



Peut-on vraiment briser un verre en chantant ?

LYCÉE PARC DES LOGES – 91000ÉVRY
ANNÉE SCOLAIRE : 2019/2020

Marion JUMELLE (TS-SVT)
Adel BELGROUN (TS-SI)
Timothée BACCHI (TS-SI)
Edouard BREMONT (TS-SI)
Eric DURAND (Professeur référent)

Résumé

Le but de ce projet est de vérifier si l'on peut vraiment briser un verre , à la voix ou au son d'un instrument de musique.

Le projet est articulé en deux phases :

- *Une première partie où nous nous intéressons à la mise en résonance d'un objet de référence bien déterminé approvisionnable en quantité (verre Hederlig Ikea) et le cas échéant modélisable informatiquement, avec un système d'excitation dont nous contrôlons un maximum de paramètres. C'est ce qui sera présenté ici. Cette première phase a été à la fois assez longue mais riche en découvertes et a effectivement permis de bien cerner les points cruciaux pour la suite de l'étude.*
- *Une seconde phase d'essais et de tests (d'ici à la finale nationale si nous sommes sélectionnés) où nous passerons à une excitation musicale (voix, guitare électrique, violon, trompette...) . Nous en exposerons ici le plan de travail.*

Sommaire

A- Problématique	3
B - Organisation du projet	4
B1- Carte mentale.....	4
B2- L'équipe : répartition des rôles , réseau scientifique	4
B3- Phases du projet et événements importants	5
B4- Choix du verre pour la première partie de l'étude	6
B5- Matériel	6
C - Phase préparatoire	7
C1- Etude du phénomène de résonance : oscillateur harmonique en régime libre et forcé.....	7
C2- Etude des ondes stationnaires dans un cas simple monodimensionnel.....	8
3- Simulations informatiques	9
D - Etude expérimentale (première partie)	10
D1- Méthode de mesure du facteur de qualité.....	10
D2- Méthodes d'analyse spectrale (régime libre)	13
D3- Méthode d'observation des modes de résonance	15
D4- Mesures et tests sur un échantillon de 22 verres.....	17
D5-Analyse des mesures.....	17
E - Conclusion provisoire par rapport à la problématique	19
E1- Conclusions validées.....	19
E2- Conclusions hypothétiques (à investiguer)	19
F- Seconde partie du projet	19
G - Bilan provisoire ; si c'était à refaire.....	20
H - Bibliographie	20

Annexes (fichier séparé)

Annexe 1 - Le verre Hederlig (taille réelle).

Annexe 2 Audiogrammes et spectrogrammes des 22 verres étudiés.

Annexe 3 : L'oscillateur harmonique en régime libre et forcé

Annexe 4 : Ondes stationnaires transversales (Corde de Melde)

*' Le monde est rempli de résonances. Il constitue un cosmos d'êtres exerçant une action spirituelle.
La matière morte est un esprit vivant ''*

Vassily Kandinsky (1866- 1944), peintre, graveur, théoricien

A- Problématique

Peut-on vraiment casser un verre au son d'une voix ou d'un violon ?

Au moment de nous inscrire aux Olympiades de Physique, nous avons passé en revue plusieurs projets mais celui consistant à savoir si oui, ou non, on peut briser des objets avec des sons nous a paru à la fois le plus drôle, le plus spectaculaire , le plus facilement réalisable avec les moyens du bord , et passionnant d'un point de vue physique puisqu'il allait exiger de nous d'étudier de près les phénomènes de résonance .

Un enfant sur une balançoire voit son mouvement s'amplifier à chaque nouvelle poussée . Si celle-ci est effectuée au bon moment l'enfant conserve intégralement l'énergie qui lui a été donnée. Ce principe d'un apport d'énergie en phase avec les oscillations d'un système, avec pour conséquence d'une accumulation de cette énergie s'appelle « résonance ». Aucun objet n'y échappe : une voiture sur ses suspensions, un pont, un verre, un avion et même nos organes . Soumis à une excitation de fréquence adaptée , un système va être le siège d'oscillations de plus en plus importantes jusqu'à éventuellement la rupture .

Nous n'avons jamais douté que nous arriverions plus ou moins rapidement à briser des objets avec du son ; en fait notre première vraie difficulté a été de trouver une véritable problématique . C'est pourquoi nous avons décidé d'aller plus loin et de nous attaquer sérieusement à la légende selon laquelle on pourrait briser un verre avec la voix et par exemple le son d'un violon. .

C'est pourquoi notre projet comporte deux parties :

- Une première partie où nous nous intéressons à la mise en résonance d'un objet-modèle bien déterminé (verre Hederlig Ikea) avec un système dont nous contrôlons tous les paramètres, avec pour objectif de développer notre savoir faire . C'est cette partie qui sera présentée ici
- Une seconde phase d'essais et de tests que nous venons juste de commencer, où nous passerons à une excitation musicale (voix, guitare électrique, violon, trompette...) . Nous en exposerons le plan de travail.

B - Organisation du projet

B1- Carte mentale

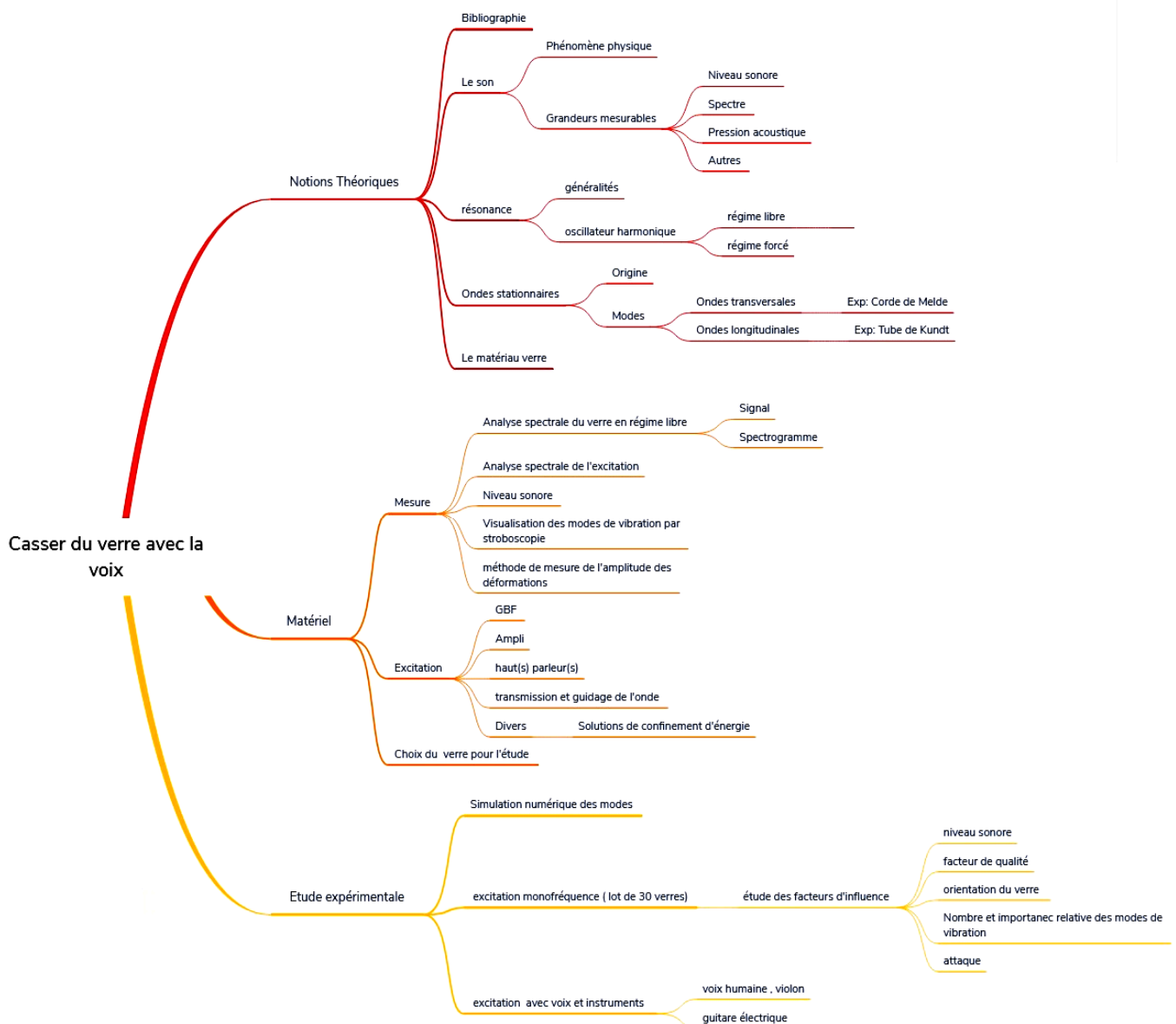


Fig1 : carte mentale(logiciel Xmind)

Ce document réalisé en commun nous a permis d'organiser nos idées avant de démarrer le projet.

B2- L'équipe : répartition des rôles , réseau scientifique

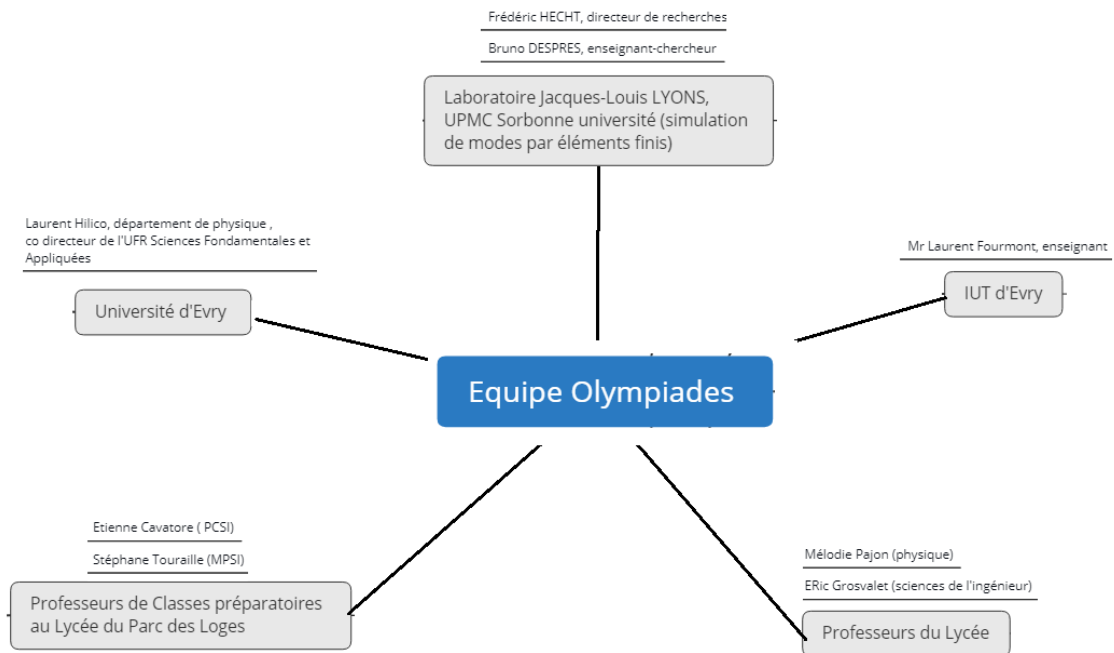
L'ensemble de l'équipe a travaillé ensemble la plupart du temps, chacun présentant des affinités particulières :

Marion : expérimentation

Edouard: bibliographie et théories physiques

Timothée : expérimentation et logiciels d'analyse

Adel Belgroun : rédaction du mémoire



(fig2) Nous avons également au fil du temps développé un réseau de collaborateurs réguliers qui nous ont guidé au fil le déroulement du projet par leurs conseils et leur soutien technique .

