

Multi Son

Etude des sonneries « mosquitone » et d'effets sonores.

Elèves : Pierre MARAVAL
Alexandre FLEURET
Galdim ZEQIRI
Baptiste LEMERCIER
Michaël BOURGEOIS

Professeurs : Sylvie GUILLOSSEAU
Jean-Michel JUSSIAUX

Conseiller scientifique : Marc TULOUP

Sommaire

- Résumé de notre olympiade	: page 3
- Introduction	: page 5
-Comment fonctionne l'oreille ?	: page 8
-Audition et âge : le principe des « sonneries antiprof »	: page 9
-Analyse des sonneries	: page 11
-Les Sons de Tartini	: page 12
-A la recherche de la non-linéarité	: page 15
-Mutinerie à bord les harmoniques absents	: page 18
-Création d'un mosquitone	: page 20
-Conclusion temporaire	: page 21

Résumé de notre olympiade

Nous avons entendu parler de sonneries de téléphone portable inaudibles par les adultes car trop aiguës.

Après recherche et acquisition de ces sonneries nous les avons analysées. Les plus intéressantes d'entre elles étaient composées de plusieurs fréquences, par exemple 18 000 Hz et 9 000 Hz (plus faible). Pourquoi est-ce qu'en écoutant plusieurs de ces sonneries simultanément des sons plus graves semblaient nous apparaître ou certains être renforcés?

Pour montrer cela, on crée séparément les 2 fréquences principales des sons, puis on les joue isolément ou simultanément, sur 1 ou 2 haut-parleurs. Les fréquences lorsqu'elles sont jouées ensemble semblent se renforcer. Mais pas tout le temps, pourquoi ?

Nous sommes conduits à envisager une cause possible : Une non-linéarité.

Le fait que la présence d'une fréquence semble renforcer la perception d'une autre nous a amené à nous intéresser aux phénomènes non linéaires. Il s'agit d'une réponse de l'oreille qui n'est pas proportionnelle à la variation de pression de l'air ambiant. Nous avons vérifié (microphone et oscilloscope numérique, ou microphone, enregistrement sur PC et analyse en fréquence) que la chaîne carte son, amplificateur, haut-parleur, microphone ne provoque pas (trop) de non-linéarité.

La littérature indique que l'oreille est sensible à la pression (en fait, aux variations de pression de l'air). Des expériences avec un synthétiseur montrent qu'elle ne paraît pas sensible au carré de la pression.

Expériences attestant de la non linéarité du 2eme ordre :

* Des expériences avec un synthétiseur montrent qu'elle ne paraît pas sensible au carré de la pression (n'est pas un détecteur quadratique) car pour un détecteur quadratique

$f_1 \rightarrow 2f_1$

$f_2 \rightarrow 2f_2$

$(f_1 + f_2) \rightarrow 2f_1, 2f_2, f_2 - f_1$ et $f_1 + f_2$

donc Do3 serait entendu comme Do4, Sol3 comme Sol4 (ce qui ne serait qu'une question de convention), mais

Do3 + Sol 3 donnerait Do4 + Sol4 + Do2 + Mi4 (note intermédiaire) alors que nous entendons Do3 + Sol3 + Do2 + Do4, ou Do4 + Sol4 + Do3 + Do5.

Le test a été aussi effectué avec les notes ... Nous n'entendons pas la note intermédiaire

De plus si l'on envoie ces mêmes notes avec un casques dans une oreille différente le phénomène ne se produit pas.

Expérience attestant d'une non linéarité du 3eme ordre :

Si elle est cubique $y = x^3$, des fréquences de 4000 et 12000 Hz donnent du 4000, du 12000 Hz, du $2 \times 4000 - 12000 = -6000$ Hz (qui renforce le 6000 Hz) du $2 \times 12000 - 4000 = 20000$ Hz quasi inaudible, du $3 \times 4000 = 12000$ Hz (qui renforce le 12000 Hz), du $2 \times 4000 + 12000 = 20000$ Hz, du $4000 + 2 \times 12000 = 28000$ Hz inaudible, du $3 \times 12000 = 36000$ Hz inaudible. Cela correspond mieux à notre écoute, mais nous ne pouvons pas trancher avec certitude.

Nous concluons donc que l'oreille a un comportement non-linéaire du troisième degré. Deux fréquences f_1 et f_2 donnent, entre autres, une fréquence supplémentaire $2f_1 - f_2$. Ce phénomène avait déjà été utilisé par le violoniste Tartini, pour faire sonner son violon dans le grave.

Mais une autre expérience contredit cette hypothèse : la superposition de deux ultrasons à 40000 et 41000 Hz donne du 1 000 Hz, soit $f_2 - f_1$, linéarité du deuxième degré, car les fréquences produites par le troisième degré seraient inaudibles.

Nous admettons donc que la non-linéarité du second degré est faible et qu'elle apparaît ici parce que l'autre est cachée. Ou que l'oreille ne réagit pas de la même façon à ces fréquences ultrasonores (que certains d'entre nous entendent !)

Nous nous penchons alors sur les théories de l'audition.

Helmholtz avait déjà proposé en 1863 la **théorie de la place** (une zone de la cochlée entre en résonance pour une fréquence incidente) : la composante à F_1 est le résultat de distorsion cochléaire. Cette distorsion réintroduit de l'énergie à la fréquence différence $(n + 1)F_1 - nF_1 = F_1$.

Chaque paire d'harmoniques adjacents génère de l'énergie dans le fondamental.

Shouten (1950 - 1970) propose de décaler les harmoniques en fréquence.

mais si on décale d'une valeur Δf (par exemple 2 Hz) ces harmoniques, donc 2502, 2602, 2702, 2802, 2902, 3002, le fondamental paraît lui aussi décalé de Δf . Cela n'est pas perceptible directement, le son grave paraît le même. Mais on peut faire battre ce 102 Hz avec du 100 Hz, et cela à une fréquence de 2 Hz.

Par exemple tous les harmoniques décalés avec une amplitude de 0,1 V et du 100 Hz avec une amplitude 20 fois plus faible soit 0,005 V. Si notre chaîne sonore était étalonnée, cela permettrait la mesure de l'amplitude de la fréquence de 102 Hz créée par l'oreille.

Une autre possibilité est de superposer les fréquences

2400, 2500, 2600, 2700, 2800 Hz et

3002, 3102, 3202, 3302, 3402 Hz

on entend encore du (environ) 100 Hz, battant à 2 Hz.

Aucune explication se basant sur les non-linéarités ne semble convenir.

Théories temporelles

Des auteurs (Shouten, Patterson en 1995) proposent une autre interprétation : l'oreille mesurerait l'intervalle de temps séparant les pics produits par la superposition des harmoniques. Mais cette hypothèse ne peut expliquer ce qui se passe en cas de décalage de Δf , car du 2502 et du 2602 Hz battent à 100 Hz et pas à 102 Hz.

