation simultanée dans des sens opposés de plusieurs ondes de même fréquence et de même amplitude, dans le même milieu physique, qui forme une figure dont certains éléments sont fixes dans l'espace. Au lieu d'y voir une onde qui se propage, on constate une vibration stationnaire mais d'intensité différente, en chaque point observé. Les points fixes caractéristiques sont appelés des nœuds de pression.²

Transformée de Fourier: La transformée de Fourier est une fonction d'analyse qui transforme une fonction intégrable sur l'ensemble des réels ou celui des complexes en une autre fonction, qui met en évidence le spectre des fréquences de cette fonction.

¹ [https://fr.wikipedia.org/wiki/Son_\(physique\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Son_(physique)), Wikipédia

² <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=8173>, Techno-science.net

TABLE DES MATIERES

1. Introduction	5
2. Méthodologie / Organisation du travail	6
3. Expérience	8
4. Analyse des enregistrements – Outils informatique	9
4.1. La transformée de Fourier	9
4.2. Outils informatiques.....	11
4.3. Résultat avec le chocolat chaud	15
5. Compréhension du phénomène	16
5.1. L'absorption	16
5.2. La réflexion.....	17
5.3. La résonance	17
5.4. Les ondes stationnaires	17
Modèle théorique.....	18
5.5. L'influence de la géométrie sur la longueur d'onde	20
Illustration	21
5.6. L'influence de la présence de bulles sur la vitesse	22
5.7. La dispersion	23
6. Résultats	24
7. Conclusions et perspectives	25
9. Annexes	29
9.1. Listings des programmes réalisés	29
1.1. Schémas de montages, plans de conception... ..	33
1.2. Propositions de sujets de projets (en lien ou pas avec le projet réalisé).....	33

1. INTRODUCTION

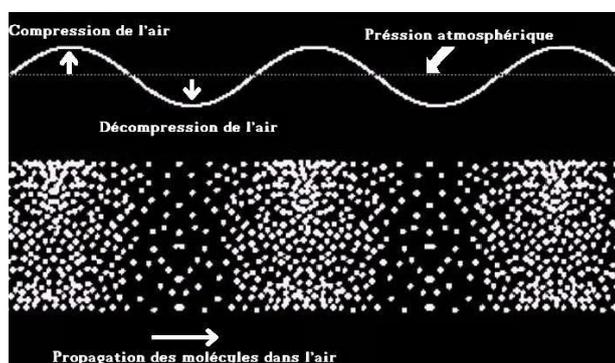
Dans le cadre de notre projet physique de 2ème année du 1er cycle ingénieur de l'INSA de Rouen, nous avons étudié le phénomène à l'origine de la variation de fréquence du son dans un bol de lait chocolaté. Notre sujet est né d'une expérience très simple : lorsqu'on ajoute du cacao dans un bol de lait chaud et que l'on mélange le tout, on entend, lorsqu'on tape avec une cuillère sur le bol, la hauteur du son changer. En effet, au fil des secondes le son devient de plus en plus aigu.

Le but de notre projet était de répondre aux questions suivantes :

- Avons-nous bien de la dispersion?
- Ce phénomène n'est-il observable qu'avec le chocolat ?
- Que se produit-il réellement dans le bol de lait ?

Nous avons donc cherché à identifier le phénomène physique se produisant dans le bol de lait. Nous nous sommes aussi attachés à comprendre comment utiliser le logiciel Scilab pour pouvoir analyser les sons une fois que nous les aurions enregistrés. Parallèlement à la compréhension de la partie théorique, nous avons donc réalisé des enregistrements afin d'analyser le phénomène.

Mais commençons tout d'abord par définir ce qu'est un son afin de mieux pouvoir comprendre les expériences que nous avons réalisées. Le son est une onde produite par la vibration mécanique d'un support fluide ou solide et propagée grâce à l'élasticité du milieu environnant sous forme d'ondes longitudinales. Le son se propage sous forme de variation de pression. À la source, le milieu est déformé. La déformation se propage aux molécules voisines, qui vont, à leur tour, transmettre la perturbation de proche en proche. Les particules entrent donc en vibration les unes après les autres autour de leur position d'équilibre. Il n'y a pas de transport de matière. Le son est transmis dans des milieux fluides tels que l'eau ou l'air mais il peut aussi être transmis dans des milieux solides, à l'aide de vibrations. Une image souvent utilisée pour modéliser la propagation d'un son est celle des rides à la surface de l'eau lorsqu'on jette une pierre dedans. On a alors des creux et des bosses qui se forment à partir du point où on a jeté la pierre. Pour le son, on observe la même chose à partir de l'endroit où le son est émis.



Nous allons commencer par présenter notre expérience pour montrer le phénomène, puis nous expliquerons comment nous avons procédé pour analyser nos enregistrements. Ensuite, nous vous proposerons notre compréhension du phénomène se produisant à l'intérieur du bol et nous finirons par les résultats se produisant avec d'autres liquides.

2. METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Ne sachant pas ce qui produisait cette singularité, nous avons passé les quatre premières semaines à faire de nombreuses hypothèses pour tenter de l'expliquer. La recherche était compliquée du fait des nombreuses pistes possibles qui se raccordaient, ou non, à l'intitulé de notre sujet. Nous nous sommes penchés sur la dispersion du son, les phénomènes de résonances, mais aussi les propriétés chimiques du lait et du cacao. Nous avons réalisé de nombreuses expériences chez nous pour savoir s'il n'y avait qu'avec le lait que le phénomène étudié était observable, et cette hypothèse s'est avérée être fausse.

Après avoir découvert la cause de ce fait, nous avons essayé de démontrer les formules trouvées qui expliquaient la variation dans la hauteur du son. Vers le milieu du projet nous avons consacré une séance à l'enregistrement du son avec différents liquides.

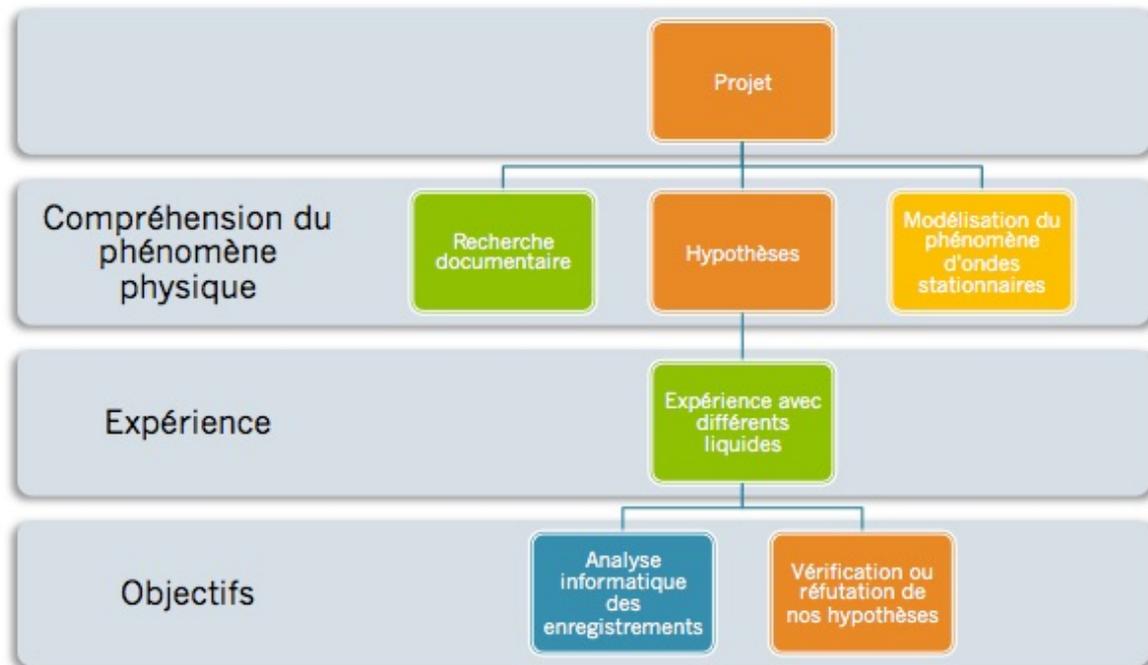
Nous nous sommes répartis le travail pour explorer au mieux toutes les pistes que nous avons et pour être prêt à analyser le son que nous avons enregistré dès la théorie assimilée.

- Lucas s'est donc occupé de toute la partie informatique, et de l'analyse de Fourier à l'aide du logiciel Scilab,
- Thomas a aidé sur la partie informatique et la modélisation des ondes stationnaires,
- Alice, Charlotte et Anne-Sophie ont réalisé les recherches documentaires et les expériences, et aidé leurs camarades.

De plus, au début de chaque séance, nous faisons un point pour expliquer ce que chacun avait trouvé durant la semaine, ce qu'il fallait faire pendant la séance et qu'elles étaient les difficultés rencontrées. En fin de séance nous prenions quelques minutes pour voir quelles recherches il fallait effectuer pour la semaine suivante.

Une fois la partie physique comprise, nous nous sommes consacrés à l'élaboration de notre rapport et à l'analyse des sons enregistrés.

Organigramme des tâches réalisées et des étudiants concernés :



3. EXPERIENCE

Comme nous avons commencé à l'expliquer, notre sujet était basé sur une expérience : lorsque l'on ajoute du cacao dans un bol de lait et de l'on tape sur le bol, après avoir remué, la hauteur du son change. Nous avons donc fait cette expérience pour illustrer ce phénomène. Nous avons utilisé une éprouvette de 50ml, un enregistreur et une cuillère. Nous avons versé environ 50ml de lait préalablement chauffé dans notre bécher, puis nous avons inséré le chocolat et avons remué le mélange. Enfin, nous avons tapé sur le bas de notre bécher avec la cuillère et enregistré le son.



Nous avons découvert que le phénomène que nous étudions était bien connu. Il se nomme « Hot Chocolate Effect » ou « Allasonic Effect ». Il a été étudié par Frank S Crawford en 1982.

Bien que ce phénomène soit particulièrement observable avec le lait et le cacao, on peut aussi l'observer avec du café, du soda, de l'eau chaude ou bien de l'eau pétillante.