B3- Phases du projet et événements importants

Mai 2018 : départ du projet

Membres : Marion, Adel , Timothée, alors élèves de seconde .

Trois sujets sont proposés :

- Construction d'un bateau à foils (intéressant, faisable mais demande de gros moyens)
- Etude d'un système de conversion de CO₂ en dioxygène (techniquement très difficile)
- Projet résonance , retenu.

Juin 2018 : premières simulations informatiques en collaboration avec le laboratoire Jacques Louis LYONS de l'UPMC. Cependant compte tenu des difficultés mathématiques la décision est prise de reporter le projet d'un an.

Mars 2019 : reprise du projet. Phase de tâtonnements et de tests jusqu'à l'été .

Premiers verres cassés sans toutefois que l'expérience soit reproductible.

Inscription au concours.

Juin 2019 Sur une suggestion de Laurent Hilico , nous mettons au point une méthode permettant d'évaluer les déplacements des verres et de connaître leur facteur de qualité.

Septembre 2019 : Fin septembre nous découvrons que l'orientation des verres a une importance cruciale pour la mise en résonance des verres. Début de la collaboration avec le professeur Cavatore ; mise en évidence de l'existence de modes croisés.

Octobre-Novembre 2019 : travail sur un échantillon de 30 verres, dans l'objectif de mieux connaître le phénomène et notamment d'être capables d'identifier els meilleurs candidats à la rupture par résonance.

Décembre 2019-Janvier2020 : essais avec sons musicaux.

B4- Choix du verre pour la première partie de l'étude

Afin de pouvoir d'une part modéliser le verre pour des simulations informatiques et effectuer des expériences comparatives, notre choix s'est porté sur un verre du commerce, facile à acheter en grandes quantités.

Intuitivement compte tenu du fait que l'épaisseur de verre est pratiquement la même quelle que soit la taille du modèle, nous avons cherché un verre des plus grandes dimensions possibles (hauteur-diamètre) afin d'obtenir de grandes déformations.

Ce choix arbitraire s'est avéré judicieux puisqu'à l'heure actuelle nous avons réussi à briser 22 verres sur les 30 achetés. Il demeure que c'est un modèle relativement solide ; il est beaucoup plus aisé de briser des verres en cristal.

Hauteur totale : 22 cm

Hauteur du verre hors pied : 11cm

Diamètre maxi : 100 mm

Diamètre au niveau du bord : 75 mm

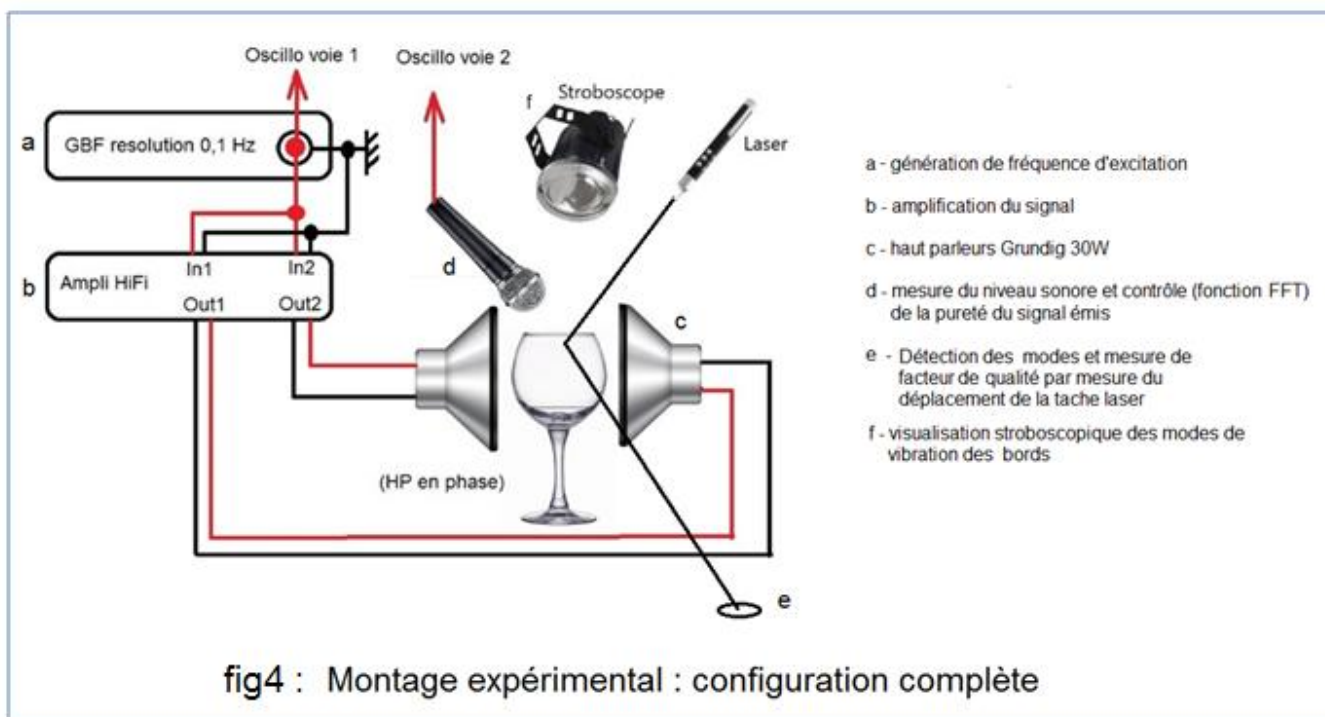


(fig3 : le verre Hederlig)

B5- Matériel

L'étude préliminaire des spectres des verres étudiés est réalisée avec un ordinateur muni d'un micro intégré et du logiciel Audacity. Pour une recherche rapide des fréquences de résonance nous utilisons aussi l'appli « spectroïd » sous Android. Pour les manipulations et les tests de rupture voici la configuration employée.

Les parois du verre sont situées à quelques cm des haut-parleurs, et ceux-ci sont positionnés de façon à être centrés sur le diamètre maximal du verre.



C - Phase préparatoire

C1- Etude du phénomène de résonance : oscillateur harmonique en régime libre et forcé

(modèle détaillé succinctement en annexe 3)

Pour nous familiariser avec l'oscillateur harmonique, notre professeur nous a fait commencer par une expérience très simple : une masse suspendue à un ressort, en régime libre et forcé (fig5)

La masse valait 200g , et provoquait un allongement L du ressort de 60mm.

De ceci on peut déduire la raideur du ressort $k = \frac{F}{L} = \frac{mg}{L} = \frac{0,200 \cdot 9,81}{0,060} = 33 \text{ N.m}^{-1}$

Malgré les apparences cette situation est comparable à celle d'un objet placé sur un plan horizontal. Le poids étant constant, l'allongement initial dû à son poids ne fait que fixer la position d'équilibre. La seule force variable est bien la force de rappel.

On calcule ainsi que la fréquence des oscillations , en négligeant les frottements , sera telle que

$2\pi f = \sqrt{\frac{k}{m}}$ soit $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = 2 \text{ Hz}$ environ, et c'est ce que nous observons.

Ensuite en régime forcé nous avons effectivement observé une amplification du mouvement pour une fréquence de 2Hz.

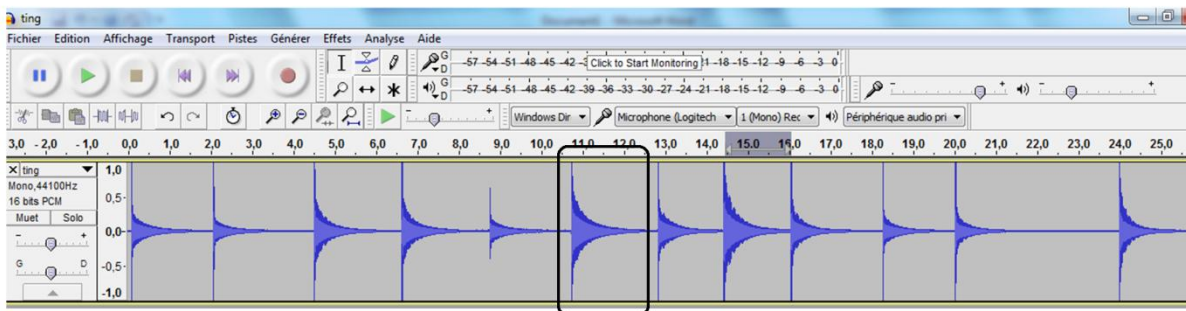
Par contre compte tenu de la très basse fréquence et des frottements dans le système nous n'avons pas pu tracer avec précision le graphe de l'amplitude du mouvement en fonction de la fréquence . Mais l'objectif de cette expérience était plutôt qualitatif (mise en évidence d'une résonance).

En revanche nous avons souhaité analyser plus précisément les oscillations amorties d'un verre en régime libre, pour voir si cela correspondait bien au modèle .

Verre frappé en régime libre

Objectif : chercher à savoir si l'amplitude de vibration du verre est une exponentielle décroissante , ce qui voudrait dire que le verre peut être assimilé à un oscillateur harmonique en régime libre.

Fig6 : Graphe obtenu (audacity)



Ordonnée : amplitude normalisée du signal (s(t)/smax)

Abscisse : date t (secondes ; 44100 échantillons/s)

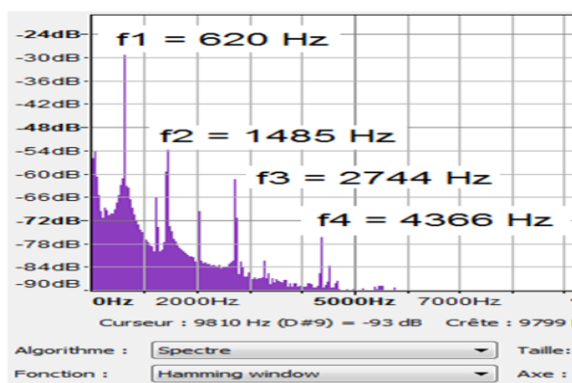


fig7 : spectre du signal entouré

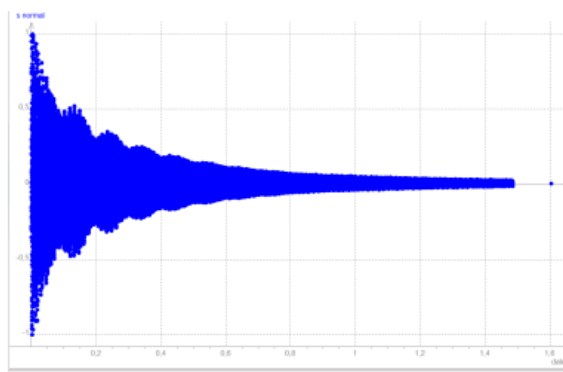


Fig8 : graphe s(t) exporté sous Regressi

Avec la fonction réticule de regressi nous avons à l'estime déterminé quelques points de l'enveloppe du graphe précédent (en faisant abstraction des battements) , puis nous avons cherché à modéliser cette enveloppe par une fonction exponentielle décroissante de type $s(t) = A e^{-Bt}$.