Création d'un Mosquitone (sonnerie)

Nous avons superposé les harmoniques de rang élevé (25 et plus) du 440 et du 660 Hz, avec de petits décalages en fréquence pour obtenir un effet de battement.

Conclusion : Plus nous avons avancé dans nos recherches et plus nous avons rencontré des phénomènes surprenants.

De nombreuses recherches sur l'audition sont encore en cours. C'est un phénomène extraordinairement complexe et subtil. Il semble que l'oreille traite le son à la fois selon sa fréquence (tonotopie) comme l'envisageait Helmholtz et temporellement, avec des effets de rétroaction subtils et encore incomplètement compris.

Introduction

Nous avons entendu parler de sonneries pour téléphones portables audibles par les élèves,
mais pas par leurs professeurs.

Quel est le principe physique mis en jeu dans ces sonneries ? S'agit-il seulement de sons très
aigus, audibles uniquement par de jeunes oreilles ? Ou est-ce que des principes plus complexes sont
exploités ?

Mais présentons d'abord les membres de l'équipe :

A tout seigneur tout honneur commençons par présenter nos deux professeurs :

-M Jussiaux, professeur de physique chimie au lycée Victor Hugo de Besançon.
-Mme Guilloseau, professeur de physique chimie au lycée Pergaud de Besançon.

Passons maintenant aux élèves :

-Baptiste LEMERCIER, du lycée Victor Hugo de Besançon
-Pierre MARAVAL
-Michaël BOURGEOIS
-Galdim ZEQUIRI
-Alexandre FLEURET
tous trois du Lycée Pergaud de Besançon

Recherches de ces sonneries

Nous avons employé plusieurs méthodes. D'abord une tentative de téléchargement payant sur le site mosquitone. Il nous a fallu remplir un questionnaire Internet, passer un sms payant, puis un deuxième pour redire ce que nous avons déjà envoyé par mail Internet, puis nous nous sommes retrouvés connectés sur wasp, l'Internet payant des portables. Pendant de longues minutes, nous avons téléchargé un fichier son au format .wave (donc non compressé, alors que le format Mp3 aurait gagné un temps précieux), puis le téléchargement a été interrompu. Bilan : 5 euros pour ne rien obtenir, du vol caractérisé.

Nous avons aussi tenté d'enregistrer ces sonneries, en démonstration sur Internet. Au lycée, cela s'est révélé impossible. Notre professeur est parvenu à télécharger 4 fichiers Mosquitone qu'il a rapidement analysé, mais il a dû formater son disque dur et les a perdus. Depuis, impossible d'enregistrer en direct.

Nous avons alors essayé de raccorder deux ordinateurs PC, l'un lisant le son, l'autre l'enregistreur. Les résultats ont été contradictoires, voir plus loin. Enfin, Baptiste, entendant dans la cour du lycée Victor Hugo plusieurs de ces sonneries, en a transféré quelques unes par la méthode téléphone portable, pocket Pc, carte SD, lecteur de cartes sur PC. Ouf !

Premières observations :

Certains sons sont audibles par tout le monde. Ils ne présentent rien de particulier et sont sans intérêt.

D'autres sont totalement inaudibles. Il s'avère que le son est d'amplitude nulle, ce qui n'empêche pas certains de dire dans les forums qu'ils ont entendu quelque chose. Peut-être un sifflement de leur amplificateur ?

Quelques sons sont nettement plus audibles par les élèves que par leur professeur. Ils comportent un mélange de fréquences audibles par tous de faible amplitude et de sons très aigus audibles uniquement par les élèves et de forte amplitude.

Les sons suraigus paraissent vibrer comme le son d'une fraise de dentiste.

Si sur un site Internet on écoute simultanément plusieurs sons suraigus, un son à beaucoup plus basse fréquence apparaît. Le même phénomène se produit parfois si on enregistre un son suraigu d'un PC vers un autre PC, ou même en direct depuis Internet. Un oscillographe numérique muni de la fonction FFT montre dans ce cas que le spectre se complique, avec plein de pics équidistants. Nous en cherchons l'origine.

Il semble qu'il s'agisse d'un problème lié à l'**échantillonnage** à une fréquence d'un signal préalablement échantillonné à une autre fréquence.

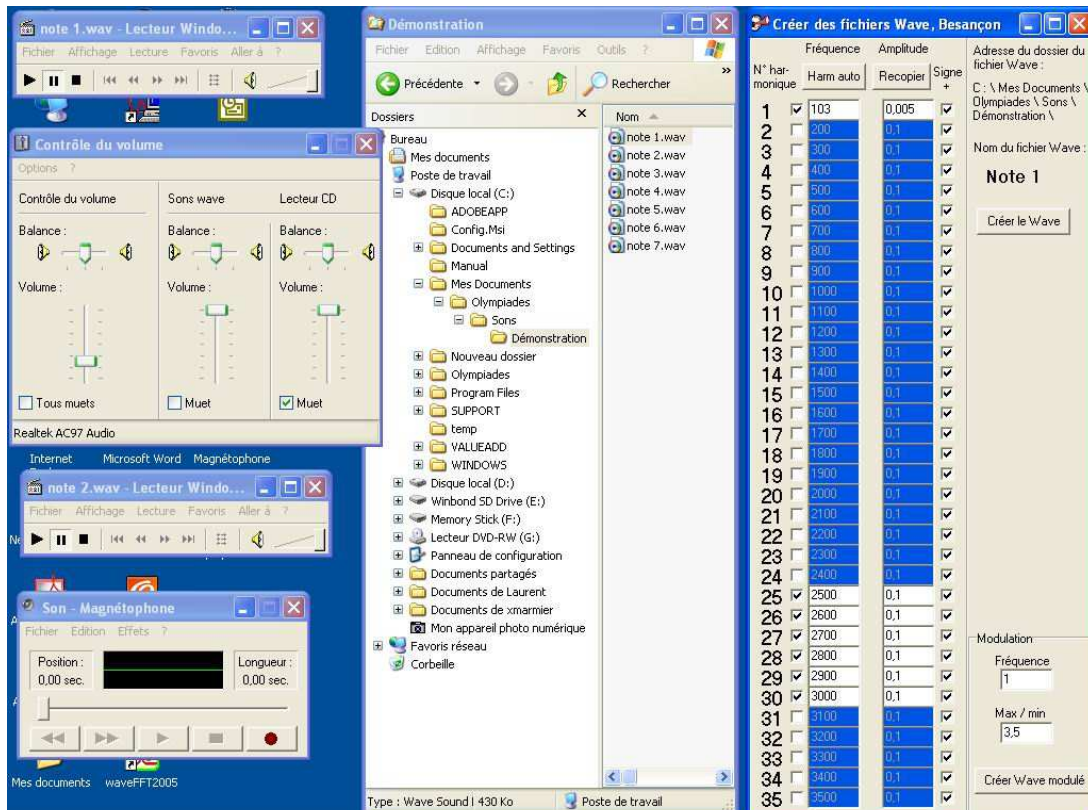
Certains sons comportent simplement une fréquence suraiguë inaudible par le professeur, mais c'est sans intérêt, car nous savons faire cela à l'aide d'un générateur basse fréquence, ce qui nous permettra d'économiser cinq euros.