Lorsque l'on ajoute du cacao dans du lait chaud, des bulles d'air sont entraînées dans le liquide. Lors du mélange, l'air se mélange au liquide et modifie ainsi sa composition. Une émulsion se forme. Ensuite, lorsque l'on tape avec une cuillère sur le bord du bol, ces bulles d'air remontent à la surface, modifiant ainsi la hauteur du son. En effet, les bulles modifient la vitesse du son en modifiant la compressibilité du liquide, et lorsqu'elles remontent à la surface, elles influencent la fréquence du son entendu.

C'est cette hypothèse que nous avons choisie pour la poursuite de notre étude.

4. ANALYSE DES ENREGISTREMENTS – OUTILS INFORMATIQUE

Pour pouvoir analyser les sons enregistrés afin de vérifier nos hypothèses, nous avons utilisé le logiciel Scilab. Nous expliquerons comment nous l'avons utilisé, mais nous allons tout d'abord expliquer ce qu'est la transformée de Fourier, essentielle pour l'analyse des sons.

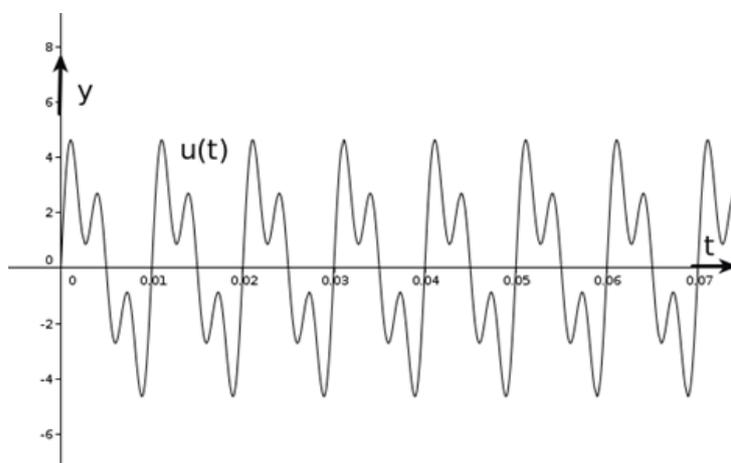
4.1. La transformée de Fourier

Lors de notre expérience, nous avons enregistré le son qui sortait de l'éprouvette. Chaque fois que l'on frappait sur l'éprouvette une onde sonore était créée. Cette onde peut-être décomposée comme une somme de sinus en utilisant la transformée de Fourier. La transformée de Fourier est une fonction d'analyse qui transforme une fonction intégrable sur l'ensemble des réels ou celui des complexes en une autre fonction, qui met en évidence le spectre des fréquences de cette fonction. Elle permet donc de décomposer la fonction correspondant au son que l'on étudie en une somme de sinus. Comme chaque son est la somme de plusieurs vibrations, on peut tous les décomposer grâce à l'analyse de Fourier. En physique, on utilise la formule:

$$FFT(f) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{1}{2}}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt$$

On a FFT qui est la fonction transformée de Fourier, f la fonction intégrable qui représente l'onde, t la variable de temps et la pulsation sonore. Lorsqu'on applique cette formule, on approxime la fonction (qui représente l'onde) en une somme de sinus en l'intégrant par rapport au temps.

Exemple : Il est plus facile de comprendre le principe en utilisant un exemple simple. Nous avons utilisé le logiciel GeoGebra pour le réaliser. Nous avons tracé une fonction sinusoïdale quelconque:



Fonction $u(t)$ tracée sur GeoGebra

Sa période T est de 10⁻² secondes et sa fréquence f=100 Hz.

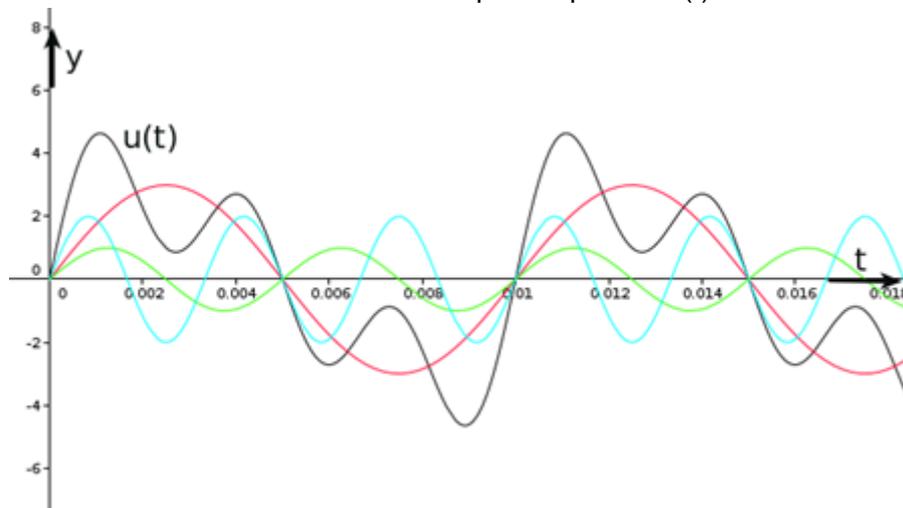
Si on applique le principe de décomposition du signal de Fourier, on peut décomposer cette fonction comme la somme de signaux sinusoidaux de la forme :

$$\sum_{n=0}^N a_k \cos(n \omega t) + b_n \sin(n \omega t) = \sum a_k \cos(2\pi n f t) + b_n \sin(2\pi n f t)$$

On obtient dans notre exemple:

$$u(t) = 3 \sin(2\pi 100 t) + \sin(2\pi 200 t) + \sin(2\pi 300 t)$$

On affiche ensuite les 3 différentes fonctions qui composent u(t):

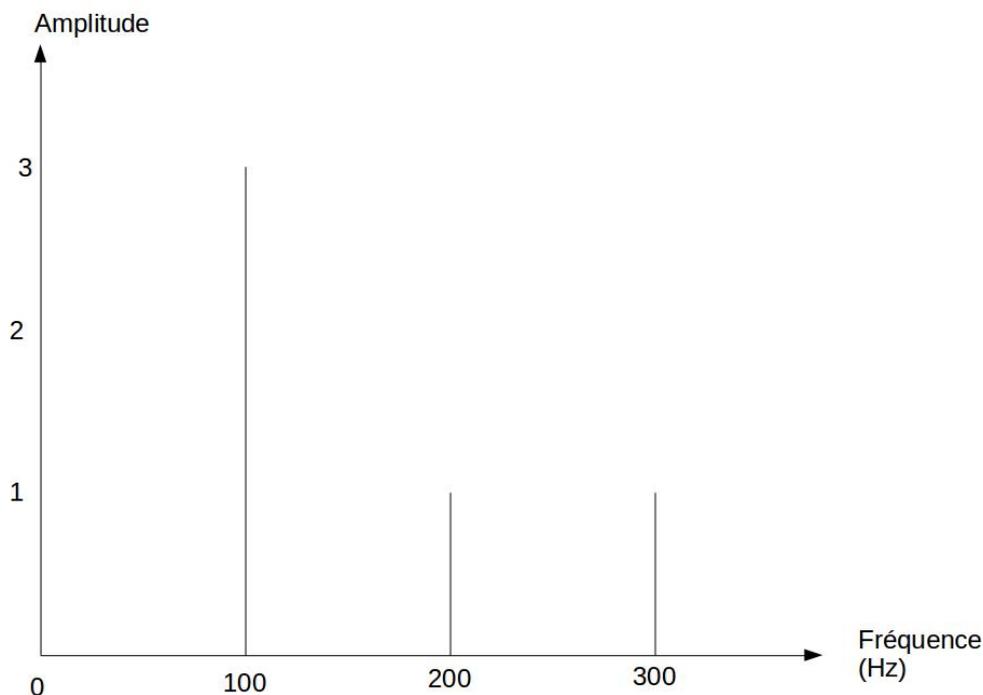


Ensemble des harmoniques de u(t) et u(t)

- Le signal rouge correspond à la fréquence fondamentale f=100Hz. C'est le premier harmonique.
- Le signal vert correspond à la fréquence $f_2=2f=200$ Hz. C'est le deuxième harmonique.
- Le signal bleu correspond à la fréquence $f_3=3f=300$ Hz. C'est le troisième harmonique.

On observe que la somme des 3 signaux forme bien la fonction u(t). La décomposition du signal par le principe de Fourier est donc correcte.

On peut aussi obtenir le spectre des fréquences de la fonction en utilisant la transformée de Fourier:



Spectre des fréquences de la fonction $u(t)$

On observe bien 3 pics qui correspondent aux harmoniques de $u(t)$:

- un pic à 100 Hz d'amplitude 3: celui de la fréquence fondamentale ($3\sin(2\pi 100t)$)
- un pic à 200 Hz d'amplitude 1: celui du 2ème harmonique ($\sin(2\pi 200t)$)
- un pic à 300 Hz d'amplitude 1: celui du 3ème harmonique ($\sin(2\pi 300t)$)

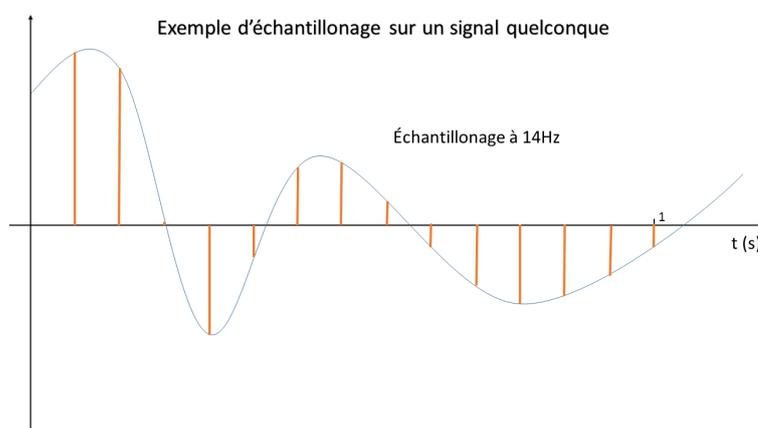
4.2. Outils informatiques

4.2.1. Échantillonnage/ Quantification, fichier WAV

Comme dit précédemment, le son est produit par vibrations de l'air. Cette vibration est captée par nos tympans et interprétée comme un son par notre cerveau. Pour récupérer un son sur ordinateur, on émule le tympan avec un micro. La membrane de ce dernier va ainsi vibrer selon l'onde sonore et générer un courant électrique que l'on peut visualiser sur un écran d'oscilloscope par exemple. C'est alors une représentation fidèle de l'onde mais qui ne peut pas être directement manipulée sur ordinateur car ce signal est continu alors qu'un ordinateur ne peut travailler qu'avec un nombre fini de valeurs : un signal numérique. C'est pourquoi on

transforme ce signal dit analogique en un signal numérique. Pour ce faire, la durée de l'onde a été divisée en plusieurs intervalles de durée égales, c'est l'échantillonnage. La valeur du signal est récupérée au début de chaque intervalle : la quantification. L'ensemble de ces valeurs forme alors le signal numérique. La fréquence d'échantillonnage est alors le nombre de ces intervalles par secondes de signal. Finalement, il faut coder en bits ces valeurs afin qu'elles puissent être lues sur ordinateur. On a généralement deux nombres de bits possibles : 8 (256 valeurs) et 16 (65536 valeurs). Plus on code sur un nombre de bits élevé, plus l'encodage est de qualité.