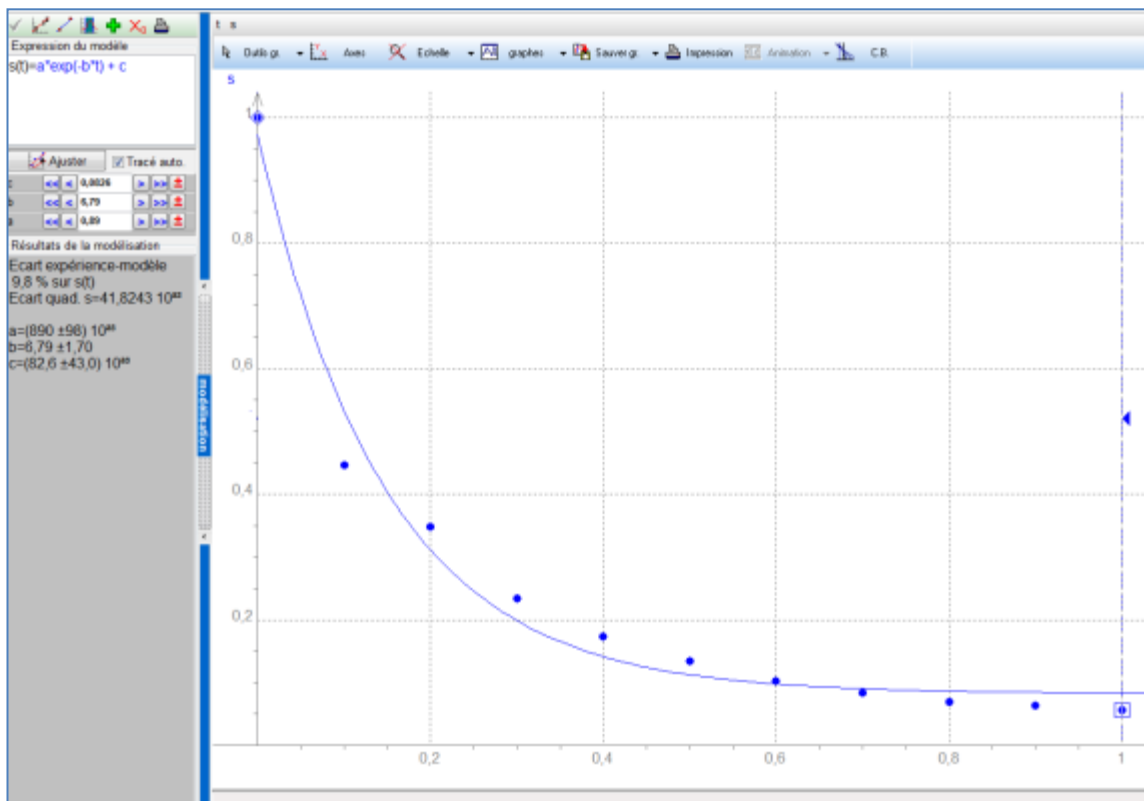


Fig 9 : modélisation de l'enveloppe du signal par une exponentielle décroissante

Exploitation et commentaires :

L'allure de l'enveloppe est proche d'une exponentielle décroissante mais le coefficient de corrélation n'est pas très bon ; le verre ne peut pas être considéré comme un oscillateur aussi simple qu'un système masse-ressort même s'il n'en est pas très éloigné .

Ceci se comprend notamment en observant le spectre : la fréquence de résonance n'est pas unique. Entre autres on remarque (nous en reparlerons) un battement sur le signal, dû au fait que le verre a en réalité deux fréquences de résonance proches (ici de l'ordre de 10 Hz) .

Si l'on utilise tout de même ce modèle en première approximation (en ne considérant pas les autres modes que celui de fréquence propre 620 Hz) alors comme le modèle de l'oscillateur harmonique en régime libre indique que $b = \omega_0 / 2Q$, en prenant $\omega_0 = 2\pi \cdot 620$ Hz (fréquence propre du principal mode propre du verre) on peut en utilisant la modélisation de Regressi estimer le facteur de qualité du verre à $Q = \omega_0 / 2b = 2\pi \cdot \frac{620}{2 \cdot 6,79} \approx 280$ environ.

C2- Etude des ondes stationnaires dans un cas simple monodimensionnel

(détails dans l'annexe 4) Nous avons réalisé l'expérience de la Corde de Melde .

L'objectif de cette expérience était de comprendre ce qu'est une onde stationnaire et un mode de vibration.

Dans le cas de la corde de Melde le modèle nous était (sauf départ) relativement accessible.

La masse de la corde était de 8 g pour une longueur totale $L = 1,3$ m.

La longueur de la corde soumise aux vibrations était de $L' = 1$ m.

Le contrepoids avait une masse de 400g.

Dans ces conditions d'après le modèle , les fréquences des modes de résonance devaient être en théorie de

$$F = nc/2L' \quad \text{avec } c = \sqrt{\frac{TL}{m}} \text{ soit ici } \sqrt{\frac{0,400 \cdot 9,81 \cdot 1,3}{0,008}} = 25 \text{ m/s}$$

Nous devions donc observer des fréquences multiples de 12,5 Hz , et cela a bien été le cas.

Nous avons envisagé un moment d'étendre notre étude théorique et pratique des modes de vibrations aux situations en deux dimensions mais nous ne l'avons pas fait par manque de temps.

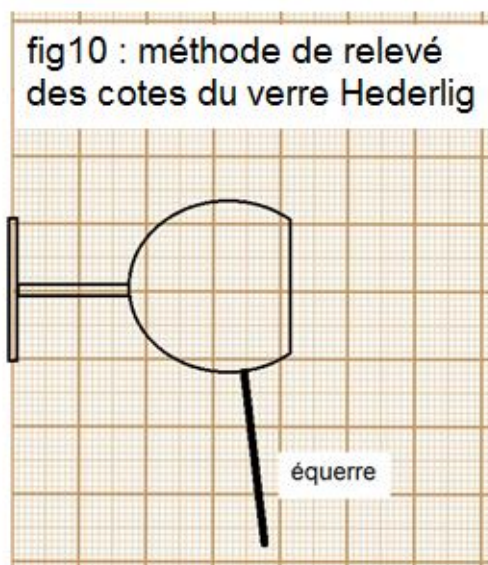
De toutes façons, lorsqu'il s'agit d'un objet aussi complexe qu'un verre il n'est plus question de mettre le système en équation. Seules des méthodes de simulation de type « éléments finis » calculant les oscillations de proche en proche dans le système (auparavant numérisé) permettent d'accéder aux modes de vibration.

3- Simulations informatiques

Dès juin 2018 nous avons noué des liens avec MM Hecht et Despres du laboratoire Jacques Louis Lyons de l'UPMC.

Mr HECHT a en effet développé un logiciel de calculs de vibrations performant permettant à partir des dimensions de l'objet de prédire ses modes de vibration.

Pour cela il nous a fallu prendre les cotes du verre. Ne parvenant pas à trouver un partenaire capable de le faire avec une machine de mesure nous nous sommes rabattus sur une méthode simple consistant à placer le verre contre un mur et relever son profil à l'aide d'une équerre sur une feuille de papier millimétré. Pour les épaisseurs nous avons ensuite cassé le verre et mesuré les épaisseurs de matière à différentes hauteurs.



hauteur mm	diamètre extérieur	rayon extérieur	épaisseur de verre locale
225	74	37	1,5
224	74	37	1
210	84	42	1
200	90	45	1
190	96	48	1
180	99	49,5	1
170	101	50,5	1
160	101	50,5	1
150	97,5	48,75	1,5
140	90	45	2,5
130	75	37,5	3,5
120	53	26,5	4,5
117	43	21,5	21,5
110	23	11,5	11,5
100	11	5,5	5,5
90			
80			
70			
60			
50	10	5	5
40			
30			
20	10	5	5
10	19,5	9,75	9,75
0	78	39	39

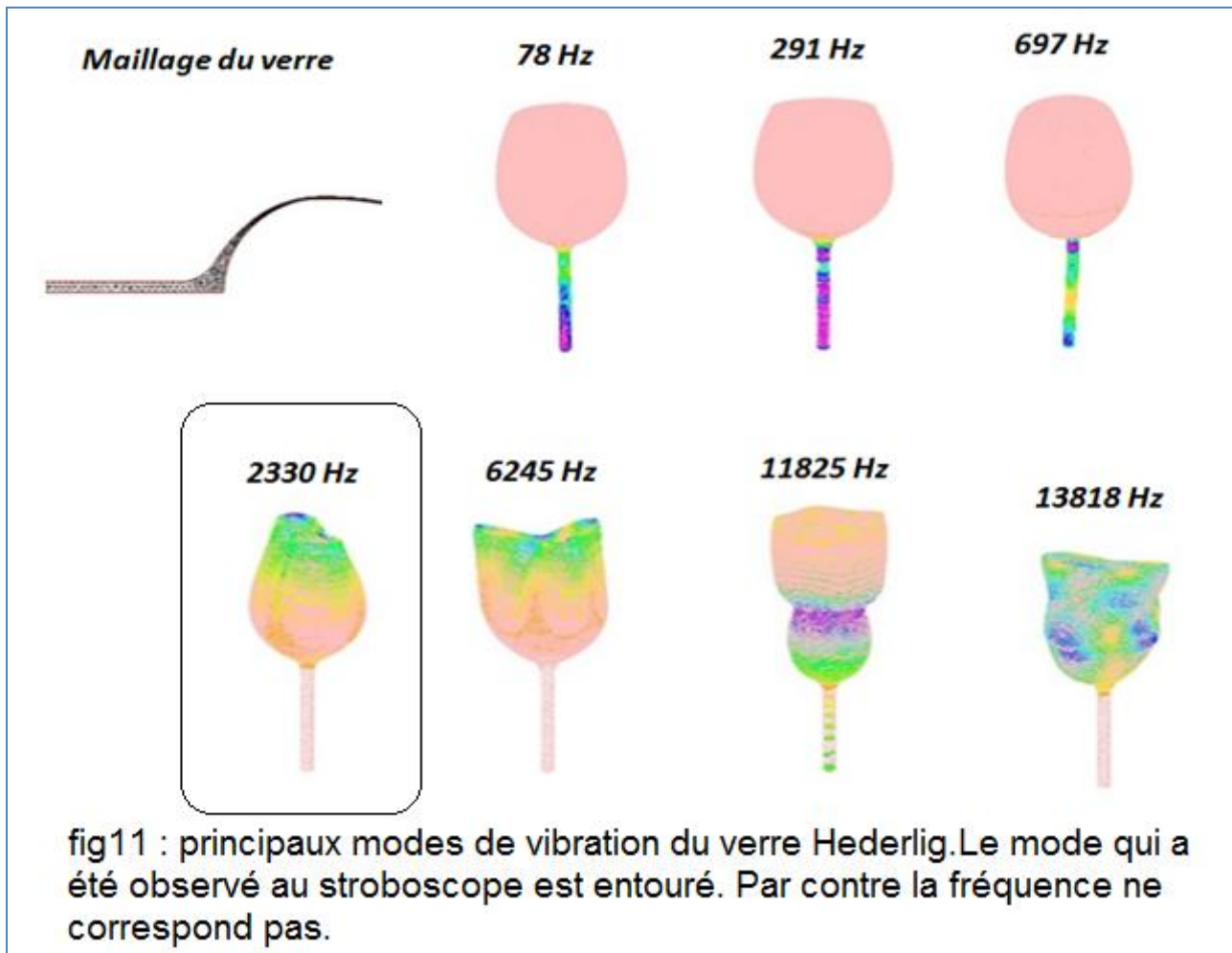
La simulation informatique a donné des résultats très intéressants quoique contrastés.(fig 11 page suivante)

Le résultat positif est qu'elle nous a appris l'allure des principaux modes de vibration du verre (fig 11) Par contre, les fréquences indiquées en gras ne correspondaient pas à ce qui était observé (le principal mode de compression-dilatation du verre Hederlig a une fréquence propre située entre 610 et 650 Hz environ au lieu de 2330 Hz).