Hypothèses

Les sons suraigus renforceraient-ils la perception des sons audibles ? Cela nous a conduit à approfondir des recherches sur les phénomènes de non-linéarité.

Expériences

En fait, nous avons réalisé de multiples expériences, en fonction de notre inspiration et des difficultés rencontrées : Création de sons à l'aide de GBF ou d'un ordinateur. Émission de ces sons par divers haut-parleurs ou émetteurs ultra sonores ou encore casque pour séparer le signal reçu par chacune des deux oreilles. Analyse par logiciel ou par oscillographe numérique. Emploi de multiplieurs pour réaliser des non-linéarités. Étude du tube de Kundt, étude de la réflexion d'un son sur un mur (à faire). Visualisation de la vibration d'une membrane éclairée par un faisceau laser.



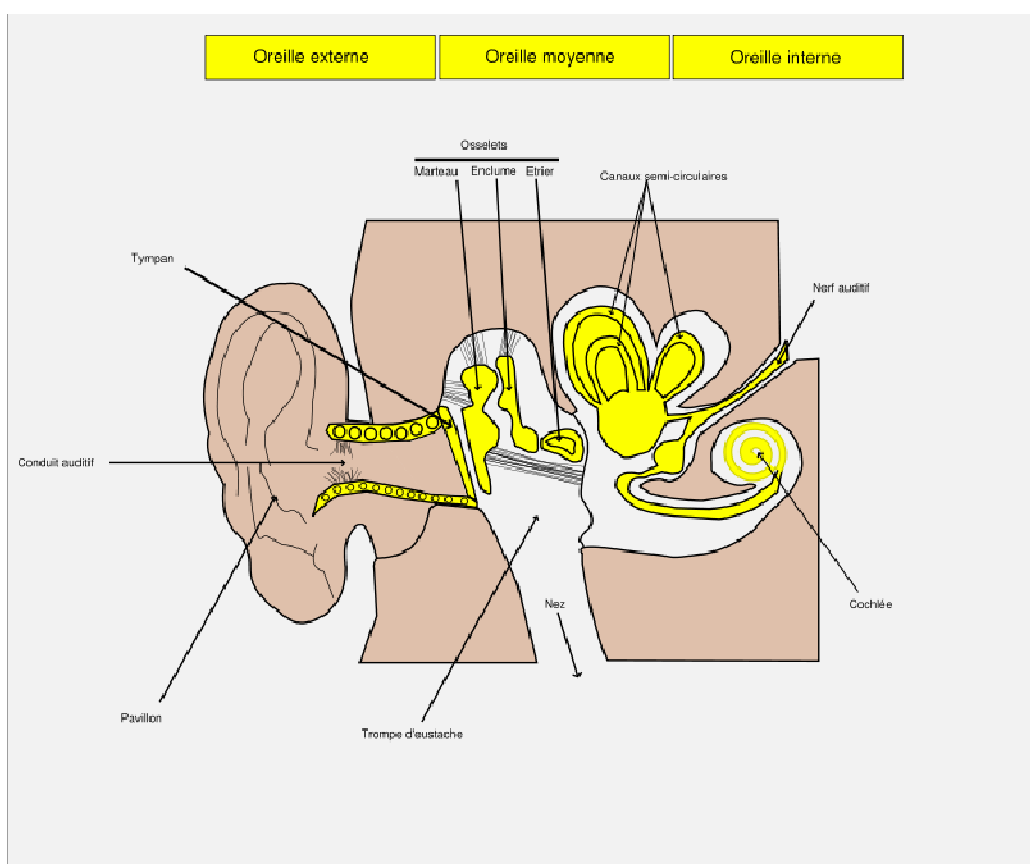
Notre espace de travail habituel sur PC : Magnétophone, Windows Media Player 2, SonNonLin.
Nous avons aussi beaucoup travaillé avec Wavefft

Comment fonctionne l'oreille?

A) Anatomie de l'oreille

L'oreille humaine est composé de:

- L'oreille externe, qui est la partie visible de l'oreille. Elle comprend le pavillon et le conduit auditif externe.
- L'oreille moyenne, qui comprend le tympan et une chaîne d'osselets : le marteau, l'enclume et l'étrier.
- L'oreille interne, qui est constitué de la cochlée, du vestibule et du nerf auditif.



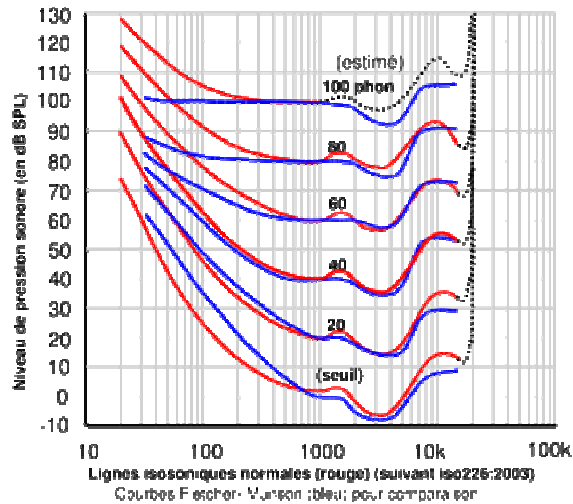
B) Fonctionnement de l'oreille

Le son est capté par l'oreille externe, puis est conduit jusqu'au tympan. Le tympan va capter les vibrations de l'air qui constituent ce son. Ces vibrations sont ensuite transmises aux osselets. Elles deviennent des vibrations mécaniques. Elles se propagent ensuite dans les liquides de l'oreille interne. Ces vibrations sont transformées en informations nerveuses par la cochlée, qui seront plus loin interprétées par le cerveau.