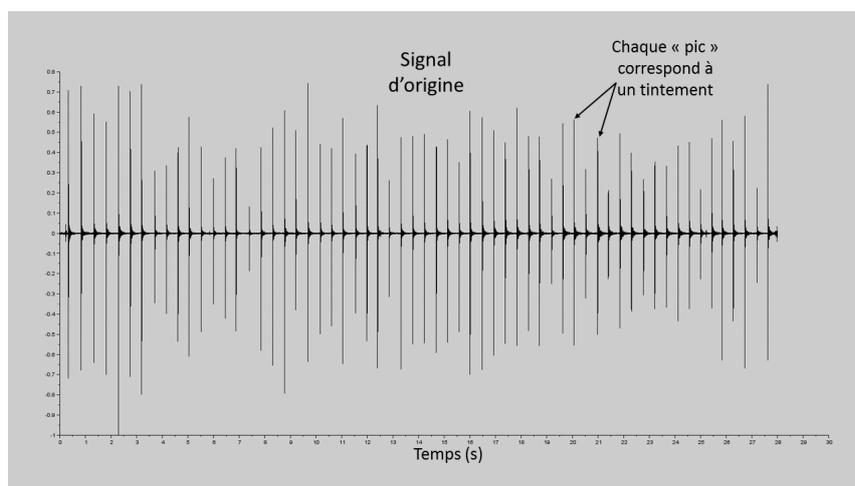
Taux d'échantillonnage	Qualité du son
44 100 Hz	qualité CD
22 000 Hz	qualité radio
8 000 Hz	qualité téléphone



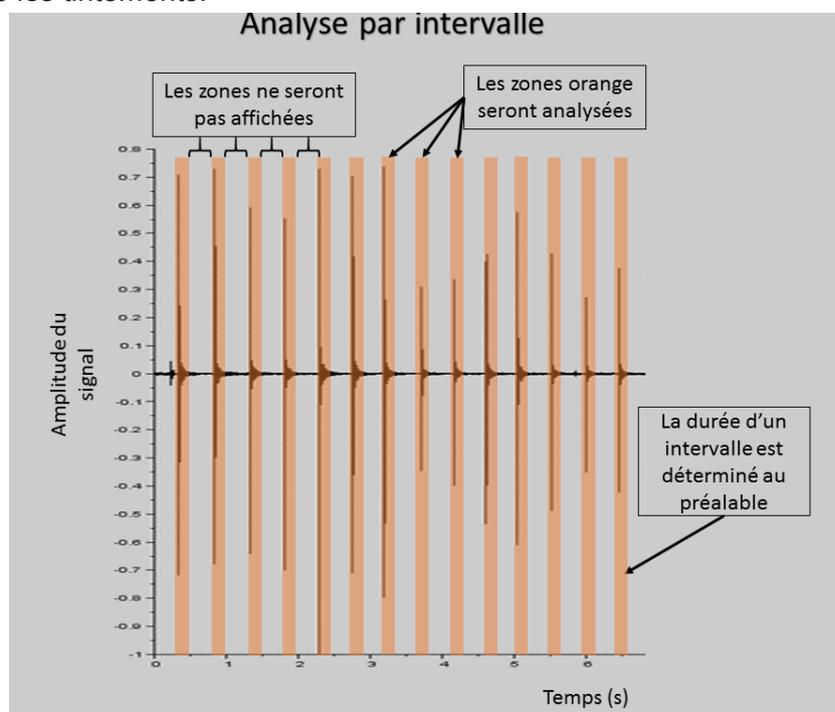
Nous manipulons un fichier de format WAV. C'est un format qui permet de stocker un son sous des normes et sans compression. Le plus important ici étant l'absence de compression qui facilite la manipulation. En effet, la lecture du fichier WAV nous permet d'obtenir les valeurs de la quantification ainsi que la fréquence d'échantillonnage et le nombre de bits utilisés lors du codage.

4.2.2. Scilab

L'objectif du programme est de montrer et de chiffrer le « décalage » du son que l'on entend. Il nous fallait donc un outil pour étudier les variations de fréquence de notre signal. Nous avons utilisé le logiciel Scilab qui permet de récupérer les magnitudes du signal ainsi que d'effectuer des opérations matricielles et des transformations. En effet, nous avons utilisé la transformée de Fourier rapide et discrète afin de récupérer les fréquences principales du signal. Suite aux expériences nous disposons de fichiers audio au format WAV que nous pouvons analyser. Ces fichiers étaient d'une durée d'environ 30 secondes et reproduisant une centaine de tintements. Il est donc inutile de calculer une transformée de Fourier sur la totalité du fichier.



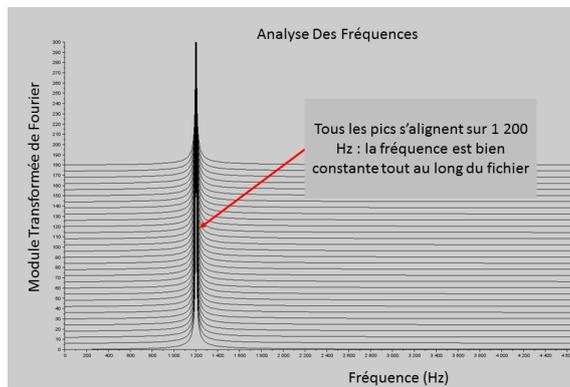
Nous avons opté pour une analyse sur chaque tintement, c'est-à-dire par intervalle. Le but étant de n'étudier que les tintements.



Pour chaque son il s'agissait de tracer son spectre de Fourier afin de montrer le décalage de fréquence.

Nous avons d'abord testé le programme sur des sons générés manuellement. En effet, puisque nous connaissons les fréquences avec lesquelles nous avons créé les fichiers nous avons pu vérifier le bon fonctionnement. Pour ce faire, nous avons d'abord lu un fichier provenant de notre expérience, non pas pour son signal mais pour sa fréquence d'échantillonnage et nous avons utilisé des fréquences audibles. Nous avons ainsi pu générer des fichiers tests proches de nos expériences (en fréquence d'échantillonnage et en ordre de grandeur de fréquence en tout cas).

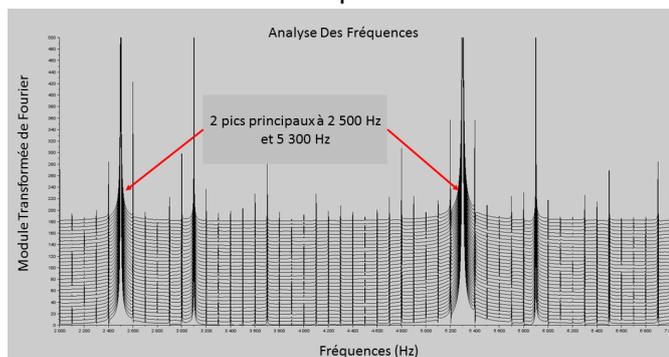
1) Fréquence fixe



On remarque bien que les raies s'alignent à la fréquence attendue : 1 200 Hz.

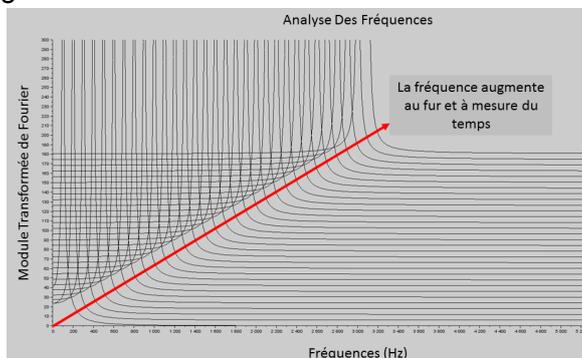
2) Deux fréquences

Cette fois on a additionné deux sinusoïdes de fréquences 2500Hz et 5300Hz.



On a cette fois encore le résultat attendu : deux pics principaux sur les fréquences 2500Hz et 5300Hz. On remarque cependant, quelques autres pics secondaires. C'est en fait dû à la compression appliquée par Scilab lors de la génération du fichier WAV. En effet, lors de l'analyse directement sur le tableau créé (avant l'enregistrement WAV), on ne voit pas ces artefacts.

3) Fréquence changeante

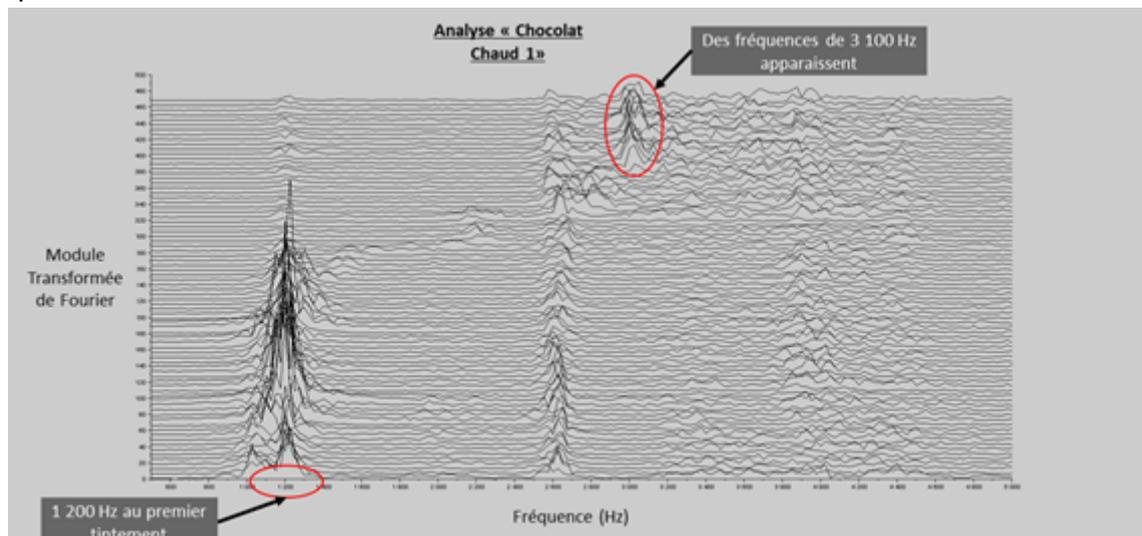


On voit bien la fréquence augmenter progressivement au long du fichier, partant de 0Hz et finissant aux alentours des 3000 Hz.