Nous avons mis cela sur le compte de notre méthode de mesure ; sans compter que nous n'avons pas réussi à obtenir de la part d'Ikea plus d'informations que celles de la plaquette commerciale, notamment sur la nature du verre.

Mais somme toute, la suite montrera que ceci n'avait pas une grande importance .

Cependant , dans un second temps, nous été en contact avec un professeur de l'IUT d'Evry qui nous a proposé de nous fournir des mesures beaucoup plus précises grâce à une machine tridimensionnelle. Toutefois les mesures ont pris beaucoup de temps et il s'est avéré qu'elles n'étaient pas facilement importables par nos partenaires à Jussieu. De plus elles ne comprenaient pas de mesures d'épaisseur, ce qui fait que nous en sommes restés là.



D - Etude expérimentale (première partie)

D1- Méthode de mesure du facteur de qualité

Nous avons réellement commencé à progresser lorsque nous avons disposé d'une méthode permettant de mesurer les déformations du verre. Cette méthode nous a été suggérée par le professeur Hilico ; nous ne l'avons pas mise en œuvre tout de suite car de facto les reflets du laser sur le verre sont faibles et nous obligeaient à travailler dans l'obscurité.

Mais lorsque le professeur Cavatore nous a communiqué le sujet du concours des Mines cité dans la bibliographie, où la déformation du bord de verre est mesurée par une méthode interférométrique, nous avons compris qu'il s'agissait là d'un outil incontournable et nous avons reconsidéré la suggestion de Laurent Hilico.

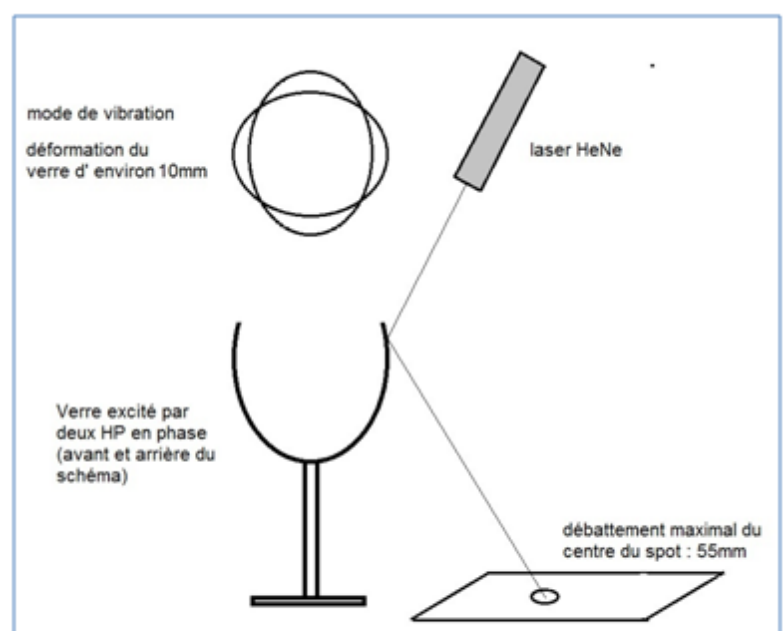


fig12 : méthode d'observation des vibrations du bord du verre , utilisant un laser

Si le verre ne se déplaçait que parallèlement à lui-même (comme c'est le cas au niveau du diamètre maximal) nous n'aurions sur la feuille qu'un débattement faible, puisque au niveau des bords d'après nos observations en stroboscopie, le débattement n'excède pas 10mm environ (ce qui est suffisant pour provoquer la rupture) . En venant frapper typiquement 10 mm sous le bord du verre, nous amplifions les déformations, car lors de la compression-dilatation, le bord s'incline ou se relève. Nous arrivons ainsi à des débattements du spot laser sur la feuille de papier pouvant aller jusqu'à 10 cm !

Avant de comprendre que l'orientation des verres jouait un rôle, nous pensions que seuls certains verres étaient capable de vibrer en mode « compression-dilatation », et d'autres non. (Nous pensions en effet que les verres étaient nécessairement de révolution.) Nous plaçons donc plusieurs verres différents sans orientation particulière jusqu'à observer au stroboscope un mode satisfaisant. En utilisant le laser nous avons observé rapidement , au départ par hasard , que l'orientation des verres changeait la trajectoire du spot (et donc en fait le mode de vibration). Nous avons alors commencé à pivoter les verres pour rechercher une trajectoire rectiligne du spot , dirigée vers le verre , typique d'un mode de compression-dilatation correct . C'est alors que nous avons effectué nos premières « vraies » mesures de réponse en fréquence des verres au voisinage de la résonance. Ceci nous a permis de vérifier que les verres sont sensibles à une bande de fréquence extrêmement réduite ; de plus nous nous sommes intéressés à leur facteur de qualité (fig 13)

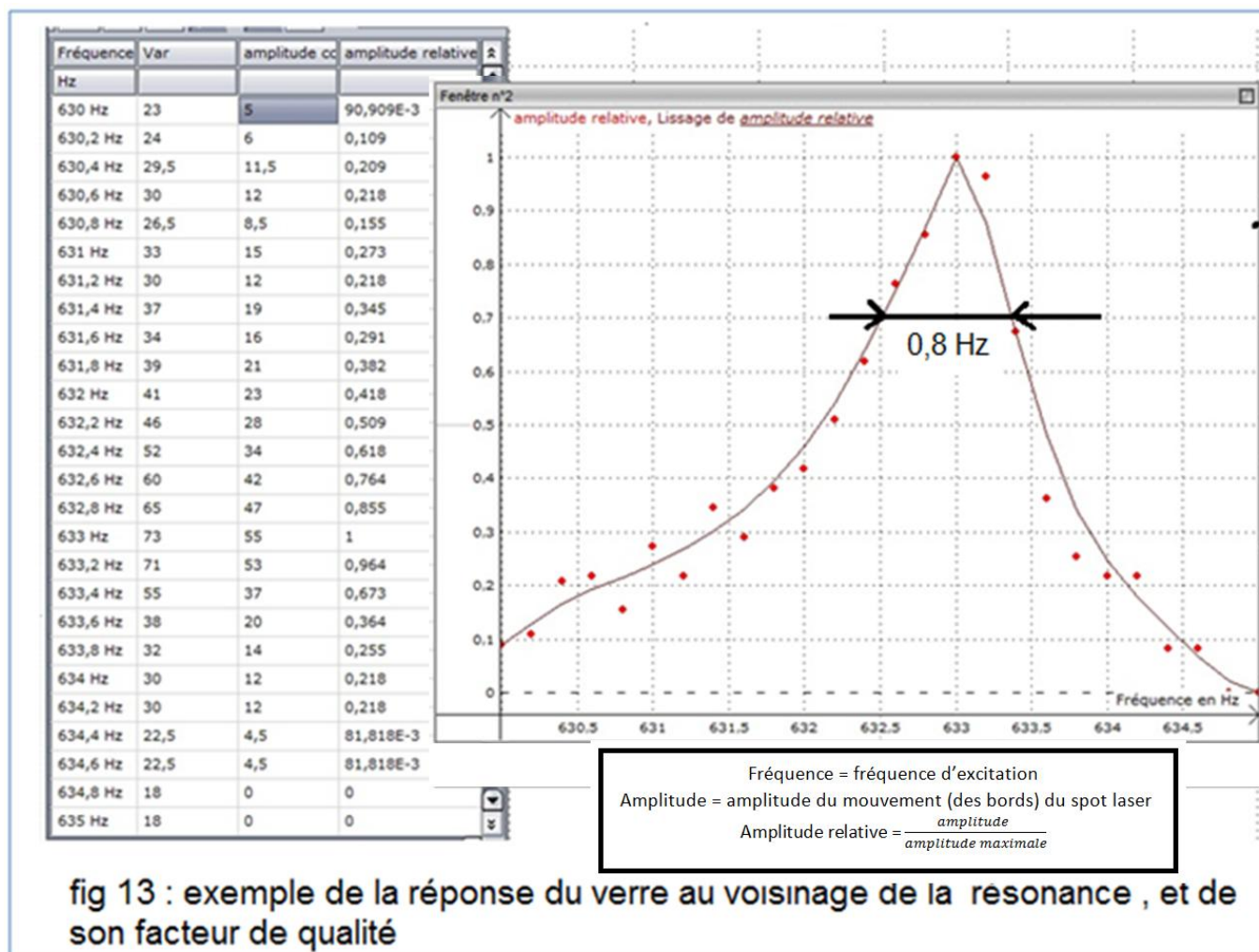
Disons tout de suite que certes, l'amplitude du mouvement du spot est supérieure à celle du bord (puisqu'il s'incline-se relève). Mais ceci nous permet tout de même de visualiser un beau graphe de réponse en fréquence en oscillations forcées.

On voit qu'il est essentiel pour trouver la résonance maximale d'ajuster la fréquence de l'excitation à $\pm 0,1$ Hz.