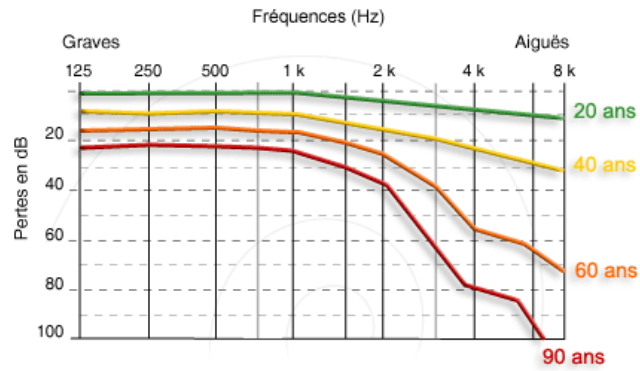
(image prise sur wikipedia.fr).

Audition et âge : le principe des « sonneries antiprof »

L'audition baisse généralement avec l'âge, à cause d'une rigidification et d'une détérioration de tout le système auditif (tympan, osselets, ...), mais il est intéressant de noter que la plage des fréquences diminue du côté des fréquences aiguës.



Les courbes ci-dessus, dites « courbes de Fletcher » représentent la de perception auditive par l'oreille d'un sujet normal en fonction de la fréquence (en Hz). La plage de fréquences audibles s'étend généralement de 20 Hz à 20 000 Hz. Les courbes rouges sont plus précises que les bleues, et la plus basse représente le seuil d'audibilité du son ; les autres représentent des sons d'intensités diverses (en phonies).Image Wikipedia.



On voit ici que les personnes « âgées », c'est à dire de plus de 20 ans, ont une ouïe nettement plus faible dans les aigus (en théorie, cela concerne 95 % des gens de plus de 35 ans). Graphique IURC-Inserm.

C'est cet élément qui est exploité par les créateurs de ces sonneries pour jeunes désireux d'enfreindre sans risque les règlements intérieurs de leurs lycées ou collèges en laissant leurs téléphones portables allumés.

Précisons à leur décharge que l'idée provient d'une entreprise qui lança il y a quelques mois en Grande-Bretagne un boîtier « anti-jeunes » qui produisait des sons très désagréables mais audibles uniquement par les jeunes pour déloger d'éventuels « squatteurs » des parkings des supermarchés d'Angleterre.

Première Etape : Analyse des sonneries :

Nous décidons dès lors d'analyser les sonneries que nous avons obtenu, en utilisant le logiciel Wavefft, (nous ne disposons pas de logiciels comme Mapple ou Mathematica). Rappelons les premiers résultats qui furent étranges mais pas très surprenants :

Il apparut sur les représentations temporelles que les sonneries présentées sur les sites Internet comme les plus inaudibles étaient vides, personne ne pouvait donc les entendre. Celles qui étaient présentées comme de degré « normal » purent être distinguées par tous, y compris les professeurs, leur intérêt est donc limité.

Mais, comme nous l'avons déjà dit, certains sons remplissaient les promesses de leurs éditeurs et étaient quasi-inaudibles par les professeurs mais audibles par les élèves.

Leur analyse fréquentielle révéla que certains n'étaient composés que d'une seule fréquence (autour de 17 et 18 kHz), mais que d'autres, plus audibles, étaient constitués de plusieurs fréquences. Exemple : 11 800, 12 400 et 12 900 environ, à amplitudes similaires, la précision du logiciel n'étant pas très bonne pour des fréquences élevées.

Commentaire [LXM1] : A revoir

Sonnerie	Fréquence (Hz)	Amplitude (V)
« Mosquitone normal »	18 000	0,9
	6 000	0,176
« Mosquitone high »	19 000	0,76
	11 000	0,0107
	9 000	0,045
	1 002	0,028
« Mosquitone ultra »	0	

Si le principe de base nous est tout de suite apparu, la raison d'être de 2 ou 3 fréquences, alors que ça marche aussi avec une seule, nous a poussé à chercher un peu plus.

Les recherches des élèves et les connaissances des professeurs nous menèrent sur la piste d'un phénomène appelé « Troisième son de Tartini », du nom d'un violoniste italien qui parvenait en jouant 2 notes, à en faire entendre 3, dont une plus grave que les deux autres, le « troisième son ». Il arrivait ainsi à jouer des notes graves qu'un violon ne pouvait habituellement pas produire.

Dans notre cas, cela signifierait un renforcement des fréquences audibles voire l'apparition de nouvelles fréquences à l'oreille, soit un son plus facilement audible pour les jeunes (parce que 18 000 Hz, même très fort, ça ne s'entend pas très bien dans un cours).

Nous décidons donc de mettre en évidence et de décrire, voire d'expliquer, ce phénomène.

Les Sons de Tartini

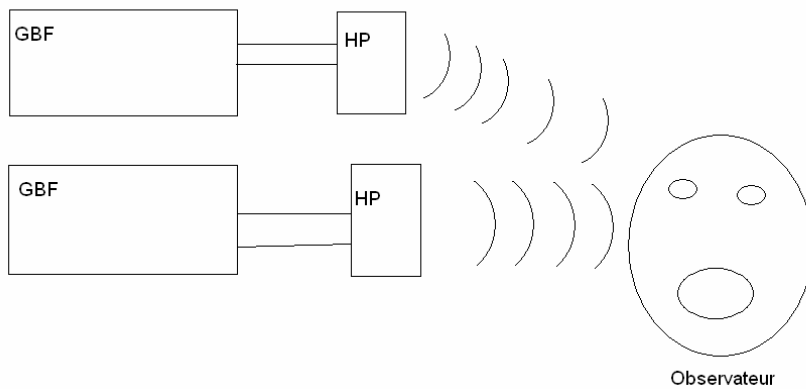
Nous avons tout d'abord cherché à reproduire ces sons fantômes grâce à un synthétiseur.

Résultats :

- le troisième son est assez dur à distinguer pour une oreille non entraînée mais il existe réellement.
- il est plus facile à entendre quand le volume est au maximum (distorsion due à la saturation)

Nous avons ensuite utilisé les GBF, les oscilloscopes et le logiciel Wavefft pour créer des sons et tenter de déterminer plus de choses à propos de ce phénomène.

Quelques manipulations nous ont permis de nous orienter vers la piste d'une non linéarité du système auditif :



On superpose deux sons sinusoïdaux de fréquences f_1 et f_2 . On entend bien f_1 et f_2 et plus faiblement (mieux après entraînement de notre oreille) $2f_1 - f_2$ et encore plus difficilement $2f_2 - f_1$. Exemple au synthé Do3 (262 Hz) + Sol3 (392 Hz) donne à l'écoute Do3, Sol3, Do2 (131 Hz) et Do4 (523 Hz). Nous avons refait cette expérience au synthé, au GBF, et avec le PC, et nous avons les mêmes résultats.

Autre exemple musical :

Commentaire [LXM2] : A placer

Or ce phénomène peut être provoqué par une non-linéarité, du système auditif par exemple, ce qui signifierait que la « réponse » de l'oreille à un signal sonore n'est pas fonction de ce signal mais de son carré, ou de son cube, ou de son inverse, etc.