Ces trois exemples n'ont pas été pris au hasard puisque nous allons voir qu'il s'agit des intervalles de fréquences auxquels on a été confrontés lors de notre expérience.

4.3. Résultat avec le chocolat chaud

Nous nous sommes donc servis de ces outils pour étudier nos enregistrements. Voici ce que nous avons obtenu :



On voit bien une dérive de fréquence puisque la fréquence initiale est de 1200 Hz tandis que la fréquence finale est de 3100Hz. Nous entendons la hauteur du son augmenter au cours du temps lors de notre expérience. Cette analyse informatique nous permet ainsi d'évaluer de combien de hertz la fréquence a été modifié.

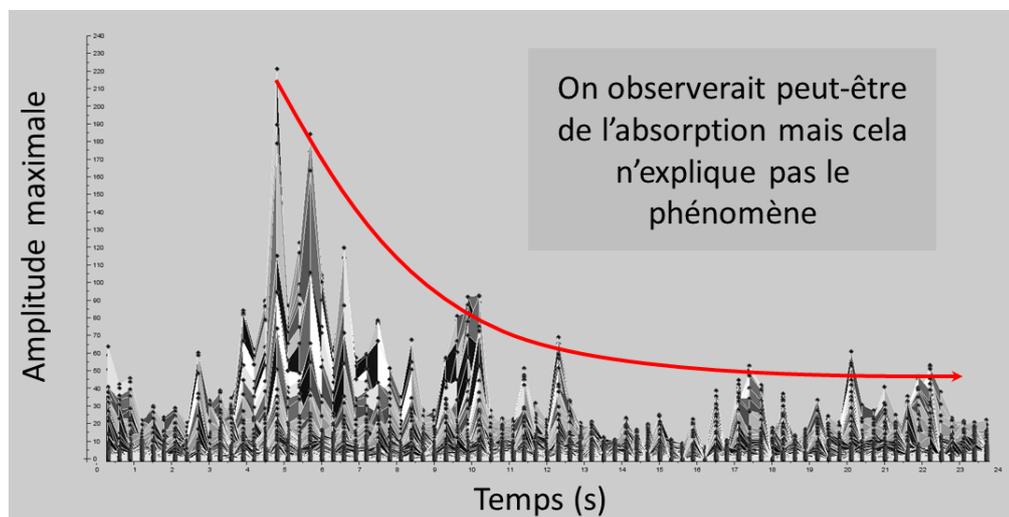
5. COMPREHENSION DU PHENOMENE

Tout d'abord, rappelons que l'intitulé de notre sujet était « La dispersion du son mise en évidence dans un bol de lait ». Cependant, Mr Yon nous a précisé dès le début de notre projet qu'il ne connaissait pas la cause réelle du phénomène et que, par conséquent, il se pouvait que notre sujet diffère un peu de son énoncé. C'est pourquoi nous avons fait des recherches sur tous les phénomènes liés au son. Il en existe un certain nombre mais les plus répandus sont la réflexion, l'absorption, et la dispersion.

5.1. L'absorption

L'absorption se produit quand l'énergie acoustique est transformée en énergie mécanique et parfois calorifique. L'onde sonore est alors atténuée. Lorsqu'une onde arrive sur un obstacle, elle est réfléchie. Mais, une partie de l'onde sera également absorbée. L'absorption dépend de la fréquence de l'onde incidente et des caractéristiques du matériau sur lequel l'onde arrive. L'air est, par exemple, un « matériau » qui absorbe le son, ce qui implique que lorsqu'un son part d'un point pour aller vers un autre, son niveau sonore aura diminué en fonction de la distance parcourue. De plus, l'air absorbe plus les fréquences aiguës que les fréquences graves.

Il est possible qu'il y ait un petit peu d'absorption lors du changement de milieu mais ni nos recherches ni nos expériences ne nous ont pas permis de conclure que c'est ce phénomène qui explique ce qui se produit dans notre bol. En effet, nous n'avons pas constaté de nette baisse de l'amplitude du son au cours de notre expérience. L'analyse de signaux nous a montré que, lorsque l'on a des fréquences aiguës, l'amplitude diminue. En revanche, au début de l'expérience, les sons sont plus graves et on n'observe presque pas de diminution de l'amplitude. On aurait donc de l'absorption lorsque nos signaux deviennent aigus mais ce n'est pas l'absorption qui explique la dérive de fréquence.



5.2. La réflexion

La réflexion se produit lorsqu'une onde sonore rencontre une surface. Lorsqu'elle est réfléchi, une nouvelle onde se crée et elle repart dans une direction différente par rapport à l'onde incidente. Lorsqu'on a des réflexions successives, on aura un phénomène d'écho qui se créera. De même, si l'on se trouve dans une salle vide et que l'on a des nombreuses réflexions, on aura d'une part un phénomène d'écho et d'autre part un phénomène de réverbération. En outre, c'est aussi grâce à ce phénomène que l'on peut obtenir des ondes stationnaires, que nous étudierons par la suite. Quand une onde se réfléchit sur un obstacle fixe, on a vu qu'une onde réfléchi se forme. La superposition de l'onde incidente et de l'onde réfléchi forme alors une onde stationnaire.

Au vu de ce que l'on vient d'expliquer, nous avons pensé que nous pouvions avoir de la réflexion dans notre expérience mais que l'explication était tout de même plus complexe que simplement un phénomène de réflexion.

5.3. La résonance

La résonance correspond à la propriété de certains systèmes à être plus sensible à certaines fréquences qu'à d'autres. Lorsqu'ils sont soumis à des forces périodiques dans le temps, ces systèmes absorbent de l'énergie, mécanique ou électromagnétique. Pour qu'il y ait résonance, il faut que la fréquence d'excitation du système soit très proche de la fréquence propre de celui-ci. La fréquence propre, quant à elle, peut se définir comme la capacité d'un système à retourner dans sa position d'équilibre à travers des oscillations qui lui sont spécifiques, lorsqu'il avait été déplacé de sa position d'équilibre.

Après excitation, un système est siège d'oscillations. La fréquence de ces oscillations va ensuite varier pour s'égaliser avec la fréquence de résonance du système, moment où ce dernier absorbera le plus d'énergie. C'est pour cette raison que nous avons pensé que le phénomène de résonance pouvait éventuellement être une explication à notre problème. En effet, avec le bol de lait, lorsqu'on attend un certain temps, le son redevient aussi « grave » qu'il l'était initialement.

5.4. Les ondes stationnaires

Une onde stationnaire est le nom que porte l'addition de deux ondes de fréquence et d'amplitude identiques se propageant dans un milieu dans des directions différentes. Le résultat de l'addition produit une onde immobile (onde qui ne se déplace pas vers la gauche ni vers la droite) dans le milieu. On observe des ondes stationnaires quand il existe un phénomène de réflexion dans le milieu de propagation.

Nous avons utilisé le logiciel libre GeoGebra pour modéliser une onde stationnaire. Dans un premier temps, nous avons programmé une onde stationnaire simple, puis nous nous sommes intéressés à l'onde stationnaire créée dans notre expérience.

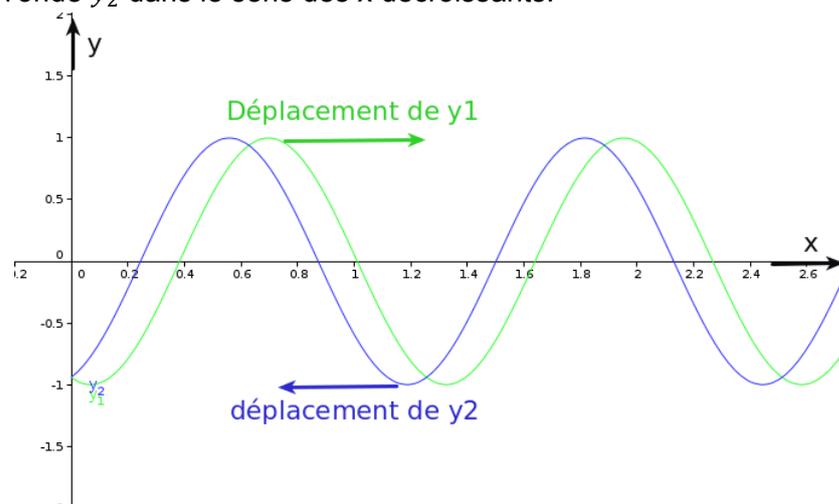
Modèle théorique

Pour mieux comprendre le phénomène des ondes stationnaires, nous avons modélisé l'exemple le plus simple. Nous avons défini 2 ondes par les fonctions mathématiques suivantes:

$$y_1(x, t) = A \sin(\omega t - kx)$$

$$y_2(x, t) = A \sin(\omega t + kx)$$

Ces fonctions dépendent des variables de temps " t " et d'espace " x ". " A " est l'amplitude de l'onde et est la même pour les deux fonctions. L'onde y_1 se déplace dans le sens des x croissants et l'onde y_2 dans le sens des x décroissants.



Modélisation de 2 ondes avec GeoGebra

La pulsation ω est définie par:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad \text{avec } T \text{ la période temporelle (secondes)} \\ f \text{ la fréquence (Hertz)}$$

ω est le même pour les deux fonctions car pour avoir des ondes stationnaires, il faut que la fréquence des deux ondes soit identique.

Le nombre d'onde k est défini par:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{avec } \lambda \text{ la période spatiale (mètres)}$$

k est le même pour les deux fonctions car elles ont la même période spatiale.