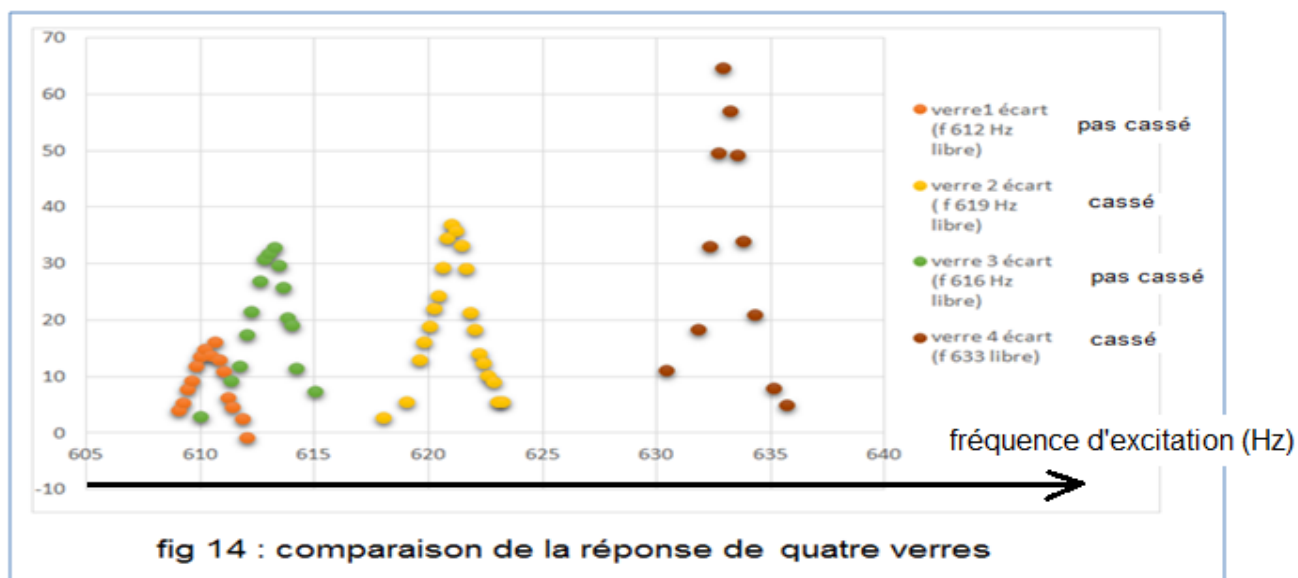
Par ailleurs, si l'on appelle f_1 et f_2 les fréquences pour lesquelles l'amplitude du mouvement = $\frac{\text{Amplitude maxi}}{\sqrt{2}}$ on peut montrer que le facteur de qualité $Q = \frac{f_{\text{resonance}}}{f_2 - f_1}$.

(fig13, page suivante) Comme nous avons tracé ici l'amplitude relative , on voit d'un coup d'œil que $Q = \frac{633}{0,8} = 800$ environ, ce qui est du même ordre de grandeur que ce que nous avons (grossièrement) estimé plus haut (300).

Ce qui est surtout intéressant c'est que par cette méthode on dispose d'un moyen de comparer des verres identiques, comme par exemple fig14 où 4 verres ont été étudiés strictement dans les mêmes conditions:



débattement du spot laser sur la table
(mm)

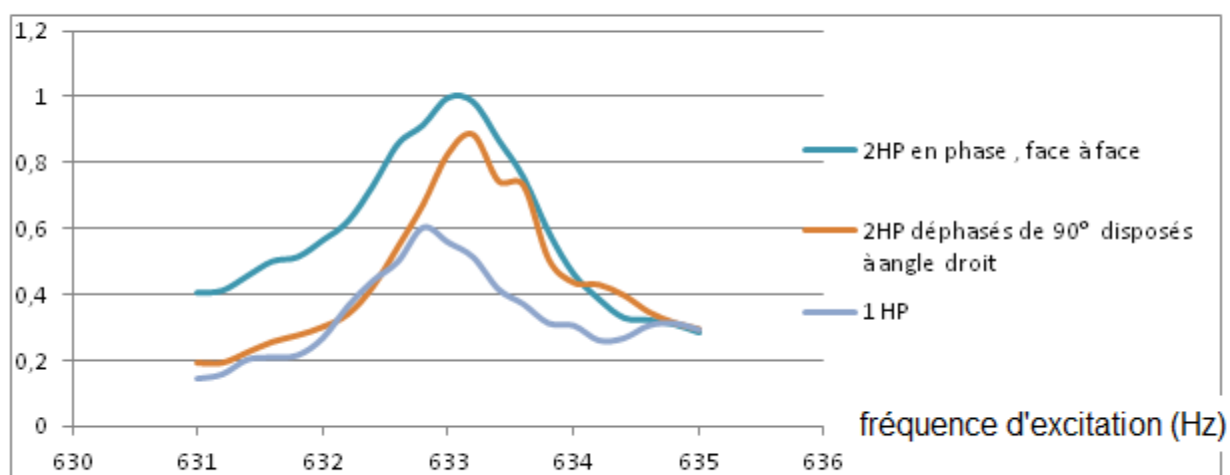


Il est remarquable que

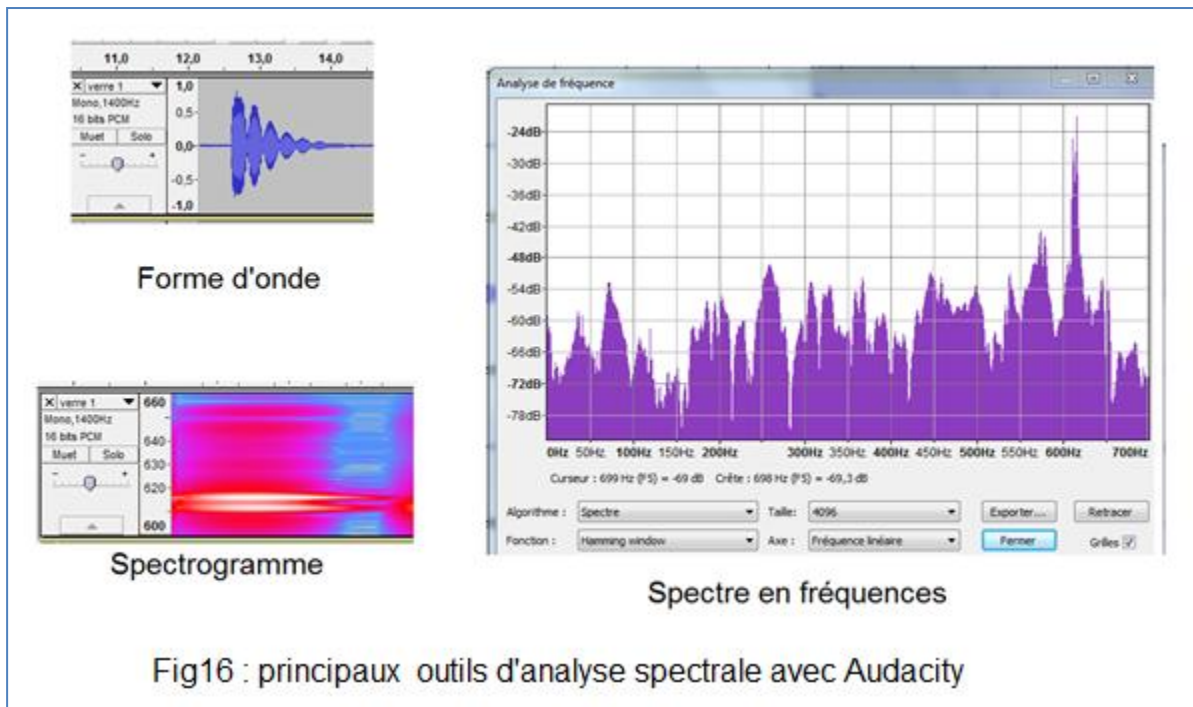
- Le verre noté ici « 1 » est le verre 15 de la série de 22 verres étudiée plus loin, verre que nous n'avons jamais réussi à casser
- Le verre noté ici « 2 » était le verre 11 de la série, qui a cassé
- Le verre noté ici « 3 » est le verre 5 de la série, que nous n'avons pas réussi à casser
- Le verre noté ici « 4 » a été cassé (quasi-immédiatement, et sa coupe totalement détruite)

Cette méthode a également permis de valider le fait qu'il était préférable (vu la faible puissance de notre système d'excitation) d'exciter le verre simultanément avec deux hauts-parleurs en vis en vis, émettant en phase :

Amplitude relative du mouvement de la tache laser au niveau de la table



D2- Méthodes d'analyse spectrale (régime libre)



Le logiciel audacity permet d'enregistrer des sons, c'est-à-dire de les transformer en tensions électriques.

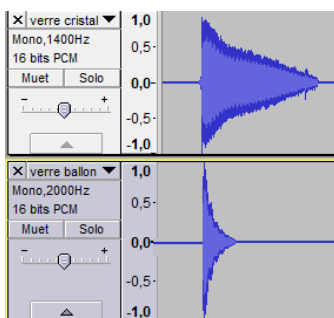
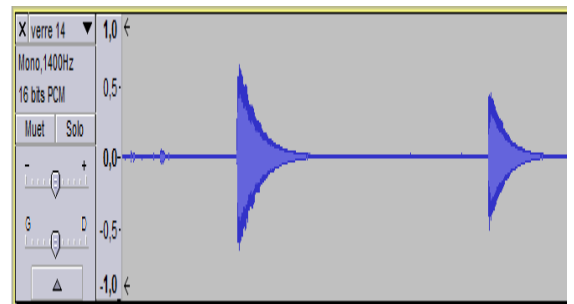
- L'amplitude de référence d'une tension enregistrée est 1,414 V , amplitude qu'il convient de ne pas dépasser en règle générale. A cette amplitude correspond le chiffre 1 sur l'échelle linéaire des formes d'onde.
- Par ailleurs, on peut aussi exprimer le niveau d'un signal monofréquence sinusoïdal en référence à cette valeur :

$$L \text{ (dBu)} = 10 \log \frac{\text{amplitude du signal}}{1,414}, \quad \text{dBu signifiant decibels unloaded.}$$

C'est pourquoi avec des outils comme Audacity le niveau sonore maximum est généralement 0dB.

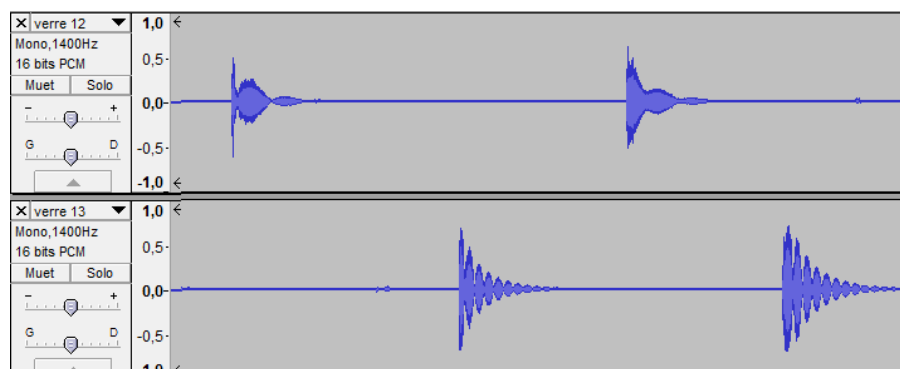
La forme d'onde (linéaire) représente le signal en fonction du temps comme on le verrait sur un oscilloscope .

Elle permet donc de distinguer un signal fort d'un signal faible→



Un amortissement rapide d'un amortissement plus long

On peut également immédiatement savoir si un verre a deux fréquences de résonance proches. En effet si c'est le cas des battements apparaissent.