Question qui nous est alors venue à l'esprit : L'oreille est-elle **sensible** au déplacement de l'air, à la variation de pression ou à la puissance sonore, carré de ces grandeurs ? Nous envisagerons plus tard une réponse à cette question.

L'expérience précédente montre que l'oreille n'est pas sensible au carré de ces grandeurs (n'est pas un détecteur quadratique) car, le son étant une somme de sinusoides, pour un détecteur quadratique :

$$f1 \rightarrow 2f1$$

$$f2 \rightarrow 2f2$$

$$(f1 + f2) \rightarrow 2f1, 2f2, f2 - f1 \text{ et } f1 + f2$$

Donc Do3 serait entendu comme Do4, Sol3 comme Sol4, mais Do3 + Sol 3 donnerait Do4 + Sol4 + Do2 + Mi4 alors que nous entendons Do3 + Sol3 + Do2 + Do4, ou Do4 + Sol4 + Do3 + Do5.

Calculs pour un détecteur quadratique (sensible au carré du signal) :

$$\cos(a + b) = \cos a \cos b - \sin a \sin b$$

$$\cos(a - b) = \cos a \cos b + \sin a \sin b$$

$$\text{En sommant, il vient : } \cos(a + b) + \cos(a - b) = 2 \cos a \cos b$$

$$\text{ou } \cos a \cos b = \frac{1}{2} [\cos(a + b) + \cos(a - b)]$$

$$\text{Donc } \cos^2 a = \cos a \cos a = \frac{1}{2} [\cos 2a + \cos 0] = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2a$$

La fréquence f1 donne donc 2f1.

$$\cos(a + b)^2 = \cos^2 a + \cos^2 b + 2 \cos a \cos b = 1 + \cos 2a + \cos 2b + \cos(a + b) + \cos(a - b)$$

Cette expression contient des termes en cosinus de

a-b, 2a, a+b, 2b.

L'oreille semble donc plutôt réagir avec une **non-linéarité d'ordre 3.**

Calculs pour un détecteur sensible au cube du signal (cubique) :

$$(x + y)^3 = x^3 + y^3 + 3x^2y + 3xy^2$$

$$= (\cos a + \cos b)^3 = \cos^3 a + \cos^3 b + 3 \cos^2 a \cos b + 3 \cos a \cos^2 b$$

$$= \cos a \cos^2 a + \cos b \cos^2 b + 3 \cos^2 a \cos b + 3 \cos a \cos^2 b$$

$$= \cos a [\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2a] + \cos b [\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2b] + 3 [\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2a] \cos b + 3 \cos a [\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2a]$$

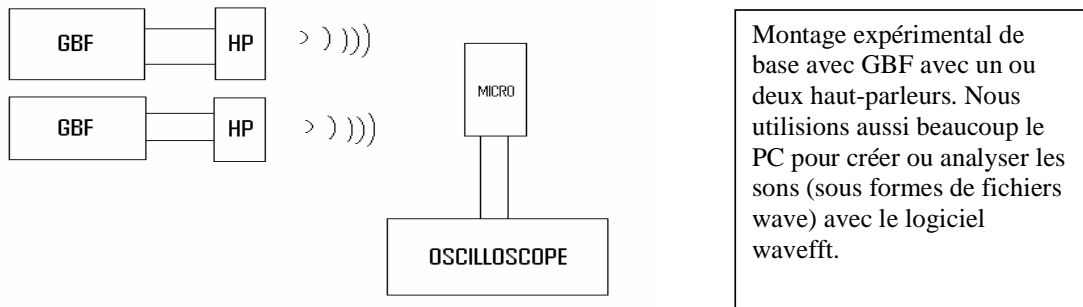
Cette expression contient des termes en cosinus de

a, b, 3a, a, 3b, b, 2a+b, 2a-b, a+2b, 2b-a

soit **a, b, 2a-b, 2b-a, 3a, 2a+b, a+2b, 3b.**

Si cette non-linéarité est quadratique $y = x^2$ (il restera à chercher ce que sont ces grandeurs x et y), des fréquences de 2000 et 6000 Hz sont entendues comme $2 \times 2000 = 4000$ Hz, $2 \times 6000 = 12000$ Hz, $6000 - 2000 = 4000$ Hz (renforcement du 4000 Hz) et $6000 + 2000 = 8000$ Hz, deuxième harmonique du 4000 Hz. Nous ne l'avons pas entendu, mais il peut avoir été masqué. Le renforcement du 12000 Hz n'est pas expliqué.

Si elle est cubique $y = x^3$, des fréquences de 4000 et 12000 Hz donnent du 4000, du 12000 Hz, du $2 \times 4000 - 12000 = -6000$ Hz (qui renforce le 6000 Hz) du $2 \times 12000 - 4000 = 20000$ Hz quasi inaudible, du $3 \times 4000 = 12000$ Hz (qui renforce le 12000 Hz), du $2 \times 4000 + 12000 = 20000$ Hz, du $4000 + 2 \times 12000 = 28000$ Hz inaudible, du $3 \times 12000 = 36000$ Hz inaudible. Cela correspond mieux à notre écoute, mais nous ne pouvons pas trancher avec certitude.



Cependant l'expérience suivante est contradictoire :

Si nous approchons de l'oreille **deux émetteurs à ultrasons** alimentés en 40 kHz et 41 kHz, nous entendons du 1 kHz, ce qui fait penser à une non-linéarité du second ordre (phénomène dit de battement).

Les autres fréquences, 80, 82, 81 kHz sont inaudibles.

Il semble qu'il y ait une contradiction entre ces deux expériences. Donc soit l'effet quadratique existe toujours, mais faiblement, et il ne devient remarquable que dans le cas où les fréquences produites par un effet cubique sont toutes inaudibles (ici la plus basse est $2 \times 40 - 41 = 39$ kHz), soit la transmission du son ne s'effectue pas de la même façon, selon qu'il s'agit de sons audibles ou d'ultrasons.

De même pour l'écoute d'un son dont les **harmoniques graves ont été enlevés**. Ceux-ci semblent créés par l'audition.

Pas si sur. Le fondamental est-il créé par différence entre deux fréquences $a - b$ (en ce cas c'est un effet quadratique) ou par $2a - b$ (effet cubique).

Mais ici commence à intervenir un autre élément, le matériel. En effet, la non-linéarité et le ou les sons supplémentaires pourraient aussi provenir de la mauvaise qualité des cartes sons du lycée,

des hauts parleurs, les câbles et tout le matériel en général peuvent, sinon fausser, du moins gêner les manipulations.