L'onde stationnaire est définie par la somme de y_1 et y_2 soit:

$$y_T(x, t) = y_1(x, t) + y_2(x, t)$$

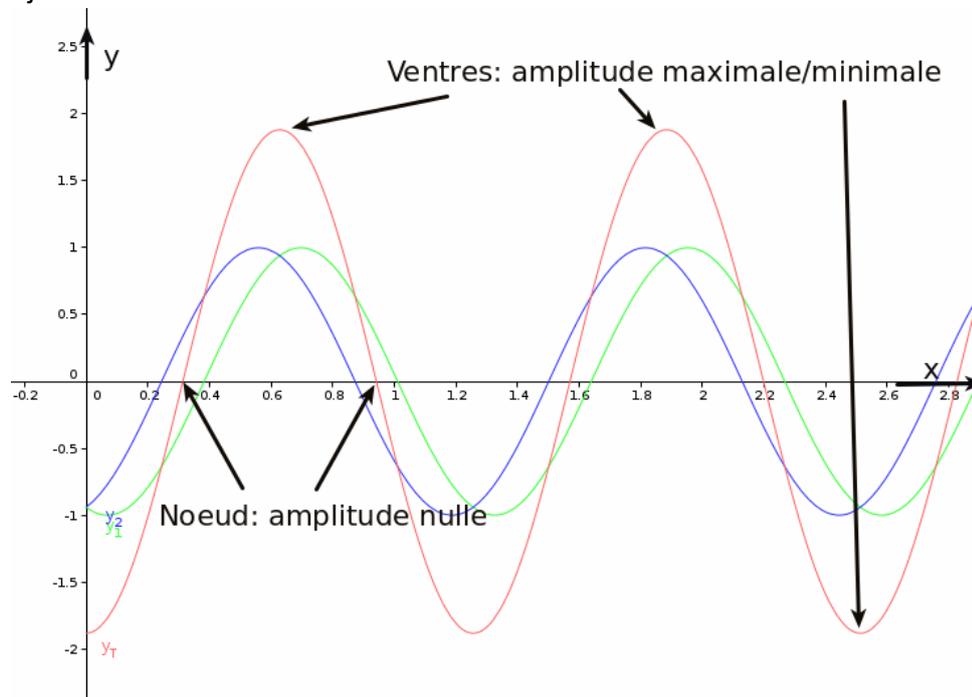
$$y_T(x, t) = A \sin(\omega t - kx) + A \sin(\omega t + kx)$$

$$y_T(x, t) = A \sin(\omega t) \sin(kx)$$

On a donc programmé ces 3 fonctions: y_1, y_2 et y_T sur GeoGebra. Nous avons ensuite fait varier le temps de 0 à 10 secondes avec un pas de 0.1 secondes. On peut ainsi observer que y_1 se déplace dans le sens des x croissants, y_2 se déplace dans le sens des x décroissants et que y_T est bien une onde stationnaire. C'est-à-dire que, on s'aperçoit que y_T s'annule pour tout $\omega t = 0[\pi]$. Et si on regarde à $\omega t = \frac{\pi}{2}[\pi]$, l'amplitude de la fonction est:

- maximale pour $x_m = (n + \frac{1}{2})(\frac{\lambda}{2})$ avec $n \in \mathbb{N} \Rightarrow$ présence d'un ventre
- minimale pour $x_n = n(\frac{\lambda}{2})$ avec $n \in \mathbb{N} \Rightarrow$ présence d'un noeud

En effet, l'amplitude de y_T est toujours nulle pour certains points fixes de l'axe des abscisses et les maximums/minimums sont aussi situés sur des points fixes de l'axe des abscisses. L'onde y_T donne donc l'impression de ne pas se déplacer car ses nœuds et ses ventres sont toujours situés aux mêmes endroits. C'est donc bien une onde stationnaire.



Modélisation d'une onde stationnaire sur GeoGebra

5.5. L'influence de la géométrie sur la longueur d'onde

La géométrie du récipient considéré ici est celle d'un tuyau semi-ouvert. A l'ouverture du tuyau se produit un phénomène de réflexion. Pour mieux comprendre cela il est important d'introduire la notion d'impédance. Elle caractérise la résistance d'un milieu au passage d'une onde, et dépend de la pression acoustique et de la vitesse de la particule associée au milieu. A chaque fois que l'impédance change, il se produit un phénomène de réflexion.

En effet, lors de la percussion en bas du tube (assimilé au bol), on cause une variation de pression forcée dans la direction de la sortie du tube. Quand l'onde atteint l'autre extrémité du tube, son comportement dépend de la géométrie de cette extrémité :

- Si cette extrémité est ouverte, cela correspondra par approximation à une impédance faible, quasiment nulle, l'onde sera entièrement réfléchie dans la direction opposée de l'onde incidente.
- Si cette extrémité est fermée, qui correspondra par approximation à une impédance quasi infinie, l'onde ne sera pas réfléchie.

#1 : L'onde incidente progresse vers la sortie du tube	
#2 : Elle est réfléchie	
#3 : Elle n'est pas réfléchie	

Chaque point du milieu vibre alors sous l'effet de paires d'ondes, l'onde incidente et l'onde réfléchie :

- Si les deux ondes s'ajoutent alors la vibration est maximale, on a donc un ventre.
- Si les deux ondes se soustraient alors la vibration est minimale, on a un nœud.

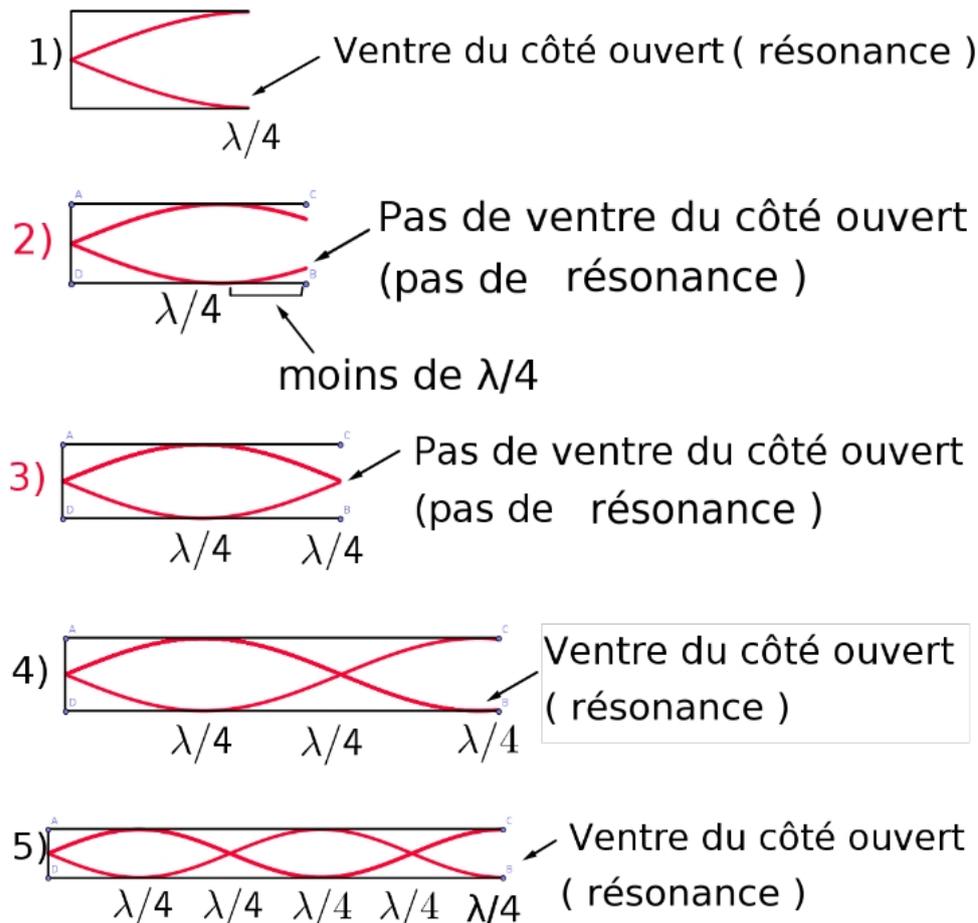
La géométrie du récipient influe sur la longueur d'onde perçue dans la mesure où l'onde qui sera la plus amplifiée sera l'onde stationnaire. Il est important ici de comprendre pourquoi les autres ondes ne sont pas perceptibles. Nous nous sommes donc penchés sur l'acoustique des instruments, et notamment sur celle de la flûte et des percussions, qui correspondent à des tubes semi-ouverts. Dans cette optique, nous avons étudié la notion de "résonateur". Un système physique peut avoir plusieurs fréquences de résonance, dépendantes du nombre de leurs degrés de libertés. On utilise la notion de "résonateur" pour des objets homogènes traversés par des ondes acoustiques ayant une vitesse constante et qui se reflètent d'une extrémité à l'autre. Il va donc de soi que le système étudié a un grand nombre de fréquences de

résonances. Mais ces dernières, se réfléchissant, interfèrent de manière destructive et amènent donc à la création d'une onde stationnaire, liée à l'interférence de deux ondes ayant la même fréquence.

Par ailleurs, physiquement, la fréquence se définit comme la vitesse divisée par la longueur d'onde, c'est à dire $f = \frac{c}{\lambda}$. Or, dans un milieu fermé on a $h = \frac{\lambda}{4}$ car l'écart entre deux nœuds successifs (ou entre deux ventres successifs) correspond à une demi-longueur d'onde des ondes progressives initiales et donc l'écart entre un nœud et un ventre successifs correspond à un quart de longueur d'onde des ondes progressives initiales. On retrouve donc bien cela dans notre expérience puisque le bol ou la tasse est fermé au fond et ouverte au-dessus. A l'extrémité fermée, on retrouve un nœud, et à l'extrémité ouverte, on a un ventre pour une onde de longueur d'onde $\lambda = 4h$.

Illustration

Tube semi-ouvert



Dans les cas 2 et 3, le tuyau est tel qu'il n'y a pas de ventre qui se forme à l'extrémité du côté ouvert, ce qui signifie qu'il n'y a pas de résonance. Dans les cas 1, 4 et 5 la taille du tuyau est un multiple impair de $\frac{\lambda}{4}$, il y a donc résonance.

On peut déduire de tout ce qui vient d'être expliqué que $f = \frac{1}{4} \frac{v}{h}$ puisque $f = \frac{c}{\lambda}$ et $h = \frac{\lambda}{4}$

Cette formule expliquerait la modification de la fréquence du son puisque la fréquence ne varie plus qu'en fonction de la vitesse dans le milieu car la longueur d'onde est fixée par la géométrie de notre récipient. La dérive de fréquence dépend donc uniquement de la vitesse dans le milieu.