En effet, si nous additionnons deux signaux de même amplitude

$A \cos(2\pi f_1 t)$ et $A \cos(2\pi f_2 t)$:

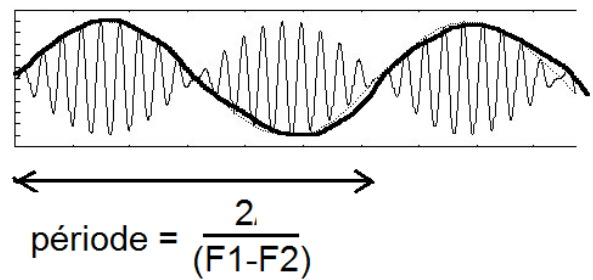
$$A \cos(2\pi f_1 t) + A \cos(2\pi f_2 t) = 2A \cos\left(\frac{2\pi f_1 - 2\pi f_2}{2}\right) \cos\left(\frac{2\pi f_1 + 2\pi f_2}{2}\right).$$

On obtient donc un signal de pulsation moyenne, modulé par un signal de fréquence $\frac{f_1 - f_2}{2}$.

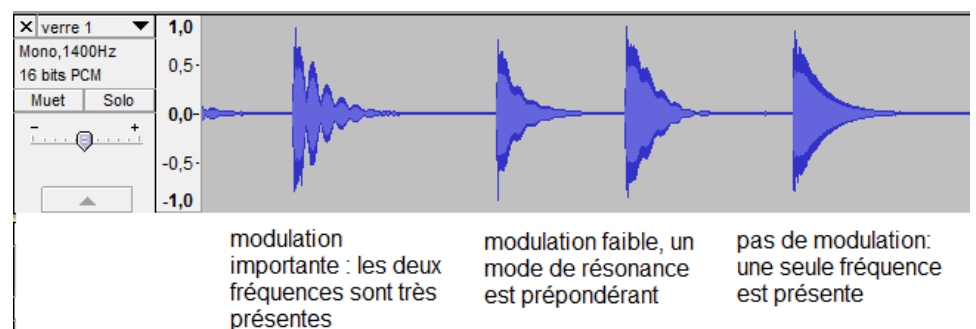
Il apparaît des « bosses » de période $\frac{1}{f_1 - f_2}$.

Par conséquent en mode « forme d'onde » il suffit de mesurer la durée en s d'une bosse et de calculer son inverse pour trouver l'écart entre les deux fréquences de résonance.

Dans notre exemple, un lobe a une durée de 0,2s environ, donc l'écart de fréquence entre les deux fréquences proches est 4Hz, ce qui est confirmé sur le spectre (pics à 611 et 615 Hz).



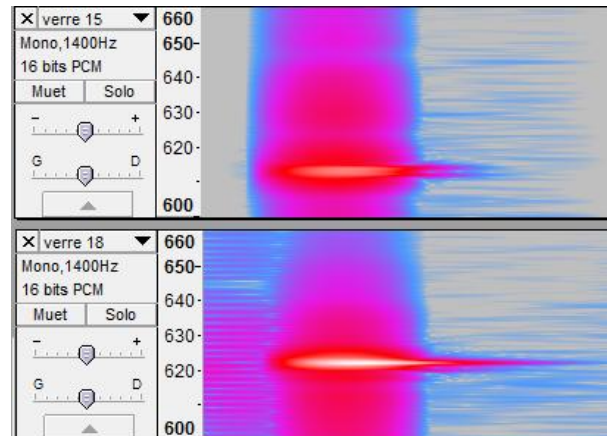
On peut également apprécier (-mais plus visible en mode spectrogramme) l'importance relative des deux fréquences.



Le spectrogramme permet d'observer le niveau sonore (dBU) des fréquences présentes dans un intervalle de fréquences donné, et ce en fonction du temps. Par ailleurs une échelle de fausses couleurs (paramétrées par nos soins entre -15 dBU et -50dBU) permet simultanément d'évaluer le niveau sonore des signaux qui composent le spectre.

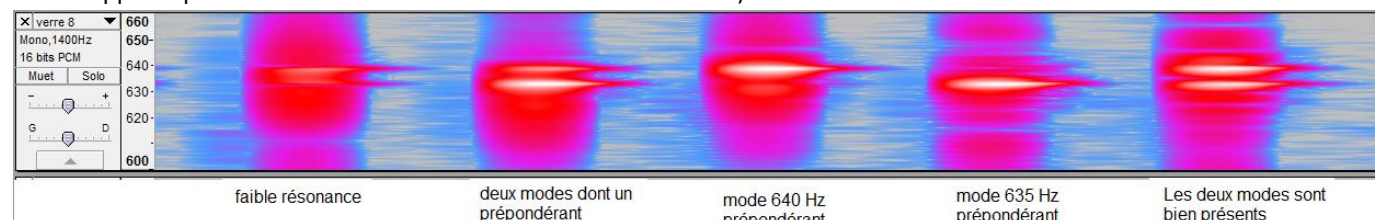
Le spectrogramme permet donc

- (à droite) de comparer (en dB) les réponses à une excitation (la tache blanche correspond au maximum de l'échelle de fausses couleurs : le verre 18 résonne plus fort que le verre 15)



De comparer la durée de la phase d'amortissement (le verre 13 résonne beaucoup plus longtemps que le verre 8)

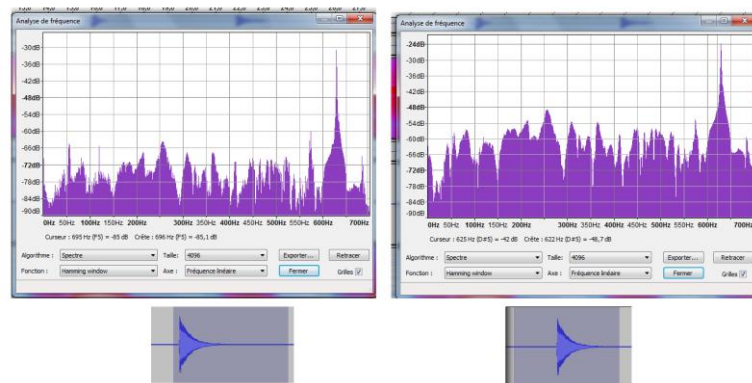
D'observer la réponse en fréquence d'un même verre suivant l'endroit où il est excité. Ci-dessous les réponses d'un même verre frappé en plusieurs lieux différents de son diamètre maximal)



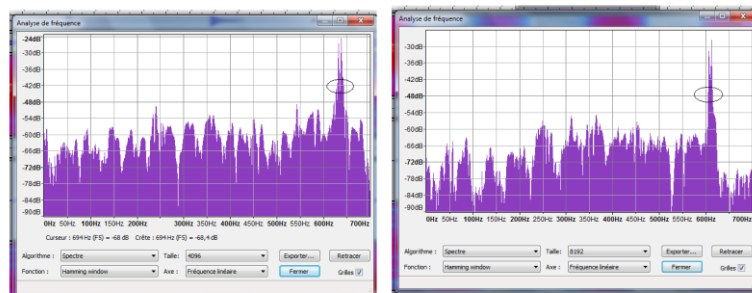
Enfin, **le spectre en fréquences** montre les fréquences qui composent le signal , ou plus exactement puisque le signal n'est pas périodique la décomposition en une somme de signaux monofréquence sinusoïdaux du signal correspondant à l'intervalle de temps sélectionné.

Frapper un verre par une courte percussion revient mathématiquement à lui proposer une infinité de fréquences d'excitation. Le spectre permet donc de trouver immédiatement les principales fréquences propres du verre.

En revanche son allure dépend de la durée de l'intervalle sélectionné (à droite), c'est pourquoi nous n'avons en définitive pas vraiment pu comme nous le souhaitions au départ parvenir à comparer rapidement le facteur de qualité des verres en étudiant leurs spectres.



C'est cependant un outil de comparaison qui peut donner quelques confirmations lorsque l'on s'intéresse aux qualités relatives de deux verres , sans égaler la mesure directe du facteur de qualité par la méthode du spot laser décrite précédemment.



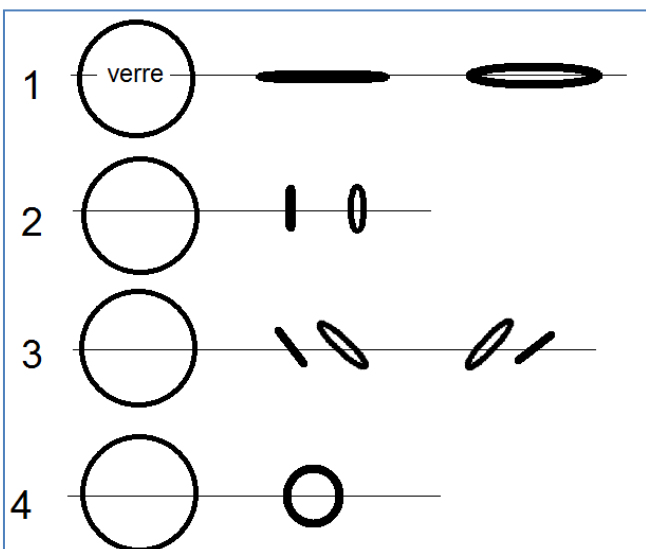
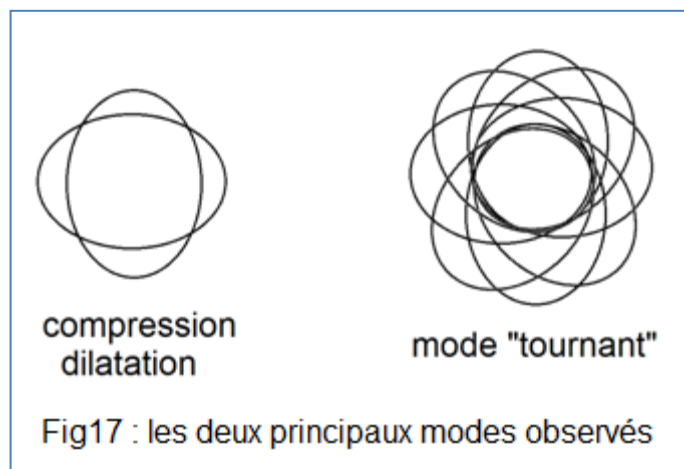
verre 8 , jamais cassé

verre 13, cassé en quelques secondes

D3- Méthode d'observation des modes de résonance

Au départ et pendant une longue période, nous avons observé les modes uniquement au stroboscope.
Nous avons alors observé deux modes différents , et avons déjà compris que seul le mode de « compression-dilatation » était susceptible de provoquer des ruptures du verre.

Même si rétrospectivement cela peut paraître étrange, nous nous sommes longtemps demandé comment faire pour favoriser le mode de compression-dilatation ; et avons mis beaucoup de temps à comprendre que l'on pouvait facilement « forcer » un mode ou l'autre en **pivotant le verre sur lui-même**.

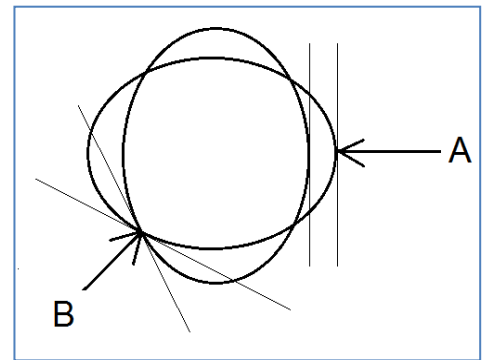


L'essai étant très concluant, ceci nous a amené à penser que les verres devaient présenter des axes préférentiels pour résonner en compression-dilatation. Et de fait un examen rapide en pivotant le verre , appuyé sur des cales , sur lui-même a permis de constater qu'en réalité très peu de verres sont de révolution.