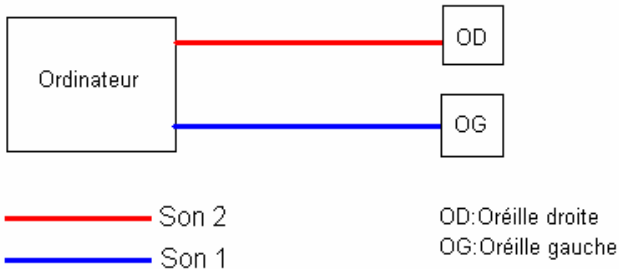
Conclusion partielle des expériences précédentes :

Il semblerait donc que la réponse de l'oreille en fonction des fréquences d'ondes différentes se face sur une position différente de la cochlée . Ceci engendrerait une réponse plutôt quadratique pour les hautes fréquences (ex 40 et 41 KHz) sur une zone spécifiée et une réponse cubique pour les fréquences audibles ou basses sur une autre zone.

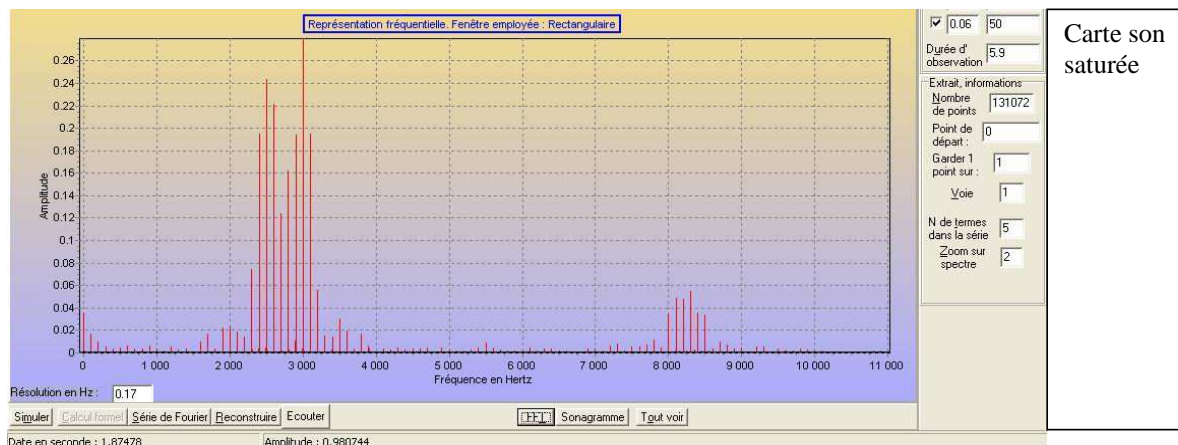
A la recherche de la non - linéarité

. Pour vérifier que cette non-linéarité ne provient pas de l'amplificateur, ni des haut-parleurs, nous envoyons l'une des fréquences sur le canal gauche et l'autre sur le canal droit de la carte son, tout en vérifiant que celle-ci est bien stéréo. En approchant les deux haut-parleurs de la même oreille, nous entendons bien les sons supplémentaires. Nous ne les entendons pas si un haut-parleur est approché de l'oreille droite et l'autre de la gauche Le cerveau ne crée donc pas ces sons supplémentaires. La chaîne sonore non plus (sauf si on pousse le volume à fond).

Commentaire [LXM3] : A développer ; en contradiction avec les expériences de Houtsma et Goldstein de 1972



On voit ci-dessous l'impact d'une carte son saturée sur les mesures (ici avec Wavefft, de PC à PC). Nous avons ici à l'origine un fichier son contenant les fréquences 2500, 2600, 2700, 2800, 2900, 3000Hz, soit les plus grands pic visibles à gauche sur la FFT du haut. L'axe des ordonnées montre l'amplitude et on voit bien ici que la carte son a une mauvaise courbe de linéarité. La série de fréquences à droite et les quelques pics à gauche sont apparus dans la carte son.





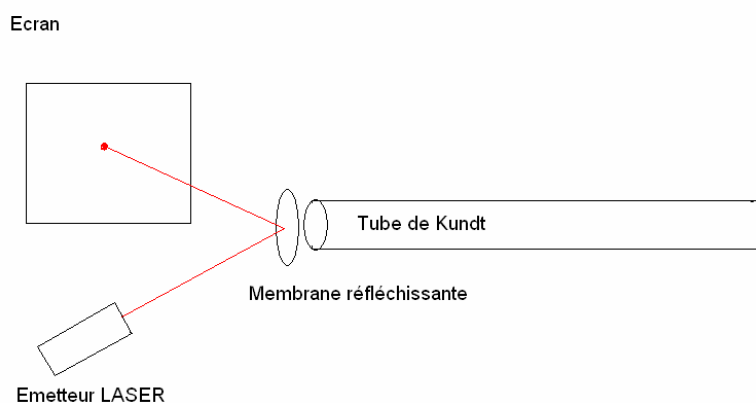
Carte son non saturée

Ici la carte son n'est pas saturée, les fréquences initiales sont les mêmes, on observe tout de même des fréquences supplémentaires, mais beaucoup plus aigues. On ne retrouve pas les sons supplémentaires, et ces fréquences plus aigues seraient absolument inaudibles si on envoyait du 17 000 Hz ou approchant comme dans les Mosquitos.

Nous avons bien sûr le meilleur échantillonnage possible pour nos sons « wave » sur ordinateur.

Nous déduisons donc que les fréquences supplémentaires apparaissent soit dans l'air, soit dans l'oreille, et nous penchons pour l'oreille.

Quand à l'air, nous avons tenté d'observer des phénomènes liés aux non-linéarités avec un laser et un tube de Kundt, qui aurait pu aussi nous permettre de trancher sur la sensibilité de l'oreille interne au déplacement ou à la pression.