5.6. L'influence de la présence de bulles sur la vitesse

Lors de l'ajout du cacao dans le lait chaud, une émulsion se forme et des bulles d'air sont emprisonnées et se retrouvent donc dans le liquide. On calcule la célérité du son dans un liquide compressible avec la formule suivante :

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

Avec: c la célérité du son, ρ la masse volumique et K le module d'élasticité isostatique (ou Bulk modulus en anglais)

Le module d'élasticité isostatique K est l'inverse du coefficient de compressibilité isotherme χ_T défini par :

$$\frac{1}{K} = \chi_T = -\frac{1}{V} \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T$$

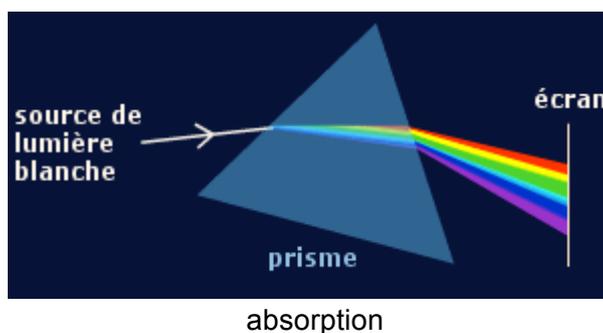
La vitesse du son dans un liquide dépend de 2 paramètres : sa compressibilité et sa densité massique. Comme l'eau est environ 800 fois plus dense que l'air et que l'air est environ 15000 fois plus compressible que l'eau, alors si l'eau est remplie de bulles d'air distribuées de manière homogène dans une petite portion du liquide, la densité de l'air sera négligeable, mais la compressibilité sera liée presque entièrement à l'air. Comme la célérité du son dans le liquide est inversement proportionnelle à la compressibilité, alors plus il y a de bulles plus la hauteur du son sera grave.

Lorsque nous remuons le mélange cacao/lait, les bulles d'air remontent à la surface, la hauteur du son augmente puisque nous venons de montrer qu'elle dépend uniquement de la vitesse dans le milieu. Or cette vitesse est modifiée par la présence des bulles qui se forment dans notre milieu, donc la fréquence du son sera modifiée proportionnellement à la modification de la vitesse du son.

5.7. La dispersion

Nous avons, comme montré précédemment, trouvé une explication physique cohérente avec le phénomène observé. Or, à l'origine, notre sujet mentionnait qu'il y avait sûrement un phénomène de dispersion. Définissons d'abord la dispersion. La dispersion est un phénomène rendu possible par un milieu spécifique, appelé milieu dispersif, dans lesquelles les ondes se propagent. Un milieu est dit dispersif lorsque les ondes s'y déplacent à des vitesses différentes en fonction de leur fréquence. La vitesse de phase et la vitesse de groupe y sont différentes.

On définit la vitesse de phase comme la vitesse de propagation des surfaces équiphasés tandis que la vitesse de groupe représente la vitesse à laquelle l'énergie est transportée par le signal. Cependant, le phénomène de dispersion est rarement mis en évidence puisqu'il faut que le milieu soit très dispersif pour que nous entendions vraiment cette différence. L'air n'est par exemple pas dispersif pour le son. Si l'air était dispersif, nous entendrions les sons graves avant les sons aigus. Le phénomène est plus facilement observable dans le cas d'onde lumineuse.

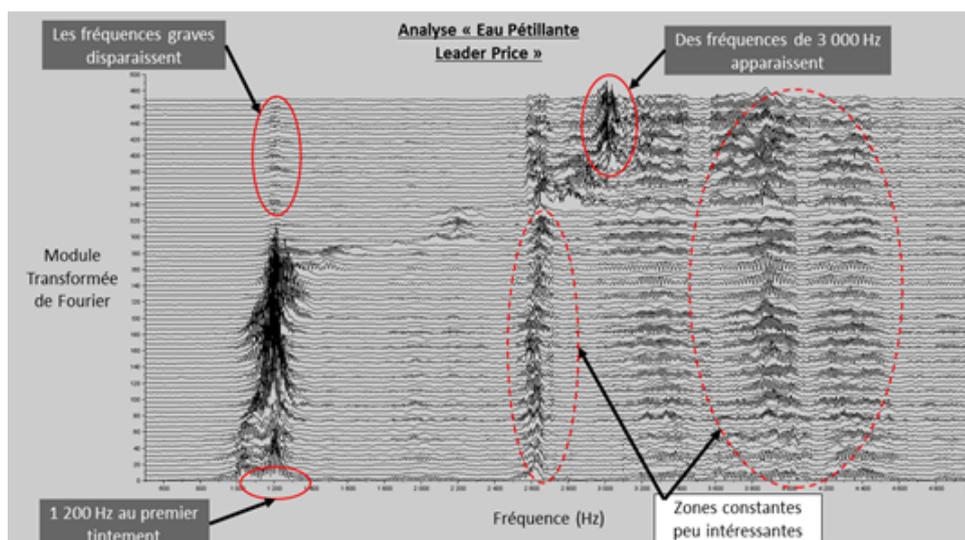


Nous avons longuement réfléchi pour savoir si nous pouvions relier ce phénomène à celui se produisant dans le bol de chocolat chaud. Lors de l'ajout de poudre de cacao, le milieu d'origine est modifié. Il en est de même lorsque que l'on remue le mélange avec une cuillère. C'est cette idée qui nous a fait remettre en cause l'intitulé du sujet. Entre deux percussions sur le bol, les propriétés et le contenu du liquide sont changés : nombre de bulles, saturation de la poudre...

Cependant, comme nous avons bien une dérive de fréquence au cours du temps, nous ne pouvons pas conclure avec certitude qu'il n'y a pas de dispersion dans notre bol de lait.

6. RESULTATS

Comme nous l'avons expliqué, nous avons attribué la dérive de fréquence à la présence de bulles dans le milieu. C'est pourquoi nous avons réalisé la même expérience qu'expliquée au début mais cette fois-ci, avec différentes eaux gazeuses. Nous avons utilisé différentes eaux : Perier, Badoit, Salvetat et de l'eau Leader Price. Voici le résultat obtenu avec l'eau Leader Price:



Et voici un tableau récapitulant les fréquences initiales et finales pour certains des liquides utilisés :

	Chocolat Chaud 1	Chocolat Chaud 2	Eau pétillante Leader Price	Salvetat
Fréquence initiale	1 200	1 500	1 200	850
Fréquence finale	3 100	3 500	3 000	2 600

On peut observer que dans chacun des cas les fréquences initiales et finales sont du même ordre de grandeur. Les résultats pour la Salvetat sont un peu différents des autres produits, puisque la fréquence initiale ainsi que la fréquence finale sont plus faibles. On observe tout de même bien la dérive de fréquence.

En outre, nous pensons que, plus il y aurait de bicarbonate dans l'eau, plus on devrait entendre le phénomène. C'est pourquoi nous avons pris ces quatre eaux. La Badoit contient beaucoup de bicarbonate tandis que l'eau de Perier beaucoup moins. Or, au cours de nos expériences, nous n'avons pas eu les résultats attendus. La Badoit ne « fonctionnait » pas

mieux de l'eau de Leader Price, au contraire, nous entendions moins bien le son alors qu'il y avait plus de bicarbonate. Nous nous sommes alors rendu compte que le paramètre influençant la « qualité » de notre phénomène était la taille des bulles dans l'eau. Plus les bulles sont grosses et plus on entendra clairement la différence entre les sons aigus et graves.

7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

7.1. Conclusions sur le travail réalisé

Pour conclure, ce projet nous a permis d'étudier les ondes sonores et les différents phénomènes physiques qui les entourent. Bien que l'intitulé de notre sujet laissait supposer que nous aurions affaire à la dispersion, il s'avère que nous ne sommes pas en mesure de conclure précisément sur ce sujet.

Nous avons bien observé un phénomène, et nous l'avons analysé. Ces analyses nous ont permis de voir qu'il y a bien un décalage des fréquences qui nous donne un son de plus en plus aigu, mais on ne sait pas si ce phénomène peut être considéré comme de la dispersion. Nos recherches nous permettent seulement d'affirmer que les vitesses dans le milieu change à cause de la présence des bulles d'air, ce qui entraîne une variation de la fréquence puisque la longueur d'onde est « fixée » par le récipient.

7.2. Conclusions sur l'apport personnel de cet E.C. projet

Anne-Sophie : Tout d'abord, grâce à ce projet, j'ai appris à travailler avec des personnes que je ne connaissais pas. C'est ce travail de groupe qui nous a permis d'avancer dans notre projet. De plus, avec ce projet, nous avons été confrontés à des difficultés comme nous pourrions rencontrer plus tard dans notre vie d'ingénieur : on nous a donné un projet dont on ne connaissait pas la solution et il nous a fallu, à travers de nombreuses recherches, essayer de trouver la solution. Enfin, il m'a permis de développer mes connaissances en ce qui concerne les ondes et les différents phénomènes physiques qui leur sont associés.

J'ai donc trouvé que ce cours projet P6 nous confronte aux difficultés auxquelles nous allons devoir faire face plus tard en tant qu'ingénieur, et c'est en ça qu'il est très intéressant.

Charlotte : Le thème du projet est éloigné de ma future orientation mais ce dernier m'a permis d'élargir ma culture scientifique et d'approfondir mes connaissances sur les ondes. De plus, ce projet nous a permis de comprendre les phénomènes physiques liés aux ondes. Ce projet nous a aussi confronté à un problème dont on ne connaissait pas la solution, situation courante dans la vie d'ingénieur. On a dû trier nos recherches, nos sources pour pouvoir déterminer le bon modèle à étudier. Le travail en groupe, encore une fois nous permet de nous mettre en situation que nous serons amenés à vivre, ce que je trouve très bien.

Alice : Le projet P6 m'a fait découvrir la frustration d'une mauvaise piste et le bonheur d'une bonne piste. Je ne m'étais jamais auparavant penchée si en détail sur un sujet inconnu. La confrontation à ce sujet d'une haute difficulté étant donné du manque de visibilité, étaient pour moi un réel challenge. Remettre en question et abandonner des pistes d'une semaine à l'autre était un défi mais nécessaire pour arriver à une solution pertinente. Le fait que ce projet s'étende sur un semestre entier m'a semblé très intéressant, car nous avons ainsi pu, avec un groupe motivé, pousser à bout la plupart de nos réflexions. J'ai appris à travailler avec des personnes que je ne connaissais pas et ceci dans un souci d'organisation et de délais.