Figures 18 Par la suite, nous avons commencé à étudier le comportement du verre suivant son orientation ; en observant les déplacements du spot laser, nous avons remarqué que celui-ci décrivait des trajectoires différentes:

Ce que nous interprétons ainsi :

Lorsque le verre est en mode de compression-dilatation et que le laser intercepte le bord (par le haut) comme en A, le spot laser se déplace sur la table comme en 1. (Si l'orientation n'est pas parfaite, le trait est légèrement ovale. Nous y reviendrons). Concrètement ce mouvement est très important car non seulement le bord se déplace mais de plus (comprimé) il se relève et (dilaté) il se penche, ce qui amplifie encore le débattement.

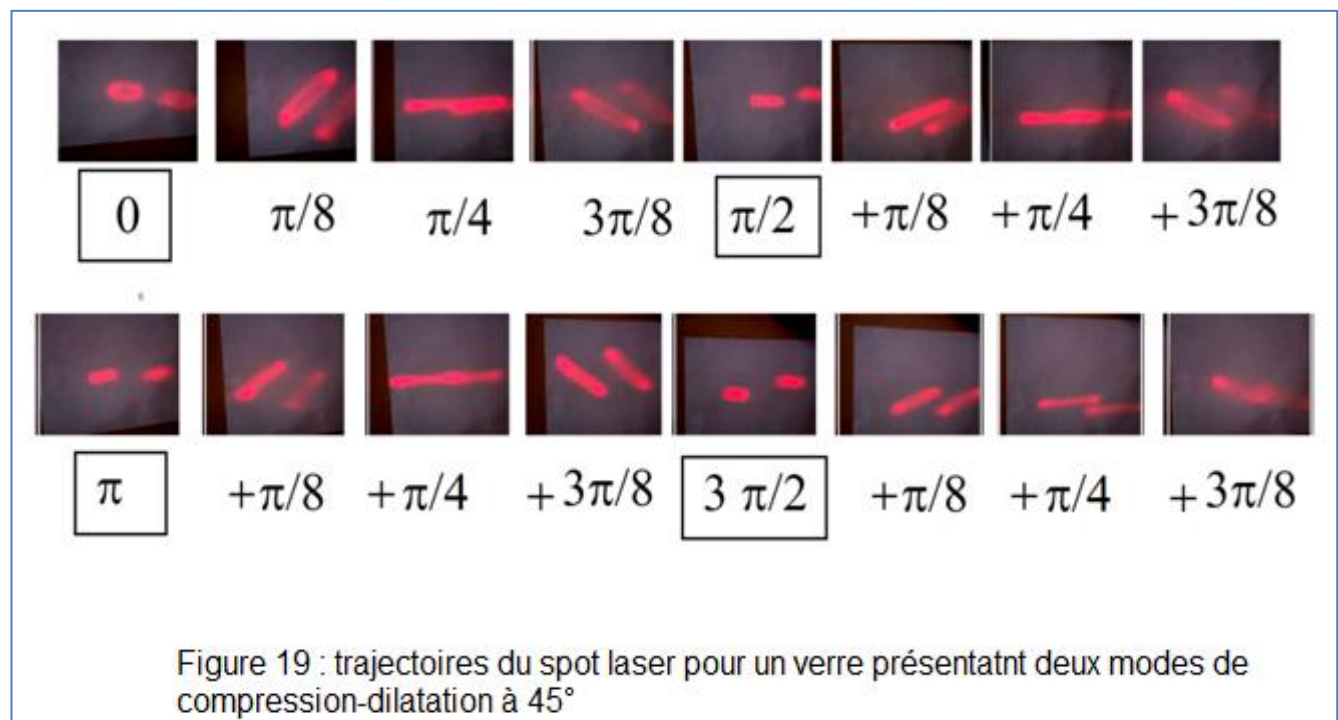
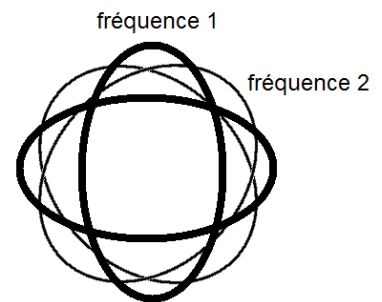


Lorsque le verre est en mode de compression-dilatation, lorsque le laser intercepte le bord comme en B, idéalement le spot laser se déplace comme en 2 puisque la tangente au bord pivote sous l'effet de la vibration. Dans les faits, le laser ne touche pas exactement les mêmes points du verre et on voit le plus souvent les motifs 3 (un peu ovales si l'orientation n'est pas parfaite.)

Dans le cas où le verre est en « mode tournant », on observe le motif 4.

Nous étions intrigués par le fait que souvent sur les signaux et les spectres apparaissaient deux fréquences de résonance. En en parlant aux professeurs Hilico et Cavatore tous deux ont suggéré l'existence de **deux modes de compression-dilatation à 45° l'un de l'autre**. Ceci était d'ailleurs mentionné dans la référence

Du coup nous avons essayé avec un verre présentant typiquement ce phénomène (verre N°22) Voici ce que nous avons observé pour l'une des fréquences de résonance (643,2 Hz) en régime forcé du verre (le verre se trouve à gauche des photos)



On constate que l'on a bien mis un mode de compression-dilatation d'amplitude importante (pour $\pi/4 + n\pi/2$), et un autre à 45° pour $n\pi/2$. Par ailleurs, pour l'autre fréquence de résonance (645,6 Hz) nous avons obtenu les mêmes motifs mais cette fois les orientations à « $n\pi/2$ » présentaient les débattements les plus importants ... et d'ailleurs le verre a cassé !

C'est alors que nous avons compris que

- ✓ L'orientation joue un rôle essentiel dans la mise en résonance du verre, et que c'est pour cette raison que nous avons fait tant d'essais infructueux (verre présenté de façon aléatoire)
- ✓ Probablement, le fait que le verre présente des axes préférentiels favorise l'établissement d'un mode de compression-dilatation, si l'orientation est correcte (un verre parfaitement de révolution serait défavorisé)
- ✓ Et enfin que somme toute nous avons en fait deux chances par verre.

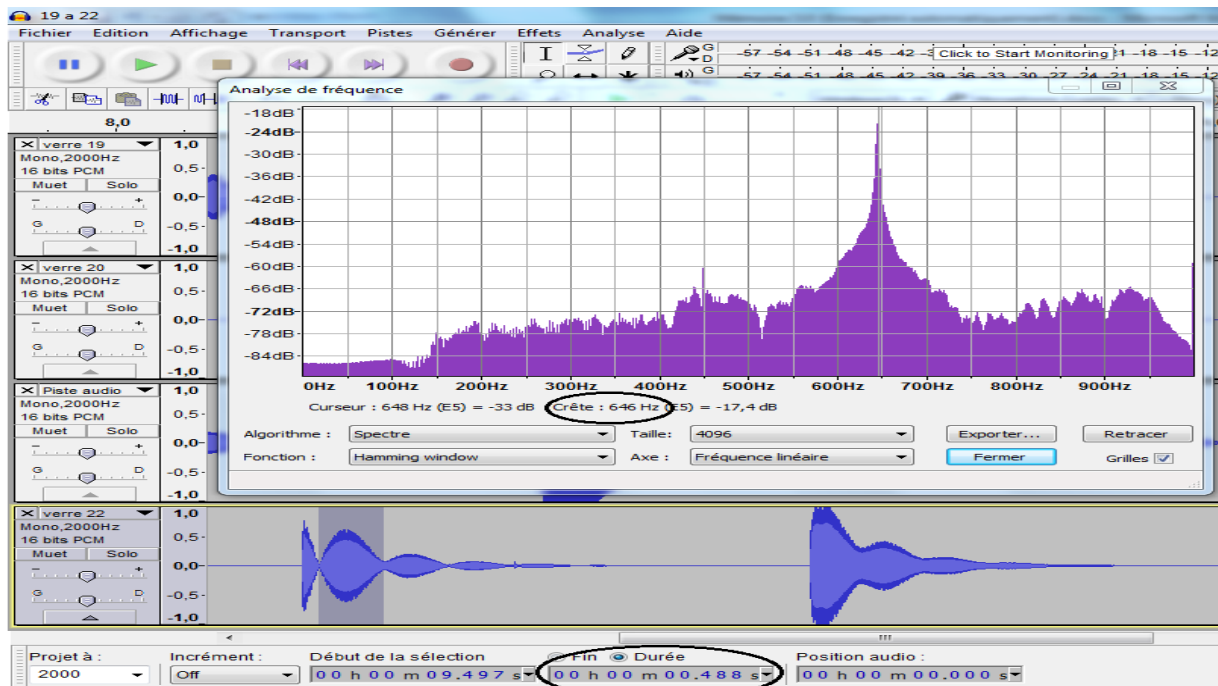


Fig 20 : audiogramme et spectre du verre 22. On remarque le pic en régime libre à 646 Hz et la présence d'une autre fréquence à 2Hz (bosse de modulation de durée 0,5s)

D4- Mesures et tests sur un échantillon de 22 verres

(ANNEXE 2)

Ayant déjà brisé une dizaine de verres lors des essais précédents, nous avons décidé d'entreprendre des tests systématiques sur l'intégralité des verres disponibles, soit un échantillon de 22 verres supplémentaires.

A la lumière de ce qui précède, nous avons compris qu'il fallait impérativement conserver un maximum d'informations sur les verres avant de les soumettre aux tests. C'est pourquoi pour chaque verre nous avons réalisé un audiogramme où le verre est frappé de la même façon au niveau du diamètre maximal, et ce en plusieurs endroits différents. (au moins 8)

Protocole suivi :

L'amplificateur étant réglé sur volume 3 (volume raisonnable pour lequel les ruptures sont régulièrement observées : niveau sonore 120dB au niveau du verre, volume 3 au niveau de l'amplificateur), le verre calé au niveau de la table de façon à pouvoir le pivoter (en principe) autour de son axe de révolution, nous avons présenté les verres un par un et cherché à optimiser la résonance, le cas échéant pour les deux fréquences en mode compression-dilatation.

Verre N°	Résultat du test
1	brisé
2	brisé
3	brisé
4	brisé
5	Intact
6	brisé
7	brisé
8	Intact
9	Intact
10	brisé
11	brisé
12	Intact
13	brisé
14	Intact
15	Intact
16	brisé
17	brisé
18	Intact
19	Intact
20	Intact
21	Intact
22	brisé

D5-Analyse des mesures

(ANNEXE 2) L'objectif de notre campagne était d'établir une corrélation entre les données (audiogrammes et spectrogrammes), nos observations, et les résultats obtenus, afin d'être capable d'identifier les meilleurs candidats à la rupture.