On envoie un son à l'extrémité d'un tube de Kundt grâce à un GBF et à un haut-parleur

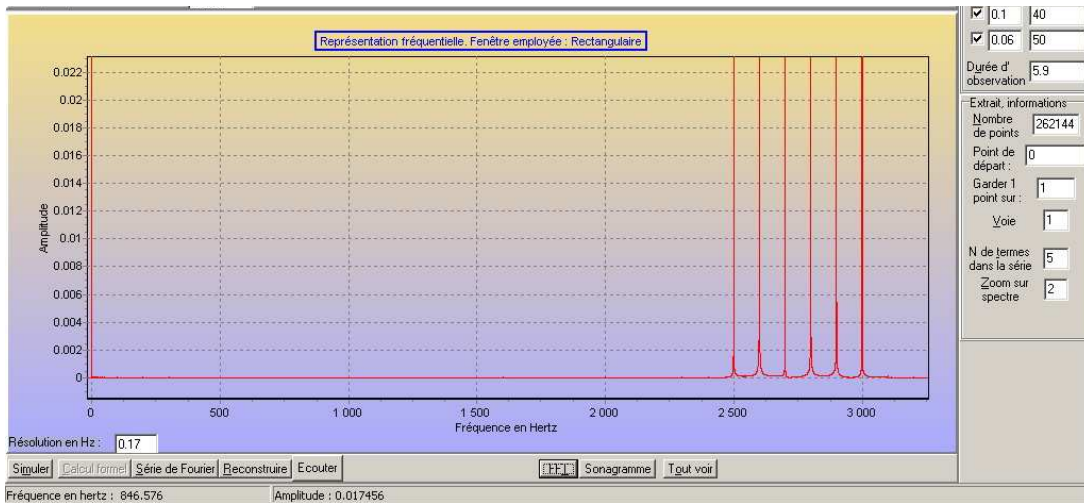
Malheureusement, l'imprécision de la membrane et du LASER du lycée nous ont empêché de faire des mesures concluantes.

Avec du matériel idéal nous aurions sûrement pu mesurer, ou évaluer, les différences de déplacement de la membrane en fonction de la fréquence (donc de la longueur d'onde) du son envoyé à l'extrémité du tube de Kundt.

Nous avons dû nous orienter vers d'autres manipulations.

Nous avons donc tenté d'enregistrer ces sons avec un micro puis de les visualiser à l'oscilloscope puis avec Wavefft.

Nous eûmes de grandes difficultés, les parasites s'engouffrant par le moindre élément de la chaîne (air fils) haut-parleurs – microphone – oscilloscope.



Finalement nous avons pu avoir la certitude que les sons supplémentaires n'apparaissent pas dans l'air. Voici un enregistrement sur PC au microphone analysé avec wavefft. Les fréquences envoyées sont 2 500, 2 600, 2700, 2800, 2 900 et 3 000 Hertz. Aucune fréquence supplémentaire n'apparaît, alors qu'à l'écoute alors qu'à l'écoute on ne distingue que le 100 Hz.

Différentes théories ont tenté d'expliquer le phénomène :

Helmholtz avait déjà proposé en 1863 la **théorie de la place** (une zone de la cochlée entre en résonance pour une fréquence incidente) : la composante à F1 est le résultat de distorsion cochléaire. Cette distorsion réintroduit de l'énergie à la fréquence différence $(n + 1)F1 - nF1 = F1$.

Chaque paire d'harmoniques adjacents génère de l'énergie dans le fondamental.

Georg von Békésy (prix Nobel 1961 de physiologie), [experiments.html](#) original publié en 1960, deuxième édition en 1989, avait montré qu'il ne s'agissait pas d'un phénomène de résonance, mais que la cochlée vibrait différemment selon la fréquence appliquée à la fenêtre ovale.

Shouten (1950 - 1970) propose de décaler les harmoniques en fréquence.

mais si on décale d'une valeur Δf (par exemple 2 Hz) ces harmoniques, donc 2502, 2602, 2702, 2802, 2902, 3002, le fondamental paraît lui aussi décalé de Δf . Cela n'est pas perceptible directement, le son grave paraît le même. Mais on peut faire battre ce 102 Hz avec du 100 Hz, et cela à une fréquence de 2 Hz.

Par exemple tous les harmoniques décalés avec une amplitude de 0,1 V et du 100 Hz avec une amplitude 20 fois plus faible soit 0,005 V. Si notre chaîne sonore était étalonnée, cela permettrait la mesure de l'amplitude de la fréquence de 102 Hz créée par l'oreille.

Mutinerie à bord ! Les harmoniques absents

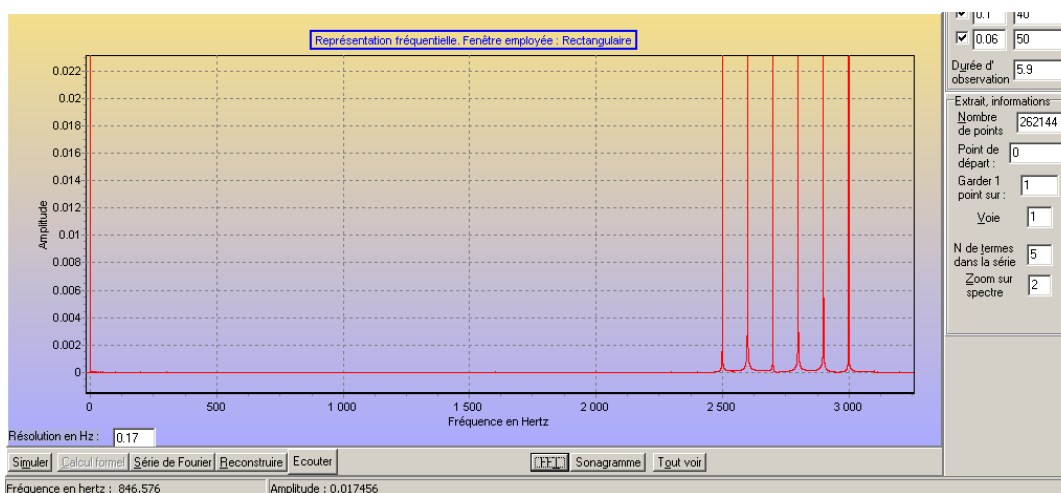
Mutin avait construit un orgue comportant uniquement les notes de fréquence multiple du 32 Hz et a découvert le curieux phénomène qui suit et que nous avons reproduit en nous basant sur un fondamental à 100 Hz :

On peut superposer les harmoniques 2 et 3 d'un fondamental à 100 Hz. On entend alors une note à 100 Hz. La suite est plus surprenante :

La superposition des harmoniques 25 à 30 d'un fondamental à 100 Hz, donc 2500, 2600 ... 3000 Hz donne à l'écoute un son grave de fréquence 100 Hz, mais très directif, il faut tendre l'oreille directement vers le haut-parleur. Cela semble confirmer l'explication précédente d'une non-linéarité du deuxième degré, donnant $f_2 - f_1$ soit 100 Hz.

Nous choisissons un fondamental à 100 Hz, mais nous ne gardons que les harmoniques 25, 26, 27, puis 25, 26, 27, 28, 29, 30. En écoutant ce son, à un niveau assez fort, nous entendons nettement le fondamental à 100 Hz. Nos essais d'estimation de l'amplitude de ce 100 Hz créé par l'oreille, en employant des battements entre ce 100 Hz et du 103 Hz de faible niveau ajouté à la suite d'harmoniques, n'a rien donné au lycée, que ce soit sur les haut-parleurs ou sur un casque : Après divers tests, il s'avère que la carte son de l'ordinateur du lycée coupe fortement le 103 Hz.