Thomas: Lorsqu'on a du classer les voeux en Janvier concernant les choix de projet, j'avais classé le sujet "la dispersion du son" en deuxième position car je trouvais l'intitulé du sujet original et qui se rapproche d'un problème que l'on peut rencontrer quotidiennement. Je voulais aussi travailler sur les ondes de manière plus poussée qu'en cours car nous avons plus étudié les ondes lumineuses (P4) que les ondes sonores. Pendant ces 6 mois de travail, j'ai trouvé que la principale difficulté a été d'avoir un axe bien défini de recherche. A chaque séance, tout le travail que nous avons effectué était remis en cause car nous ne savions pas comment déterminer s'il y avait un phénomène de dispersion lorsqu'on frappe sur un bol de lait. La découverte de nouveaux logiciels tel que GeoGebra et Scilab a été aussi très enrichissante. J'ai donc bien apprécié travailler avec ce groupe d'autant plus que tout le monde s'est investi.

Lucas : Le projet que nous avons mené m'a été très bénéfique. En effet, il a permis de renforcer un aspect important du travail d'équipe : la répartition des tâches. Ainsi, pour surmonter la difficulté initiale de compréhension et d'encadrement du sujet, nous nous sommes naturellement répartis le travail selon nos affinités. De plus, beaucoup d'autonomie était nécessaire dans nos recherches, car nous avons étudié un phénomène qui nous était étranger. Je me suis particulièrement penché sur la mise en évidence de ce phénomène, ce qui m'a permis de découvrir un nouvel outil informatique : Scilab. La prise en main de ce logiciel m'ayant pris du temps, j'aimerais par la suite aller plus loin avec ce projet et modéliser le phénomène informatiquement.

7.3. Perspectives pour la poursuite de ce projet

Pour la suite de ce projet, il faudrait déterminer s'il y a de la dispersion dans le bol ou si la géométrie du récipient et les ondes stationnaires expliquent à eux seuls la dérive de fréquence. Pour étudier la dispersion, il faudrait utiliser différentes fréquences (générées par informatique) et analyser la dérive de fréquence. En effet, si le milieu devient dispersif en ajoutant des bulles, on aurait pu exciter ce milieu avec d'autres fréquences. Le fait que nous nous soyons rendu compte tard de cette possibilité ne nous a pas permis de réaliser cette expérience.

Il faudrait aussi pouvoir contrôler le taux de bulles de gaz dans le liquide, le modifier pour continuer à analyser l'influence des bulles de gaz sur la dérive de fréquence.

8. Bibliographie

Livre :

Jean-Louis Migeot, Jean-Pierre Coyette, Grégory Liens, "Phénomènes fondamentaux de l'acoustique linéaire", *Lavoisier*, 2015

Article de presse :

R.Sieber et J.O Bosset, "Le lait au cacao n'est-il plus source de calcium ?" , *Le Producteur de Lait*, n°19, page 4

Frank S. Crawford, "The hot chocolate effect", *American Journal of Physics*, 1982

Pages Internet :

Son (physique) : définitions et explications : (valide à la date du 24/02/2016)

<http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=1236>

<http://www.cyberphon.ish-lyon.cnrs.fr/Partie2/P2C1P.htm> (valide à la date du 24/02/2016)

<http://www.cochlea.eu/son> (valide à la date du 24/02/2016)

<http://www.je-comprends-enfin.fr/index.php?/Eau-ondes-et-mouvement/milieu-dispersifs-faiblement-dispersifs-et-non-dispersifs/id-menu-14.htm> (valide à la date du 24/02/2016)

<http://namazu.e-monsite.com/pages/les-batiments/frequence-propre-et-resonance.html> (valide à la date du 02/03/2016)

<http://www.je-comprends-enfin.fr/index.php?/Eau-ondes-et-mouvement/onde-frequence-propre-et-resonance/id-menu-14.htm> (valide à la date du 02/03/2016)

http://wiki.scienceamusante.net/index.php?title=Le_lait (valide à la date du 02/03/2016)

https://fr.wikipedia.org/wiki/Vibration_mol%C3%A9culaire (valide à la date du 02/03/2016)

<http://philippe.boeuf.pagesperso-orange.fr/robert/physique/infusion.htm> (valide à la date du 02/03/2016)

http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/52134/a_892PNUS8.pdf?sequence=1 (valide à la date du 02/03/2016)

https://en.wikipedia.org/wiki/Chocolate_milk (valide à la date du 02/03/2016)

<http://roger.barbara.free.fr/page032.html> (valide à la date du 05/03/2016)

https://fr.wikipedia.org/wiki/Vitesse_du_son (valide à la date du 05/03/2016)

https://soundphysics.ius.edu/?page_id=753 (valide à la date du 05/03/2016)

https://en.wikipedia.org/wiki/Hot_chocolate_effect (valide à la date du 09/03/2016)

<http://www2.eng.cam.ac.uk/~hemh/coffecup/coffecup.htm> (valide à la date du 09/03/2016)

<http://www.doctissimo.fr/html/nutrition/dossiers/eau/articles/13251-bicarbonat.htm> (valide à la date du 09/03/2016)

<http://monsieur.bareilles.free.fr/5eme/eaux-minerales/tableau.html> (valide à la date du 09/03/2016)

<http://www.msc.univ-paris-diderot.fr/~phyexp/pmwiki.php/SonBulleux/SonBulleux> (valide à la date du 09/03/2016)

https://prezi.com/gygr1_y2ifzq/hot-chocolate-effect/ (valide à la date du 12/03/2016)

<http://io9.gizmodo.com/5880403/why-your-hot-chocolate-is-singing> (valide à la date du 15/03/2016)

<http://memim.com/hot-chocolate-effect.html> (valide à la date du 15/03/2016)

<http://www.physicsclassroom.com/class/sound/Lesson-5/Closed-End-Air-Columns> (valide à la date du 15/03/2016)

<http://physics.info/waves-standing/> (valide à la date du 15/03/2016)

<http://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-14/standing-waves-and-resonance/> (valide à la date du 15/03/2016)

http://www.studyphysics.ca/newnotes/20/unit03_mechanicalwaves/chp141516_waves/lesson51.htm (valide à la date du 15/03/2016)

https://en.wikipedia.org/wiki/Standing_wave (valide à la date du 15/03/2016)

https://www.reddit.com/r/Physics/comments/1vlyal/the_hot_chocolate_effect/ (valide à la date du 23/03/2016)

https://en.wikipedia.org/wiki/Acoustic_resonance (valide à la date du 27/04/2016)

<http://newt.phys.unsw.edu.au/jw/flutes.v.clarinets.html> (valide à la date du 27/04/2016)

<https://www.phy.duke.edu/~rgb/Class/phy51/phy51/node48.html> (valide à la date du 11/05/2016)

<https://www.quora.com/How-does-a-wave-gets-reflected-in-an-open-organ-pipe> (valide à la date du 18/05/2016)

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/sound/reflec.html> (valide à la date du 18/05/2016)

<http://physics.stackexchange.com/questions/74608/open-pipe-resonance> (valide à la date du 18/05/2016)

<http://www.epsic.ch/branches/electronique/techn99/acous/aqprotxt.html> (valide à la date du 28/05/2016)

<http://www.nantes-erdre.fr/non-categorise/refraction-des-ondes-sonores-pont-de-la-beaujoire-viaduc-de-la-joneliere-leffet-amphitheatre> (valide à la date du 28/05/2016)

http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/claude_saintblanquet/synophys/31propa/31propa.htm (valide à la date du 28/05/2016)

Son et musique <http://www.academie-en-ligne.fr/ressources/7/sp03/al7sp03tepa0013-sequence-01.pdf> (valide à la date du 28/05/2016)

9. ANNEXES

9.1. Listings des programmes réalisés

9.1.1. GeoGebra: modélisation d'une onde stationnaire

J'ai entré les formules suivantes dans la barre d'entrée:

```
A=4 //Amplitude des fonctions f et g
v=1 //Vitesse des ondes définies par f et g
freq=5 //Fréquence des ondes f et g
lambda=v/freq //Longueur d'onde des ondes définies par f et g
t=[0,10] avec pas de 0.1 //Variable de temps
y_1=Function[A sin(2π (x + v t) / λ), 0, 0.5] //Fonction dont l'onde se déplace dans
les x croissants
y_2=Function[A sin(2π (x - v t) / λ), 0, 0.5] //Fonction dont l'onde se déplace dans
les x décroissants

y_T=Function[g(x) + f(x), 0, 0.5] //Somme de y_1 et y_2
//Fonction qui représente l'onde
stationnaire
```

9.1.2. GeoGebra: Exemple Transformée de Fourier

J'ai entré les formules suivantes dans la barre d'entrée:

```
u=Function[3sin(2π 100 x) + sin(2π 200 x) + 2sin(2π 300 x), 0, 0.1]

u_1=Function[3sin(2π 100 x), 0, 0.1] //Fréquence fondamentale
u_2=Function[3sin(2π 100 x), 0, 0.1] //2ème harmonique
u_3=Function[2sin(2π 300 x), 0, 0.1] //3ème harmonique
```