Critères de comparaison retenus :

- a) Existence de deux fréquences distinctes (d'au moins 2Hz) : non concluant d'après les audiogrammes et spectrogrammes. Par exemple les verres 1 et 19 ont des spectrogrammes très similaires
- b) Présence des deux modes en oscillations libres quelle que soit l'emplacement du verre
 Sur les exemples ci-dessous, on constate que le verre 14, suivant l'endroit où il est frappé, présente nettement l'un ou l'autre des modes de résonance, alors que le verre 13 présente toujours les deux. Ceci est probablement le signe d'un haut facteur de qualité (verre très sensible).

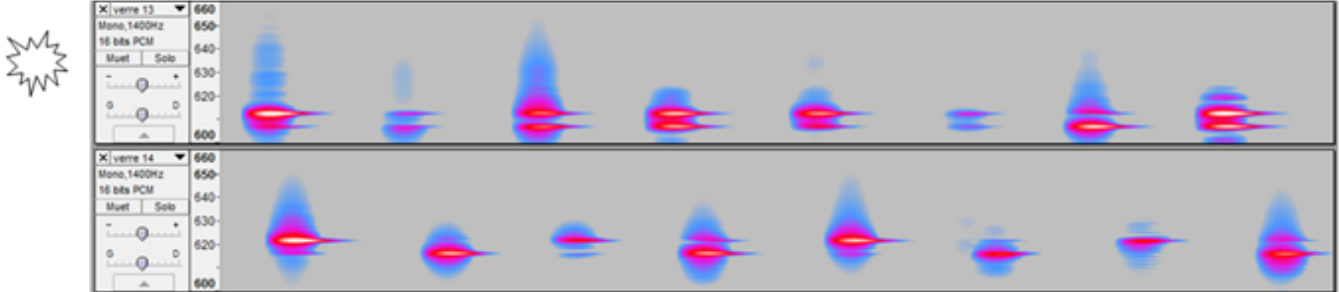
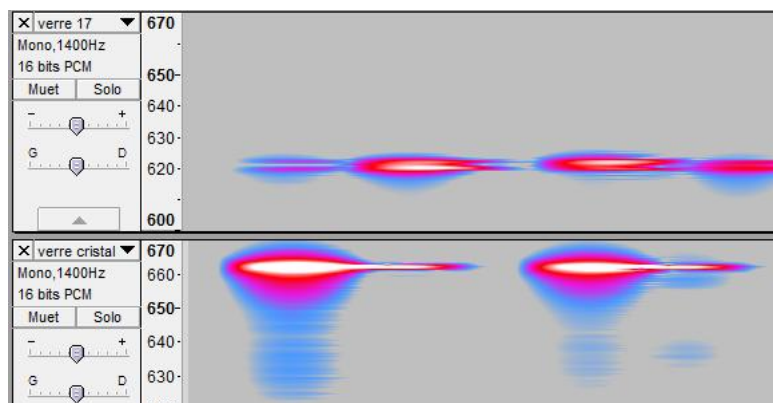


Fig 21 : spectrogrammes de deux verres présentant deux fréquences propres de compression-dilatation. Le verre 13 semble beaucoup plus sensible que le verre 14 (le verre résonne aux deux fréquences quel que soit l'endroit où il est frappé)

- c) Aspect et débattement du spot laser pendant l'excitation forcée :
 Tous les verres qui ont résisté au test présentent des « trajectoires ovales ou rondes » souvent très marquées, et demandent à être orientés très précisément pour que l'on arrive à obtenir le motif « droit » d'un mode de compression dilatation susceptible de provoquer la rupture. Ceci semble être donc un critère intéressant de sélection. Ce type de trajectoire signifie en effet qu'il est difficile de forcer le mode « compression-dilatation », et lorsqu'on le trouve, son amplitude est faible.
- d) Facteur de qualité
 Nous n'avons pas mesuré (par manque de temps, et puis cette étude ne se limite pas aux verres Ikea !) le facteur de qualité de chaque verre ; cependant nous avons pu remarquer que les verres qui résistent aux tests de rupture présentent des amplitudes de vibration plus faibles que les autres.
 On rappelle (annexe sur l'oscillateur harmonique en régime forcé) que l'amplitude maximale de l'oscillateur est de l à la résonance égale à Q fois l'amplitude de l'excitateur. Un faible débattement du spot laser est donc signe d'un faible facteur de qualité.
- e) Amplitude maximale du signal (audiogramme) : non concluant, même si sur la série 1-18 tous les verres intacts présentent des signaux un peu moins importants que les autres.

- f) Décroissance du signal (audiogramme ou spectrogramme) : non concluant entre verres Ikea, même si cela permet de faire un premier tri

(ci contre en haut un verre Hederlig, en bas un verre en cristal de très haute qualité).



E - Conclusion provisoire par rapport à la problématique

E1- Conclusions validées

Pour briser un verre avec du son il faut

- Une fréquence d'excitation proche d'environ **0,1 Hz** de la fréquence propre en régime forcé correspondant au mode de compression-dilatation favorisant la rupture
- Un niveau sonore suffisant
- Un verre de facteur de qualité très élevé (de l'ordre de 500)
- La quasi-totalité des verres n'étant pas réellement de révolution, un verre parfaitement orienté par rapport à l'excitation (et réciproquement) puisqu'il existe visiblement systématiquement des axes préférentiels pour le mode de compression-dilatation.

E2- Conclusions hypothétiques (à investiguer)

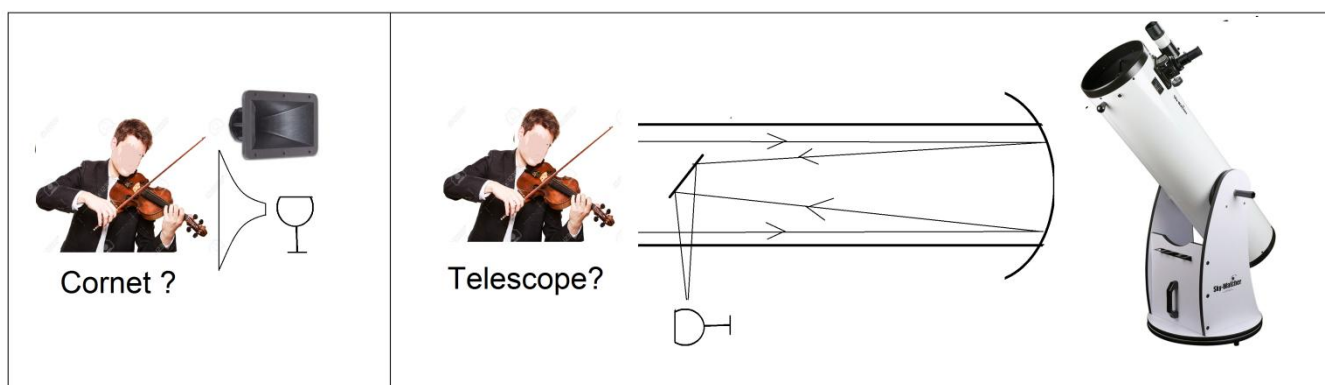
Parvenir à briser un verre avec du son est favorisé par un signal excitateur de faible largeur spectrale.

C'était visiblement notre cas puisque toute variation de fréquence de 0,1 Hz du GBF avait immédiatement une influence sur la réponse du verre.

F- Seconde partie du projet

Au vu des conclusions précédentes, voici les voies que nous nous proposons d'explorer d'ici à la finale nationale :

	Voix humaine Violon	Instrument à cordes amplifié (guitare ou mandoline électrique)	Trompette
Niveau sonore	Faible	OK	OK
Directivité de l'excitation	???	OK	OK
	Nécessité d'un système de guidage/focalisation du son : Cornet Télescope de Newton ?		
Fréquence ajustable à 0,1 Hz	Pas facile (il faudrait que le musicien ajuste précisément la fréquence et la tienne suffisamment longtemps jusqu'à la rupture, ou alors joue en tremolo pour balayer un intervalle de fréquences)	OK en modifiant l'accord de l'instrument ou en le jouant avec un bottleneck (barre de verre ou de métal posée sur les cordes)	Idem voix-violon
Largeur spectrale	(voix) dépend du chanteur Violon OK	OK a priori	OK a priori
Notre avis	Semble difficile à mettre en œuvre (surtout en fait pour les problèmes de directivité)	prometteur	Devrait fonctionner sur enregistrement (repris avec un logiciel de traitement du son), pas évident en direct



G - Bilan provisoire ; si c'était à refaire...

Le point positif de ce projet est que somme toute nous avons bien avancé dans la connaissance du phénomène et avons désormais bon espoir de le mener à terme.

En post scriptum nous avons pensé que cela intéresserait sans doute le jury de savoir quel bilan personnel nous tirons de cette expérience :

- nous avons longtemps pensé que notre système manquait de puissance et qu'il faudrait trouver des moyens de l'augmenter (cavité résonante type tube de Kundt ?) ou de mieux la guider ; ceci a un peu freiné notre progression en nous emmenant sur de fausses pistes alors que (20 casses sur 30 verres à volume 3) nous voyons bien que la puissance n'est pas un problème.
- Il est intéressant de constater que comme souvent en sciences les certitudes (en l'occurrence celle que les verres étaient de révolution) freinent considérablement la progression. C'est ainsi que pendant une longue période nous nous sommes interrogés sur la façon de parvenir à forcer tel ou tel mode de vibration sans jamais avoir l'idée pourtant toute simple de pivoter le verre !
- nous avons également perdu un certain temps à attendre des résultats de mesure du verre alors qu'ils n'étaient pas forcément très utiles
- nous aurions dû nous donner comme objectif de maîtriser par nous-mêmes un outil informatique de simulation des vibrations type SolidWorks ou Comsol.

Pour conclure, ce type de projet est enthousiasmant ; cependant lorsque l'on est élève de première et terminale , en particulier dans un établissement qui n'est pas ouvert le samedi ce n'est pas facile : les créneaux pour se voir sont très difficiles à trouver (après 18 h ou encore le plus souvent en lieu et place de la pause déjeuner). C'est pourquoi nous espérons qu'à l'avenir des plages communes dédiée aux projets de tous types soient intégrées dans notre emploi du temps !

H - Bibliographie

Articles scientifiques

- Concours Centrale-Supelec TSI 2018 : analyse expérimentale des vibrations du verre
- « Quand les verres chantent » (JM Courty et E Kierlik) Pour la Science, décembre 2018
- T. D. Rossing, Wine glasses, bell modes, and Lord Rayleigh, *The Physics Teacher*, vol. 28(9), pp. 582-585, 1990.

Physique générale

- Mathieu-Kastler-Fleury Dictionnaire de Physique Eyrolles
- <https://www.physique.unicaen.fr> : l'oscillateur harmonique en régime libre et forcé
- Michel Soutif Vibrations-Propagation-Diffusion (Dunod Université)

Documents vidéo

- Briser du verre avec du son <https://www.youtube.com/watch?v=ZDy8PWkMLnU>
- Olivier Robin et Jean-Philippe Regnard , Groupe d'acoustique de l'Université de Sherbrooke
- « Peut on casser un verre avec la voix » <https://www.youtube.com/watch?v=DP4wQmOGy5w>
- « On n'est pas que des Cobayes » avril 2018