Voici le spectre en fréquences de l'enregistrement donné par un microphone, branché sur la carte son du PC, et placé près du haut-parleur : Il s'agit d'une copie d'écran du logiciel WaveFFT. La représentation temporelle a été zoomée pour montrer quelques périodes seulement : On note que la période est bien de 1/100 de seconde, donc la fréquence de 100 Hz. Le spectre en fréquence a été recadré de manière à augmenter les amplitudes. On ne remarque aucun pic à 100 Hz. La FFT a été effectuée sur 262 144 points.

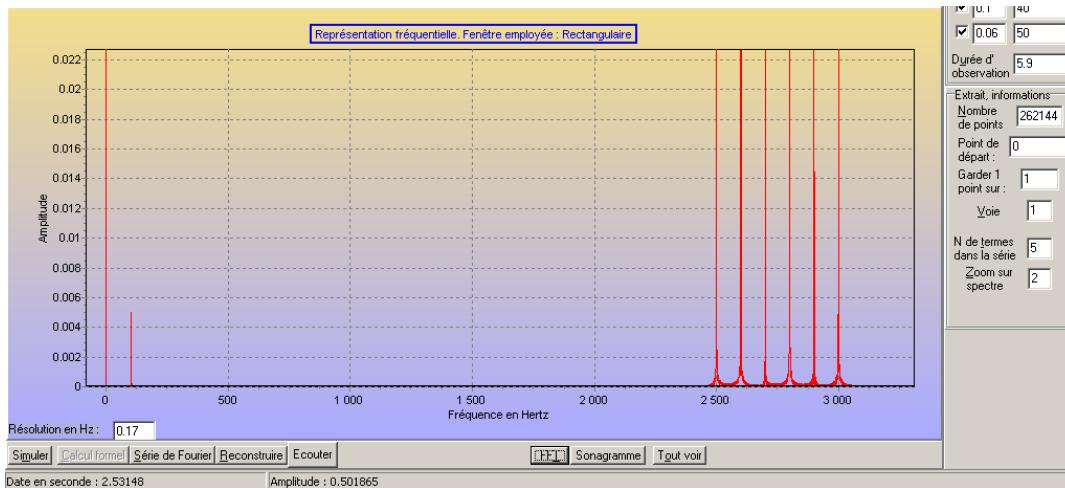


Le son de 100 Hz serait donc généré par l'oreille étant donné que la FFT n'atteste pas de sa présence.

Quelques problèmes se sont posés à nous car les enceintes passaient très mal le 103 Hz. L'astuce réside dans le phénomène vu juste précédemment. Nous avons donc créé des harmoniques du 100 Hz en ne gardant que les 25, 26, 27, 28, 29, 30 eme harmoniques. De la même façon nous avons créé les harmoniques 25, 26, 27, 28, 29, 30, du 103 Hz et il s'avère que cette fois ci, le battement entre le 100 et 103 Hz est bel et bien distinct. Ce battement serait généré par le 100 Hz et le 103Hz, fréquences créées dans l'oreille.

La superposition des harmoniques 25 à 30 d'un fondamental à 100 Hz, donc 2500, 2600 ... 3000 Hz donne à l'écoute un son grave de fréquence 100 Hz, mais très directif, il faut tendre l'oreille directement vers le haut-parleur. Cela semble confirmer l'explication précédente d'une non-linéarité du deuxième degré, donnant $f_2 - f_1$ soit 100 Hz.

A titre de comparaison, voici le spectre du même signal auquel a été ajouté une sinusoïde de fréquence 103 Hz, d'amplitude 0,005 V (soit 20 fois moins que les harmoniques 25 à 30, d'amplitude 0,1 V), sinusoïde que nous entendons distinctement battre avec celle à 100 Hz créée par notre oreille (qui est donc d'amplitude proche), cela avec du matériel, carte son et écouteurs de qualité correcte.



Création d'un mosquitone

Nous avons superposé les harmoniques de rang élevé (25 et plus) du 440 et du 660 Hz, avec de petits décalages en fréquence pour obtenir un effet de battement. Ceci fait nous l'avons testé...

Nous sommes donc maintenant capables de mettre en ligne nos découvertes et de fonder notre propre société « Mosquitone and Cie » afin de vendre notre sonnerie.

Conclusion

Comme nous l'avons vu, les phénomènes de 3ème son de Tartini et de Mutin sont bien réels et ne dépendent en aucun cas d'une quelconque altération due à un problème de matériel ou par un quelconque fait se déroulant dans l'air.

C'est bien notre oreille qui crée ces sons, dus à son fonctionnement non linéaire, a priori de 3ème degré. Les sons se « renforcent mutuellement » et créent même d'autres sons à la fois plus aigus et plus graves.

Nos fameuses sonneries à « ultrason » utilisent un phénomène physiologique bien connue : la perte de sensibilité de notre oreille au cours de notre vie, néanmoins les applications de ces phénomènes sont multiples et variés.

Ces effets physiques sont très intéressants car certains effets nous ont semblé de plus « spectaculaires », en particulier les battements lorsque nous « superposons » deux sons de fréquences proches (par exemple un son de 4000 Hz avec un son de 4002 Hz). Pour finir sur un note (haha) plus anecdotique, nous avons dû prendre de grandes précautions lors de certaines de nos expériences car nous mettions alors en jeu des sons de fréquence et d'amplitude élevés qui auraient pu abîmer de façon irréversible nos oreilles. Nous eûmes tout au plus que quelque migraine passagère.

Ce problème nous a paru de plus en plus difficile. Nous avons été confrontés à de multiples contradictions. Nous avons alors pris contact avec des personnes qualifiées :

-Baptiste est allé au début des vacances de Noël au CHU de Besançon.

Il a pris contact avec un professeur spécialiste d'ORL. Ce dernier lui a expliqué de façon plus précise le fonctionnement de l'oreille mais Baptiste n'a pas obtenu ici d'information sur les non linéarités.

-Nous avons tenté de prendre contact, via mail, avec une clinique privée de Béziers, cette dernière étant très réputée pour les problèmes liés à l'audition. Malheureusement nous n'avons reçu aucune réponse.

-Pierre a alors pris contact avec M Rolland Carrat, auteur d'une théorie innovante sur l'oreille, travaillant au centre d'audiophonologie infantile de Tours. Il a été intéressé par notre projet et nous conseilla d'augmenter de renouveler nos expériences en augmentant l'intensité sonore.

Théoriquement les effets résultant de la non linéarité devraient être amplifiés avec l'augmentation de l'intensité sonore alors que, bizarrement, nous avons obtenus ces effets même avec des intensités sonores relativement faibles.

Nous poursuivons donc actuellement nos recherches.