9.1.3. Programme Scilab pour l'analyse des sons

```

0001 //generation d'un signal theorique pour tester la transformee de fourrier
0002 clear
0003 xdel(winsid())
0004 cd "D:\Box Sync\documents\Cours INSA 2A\P6"
0005 stacksize('max')
0006 generer1Frequence=%t;
0007 generer2Frequence=%f;
0008 genererChgmtFrequence=%f;
0009
0010 [signal,Fs,bits]=wavread('D:\Box Sync\documents\Cours INSA 2A\P6\experience\a analyser.wav');
0011
0012 Nbp=size(signal,'*')*5; //on crée des fichiers 5 fois plus grands
0013 dureeSignal=Nbp/Fs;
0014 t=linspace(0,dureeSignal,Nbp);
0015 tf=linspace(0,Fs,Nbp);
0016
0017 clear signal //on n'a plus besoin du son car on a récupérer sa Fréquence et son nombre de points
0018
0019 if generer1Frequence then
0020     signal1=[];
0021     signal1=sin(2*pi*1200*t);
0022     wavwrite(signal1,Fs,'signal1Frequence.wav')
0023     disp('le fichier 'signal1Frequence.wav' a été généré à 1200 Hz')
0024     f1=fft(signal1);
0025 end
0026
0027 if generer2Frequence then
0028     signal2=[];
0029     //boucle infinie ou dure trop longtemps
0030     //For i=0:t(2)-t(1):t(Nbp)
0031     // signal=[signal (3*sin(2*pi*2500*i))+(3*sin(2*pi*5300*i))];
0032     //end
0033
0034     signal2=3*sin(2*pi*2500*t)+3*sin(2*pi*5300*t);
0035     wavwrite(signal2,Fs,'signal2Frequencies.wav')
0036     disp('le fichier 'signal2Frequencies.wav' a été généré à 2500 Hz + 5300 Hz')
0037     f2=fft(signal2);
0038 end
0039
0040 if genererChgmtFrequence then
0041     signal3=[];
0042     disp('en cours ...')
0043     for i=0:t(2)-t(1):t(Nbp)
0044         signal3=[signal3 sin(2*pi*i*i*100)];
0045     end
0046     wavwrite(signal3,Fs,'signalChgmtFrequence.wav')
0047     disp('le fichier 'signalChgmtFrequence.wav' a été généré')
0048     f3=fft(signal3);
0049 end
0050
0051 if generer1Frequence then
0052     figure(0)
0053     xtitle('1 Frequence (1200Hz)')
0054     subplot(2,1,1)
0055     plot2d(t,signal1)
0056     subplot(2,1,2)
0057     plot2d(tf,abs(f1))
0058 end
0059
0060 if generer2Frequence then
0061     figure(1)
0062     xtitle('2 Frequences (2500 et 5300 Hz)')
0063     subplot(2,1,1)
0064     plot2d(t,signal2)
0065     subplot(2,1,2)
0066     plot2d(tf,abs(f2))
0067 end
0068
0069 if genererChgmtFrequence then
0070     figure(2)
0071     xtitle('Frequence Changeante')
0072     subplot(2,1,1)
0073     plot2d(t,signal3)
0074     subplot(2,1,2)
0075     plot2d(tf,abs(f3))
0076 end

```

```

0001 // Programme d'analyse du son
0002 clear
0003 xdel(winsid())
0004 cd "ecrire ici le chemin du dossier dans lequel se trouve le fichier"
0005
0006 [signal,Fs,bits]=wavread('ecrire ici le nom du fichier WAV')
0007 signal=signal(1,:); //on récupère le signal en mono
0008 nbDePoints=length(signal);
0009 dureeSon=nbDePoints/Fs;
0010 t=linspace(0,dureeSon,nbDePoints); //on crée une base temporelle pour tracer les graphs
0011
0012 deltasec=0.3; //largeur de l'intervalle à analyser (en secondes)
0013 blancsec=0.0; //largeur de l'intervalle à ne pas analyser (en secondes)
0014 delta=round(deltasec*Fs); //nb de points de l'intervalle à analyser
0015 blanc=round(blancsec*Fs);
0016
0017 normaliser=%f; //si à %t alors on va faire en sorte que l'amplitude du signal soit de 1
    pour chaque intervalle
0018 numEchantillon=-1; //affiche un intervalle et son analyse (mettre à -1 pour ne pas
    l'afficher)
0019
0020 Freq=linspace(0,Fs,delta+1); //créé le vecteur de fréquence (pour voir le graph en Hz)
0021 FreqMoitie=Freq(1:round(length(Freq)/2)); //la moitié du vecteur de fréquence pour
    n'afficher que la moitié de graph
0022
0023 figure(0)
0024 subplot(2,1,1)
0025 plot2d(t,signal,2) //affichage du signal d'origine avec le temps en secondes en abscisse
    et l'amplitude en ordonnée
0026 subplot(2,1,2) //2eme partie de l'affichage pour le spectre de frequence
0027
0028 s=[]; //va contenir les intervalles les uns à la suite (sans les intervalles qu'on ne
    souhaite pas analyser)
0029 f=[]; //va contenir les fft des intervalles que l'on veut analyser les uns à la suite
0030 echantillon=[];
0031 cnt=1; //va s'incrémenter de 1 en 1 dans la boucle : ne sert que pour savoir quand on est
    à l'échantillon
0032 decal=0; //va s'incrémenter pour décaler les fft sur le graph
0033 ampMax=1; //est utilisé si normaliser=%t : c'est l'amplitude à laquelle seront mis tous
    les max des intervalles
0034
0035 Mat=[]; //pour le graph 3D
0036
0037 for i=1:delta+blanc:nbDePoints-delta //permet de se déplacer dans le signal par
    intervalle
0038
0039     segment=signal(i:i+delta); //on récupère l'intervalle
0040
0041     if normaliser then
0042         m=max(abs(segment));
0043         if m~=0 then
0044             coef=ampMax/m;
0045             segment=segment.*coef;
0046         end
0047     end
0048
0049     fSegment=fft(segment); //on calcule la fft de l'intervalle
0050     fSegmentMoitie=fSegment(1:round(length(fSegment)/2)); //la partie gauche de la fft
    (pour tracer la moitié du graph)
0051
0052     if cnt==numEchantillon then
0053         echantillon=segment;
0054         plot(abs(fSegmentMoitie)+decal,FreqMoitie, '*')
0055     end
0056
0057     cnt=cnt+1;
0058
0059     if cnt~=numEchantillon then
0060         plot2d(abs(fSegmentMoitie)+decal,FreqMoitie,2) //On trace les spectres avec le
            décalage
0061         //plot2d(FreqMoitie,abs(fSegmentMoitie)+decal,2)
0062

```

```

0063     end
0064
0065     Mat=[Mat;fSegmentMoitie];
0066
0067     decal=decal+10; //permet de décaler les spectres de chaque segment (augmenter la
           constante pour + d'espacement et inversement)
0068
0069     s=[s segment];
0070     f=[f fSegment];
0071 end
0072
0073 t2=linspace(0,length(s)/Fs,length(s)); //créé la base de temps pour le signal après qu'on
           ait retiré les intervalles que l'on ne souhaite pas analyser
0074
0075 //on règle les axes pour cibler la zone de changement de fréquence
0076 a=get("current_axes")
0077 a.data_bounds=[0,500;770,6000];//[xmin,ymin;xmax,ymax]
0078 xtitle('analyse des frequences','module Transformee Fourier','frequences (Hz)')
0079 //a.data_bounds=[500,0;5000,decal];
0080 //xtitle('analyse des frequences','frequences (Hz) ','module Transformee Fourier')
0081
0082 figure(1)
0083 subplot(2,1,1)
0084 plot2d(t2,s)
0085 xtitle('signal après découpage','temps(s)')
0086 subplot(2,1,2)
0087 plot2d(t,signal)
0088 xtitle('signal d origine','temps(s)')
0089
0090 if numEchantillon>0 then
0091     figure(3)
0092     subplot(2,1,1)
0093     plot(echantillon)
0094     subplot(2,1,2)
0095     plot2d(Freq,abs(fft(echantillon)))
0096     xtitle('echantillon')
0097 end
0098
0099 figure(4)
0100 Y=[1:1:cnt-1]*deltasec; //vecteur intervalle en temps
0101 surf(FreqMoitie,Y,abs(Mat))
0102 xtitle('','fréquence (Hz)','temps (s)','Amplitude')

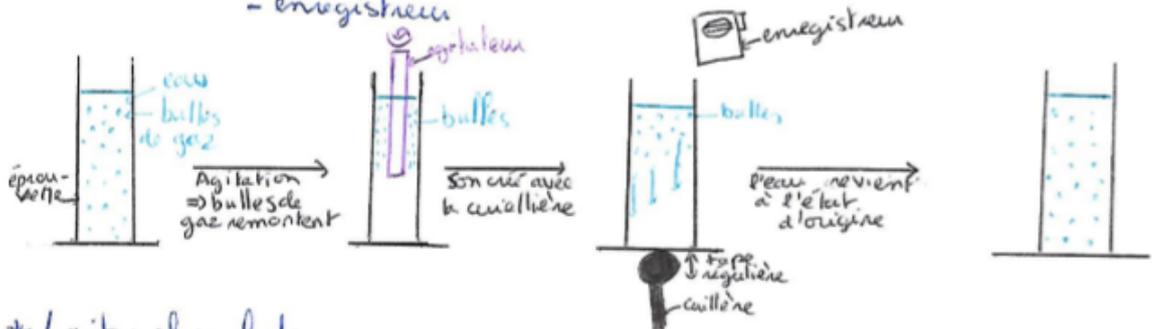
```

Quelques modifications peuvent être apportées pour améliorer le graphique 3D et obtenir l'image de la première page.

1.1. Schémas de montages, plans de conception...

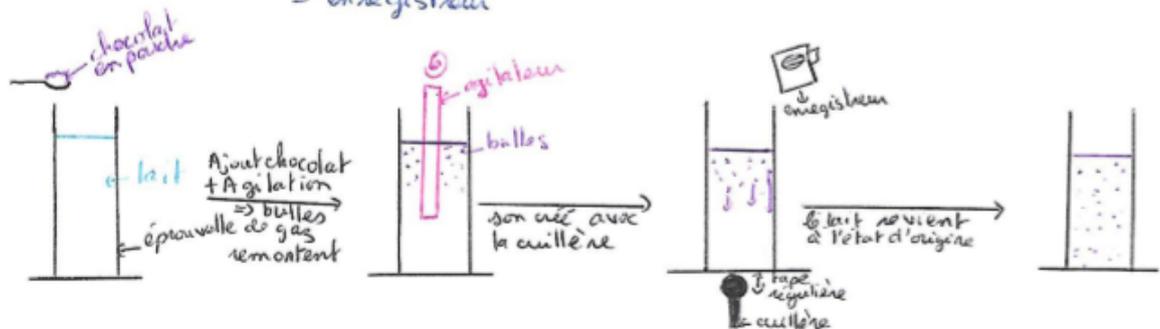
* Eau gazeuse

- Matériel : - épreuvette 50ml
- eau gazeuse (badoit, salvat, eau leader plus)
- agitateur (règle en fer)
- cuillère en métal
- enregistreur



* Lait + chocolat

- Matériel : - épreuvette 50ml
- lait chaud + chocolat en poudre
- agitateur (règle en fer)
- cuillère en métal
- enregistreur



1.2. Propositions de sujets de projets (en lien ou pas avec le projet réalisé)

- résistance des éoliennes offshore aux typhons
- les trous noirs (projet de photographie par MIT présenté le 27 juin 2016)