



Mémoire final :

***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 sommes intéressés à la mise en résonance d'un objet de référence approvisionnementnable en quantité (verre Hederlig Ikea) et modélisable informatiquement, avec un système d'excitation dont nous contrôlons un maximum de paramètres. Cette première phase a permis de bien cerner les point cruciaux pour la suite de l'étude.*
- *Une seconde phase d'essais et de tests où nous avons cherché à briser un verre avec la voix.*

Sommaire

1 - Problématique	3
2- Le projet : répartition des rôles , réseau scientifique, jalons	3
3 – Partie théorique.....	4
Qu'est ce que le verre ?	4
Le phénomène de résonance : oscillateur en régime libre et forcé.....	6
Ondes stationnaires.....	7
4 – Les outils	8
Choix du verre.....	8
Le montage	8
5 -partie expérimentale (phase 1 / excitation par GBF)	9
Un verre se comporte-t-il comme un oscillateur amorti en régime sinusoïdal ?.....	9
Etude des déplacements du bord- Orientation des verres – Autre mesure du facteur de qualité.....	10
Comparaison des verres par mesure du facteur de qualité	12
Mesures et tests sur un échantillon de 22 verres	14
6– Partie expérimentale / phase 2 (excitation par voix humaine)	15
7 - Conclusion	17
8- Bibliographie.....	17

Annexe 1 : Outils d'analyse spectrale

Annexe 2 : 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)

Annexe 5 : Le son et ses grandeurs

Annexe 6 : Carte mentale (préparatoire) du projet

Annexe 7 – Simulations informatiques

' 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

1 - Problématique

Au moment de nous inscrire aux Olympiades de Physique, nous avons plusieurs idées mais savoir si oui, ou non, on peut briser des objets en chantant présentait l'avantage d'une problématique très claire. De plus le projet s'annonçait spectaculaire ; en même temps réalisable avec les moyens du bord ; et enfin passionnant d'un point de vue physique puisqu'il allait exiger de nous d'étudier de près les phénomènes de résonance.

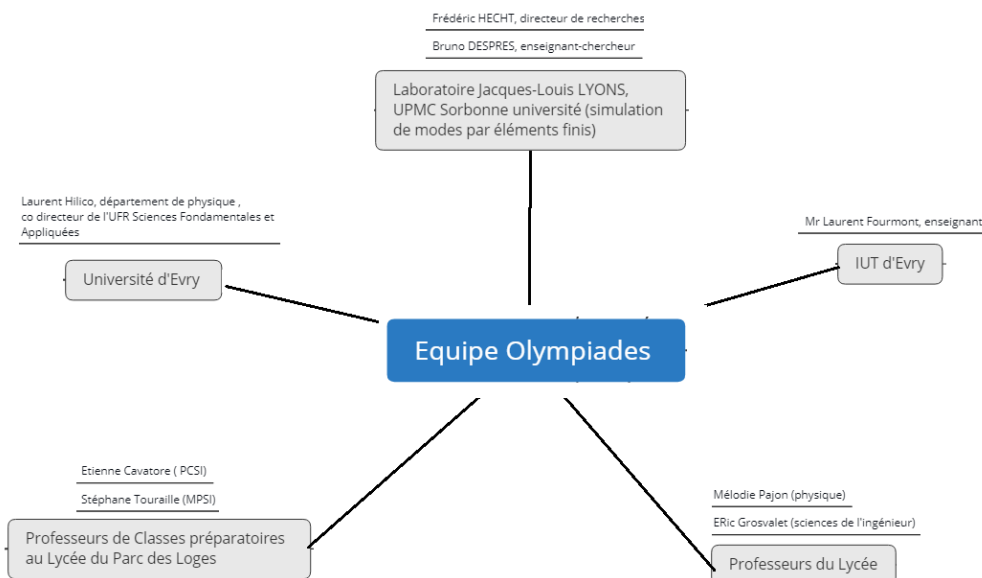
Notre projet s'est articulé en deux phases :

- Une première partie où nous nous sommes intéressés à la mise en résonance d'un objet-modèle déterminé (verre Hederlig Ikea) avec un système dont nous contrôlions tous les paramètres, avec pour objectif de développer nos connaissances et notre savoir faire. Cette partie a été présentée lors des sélections inter-académiques du concours.
- Une seconde phase d'essais et de tests consacrés à l'excitation des verres par la voix humaine.

2- Le projet : répartition des rôles , réseau scientifique, jalons

L'ensemble de l'équipe a travaillé ensemble la plupart du temps, chacun présentant des affinités particulières. Tout le monde a participé aux manipulations. Edouard et Timothée ont étudié de plus près les parties théoriques, Adel a fortement contribué à la rédaction du mémoire et Marion a joué le rôle de coordinatrice de l'équipe, avec une vue d'ensemble sur tous les aspects du projet.

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



3 – Partie théorique

Qu'est ce que le verre ?

Les verres fabriqués par l'homme sont principalement faits à base de silice (SiO_2). Mais la silice n'est pas incontournable ; un très grand nombre de matériaux, y compris des alliages métalliques (ex : verres blindés) et des substances organiques (molécules de carbone + hydrogène) peuvent donner du verre. On ne peut donc pas définir un verre par sa nature chimique.

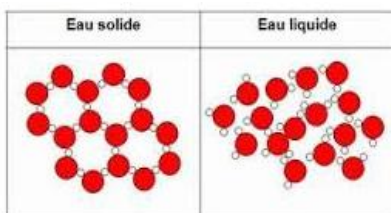
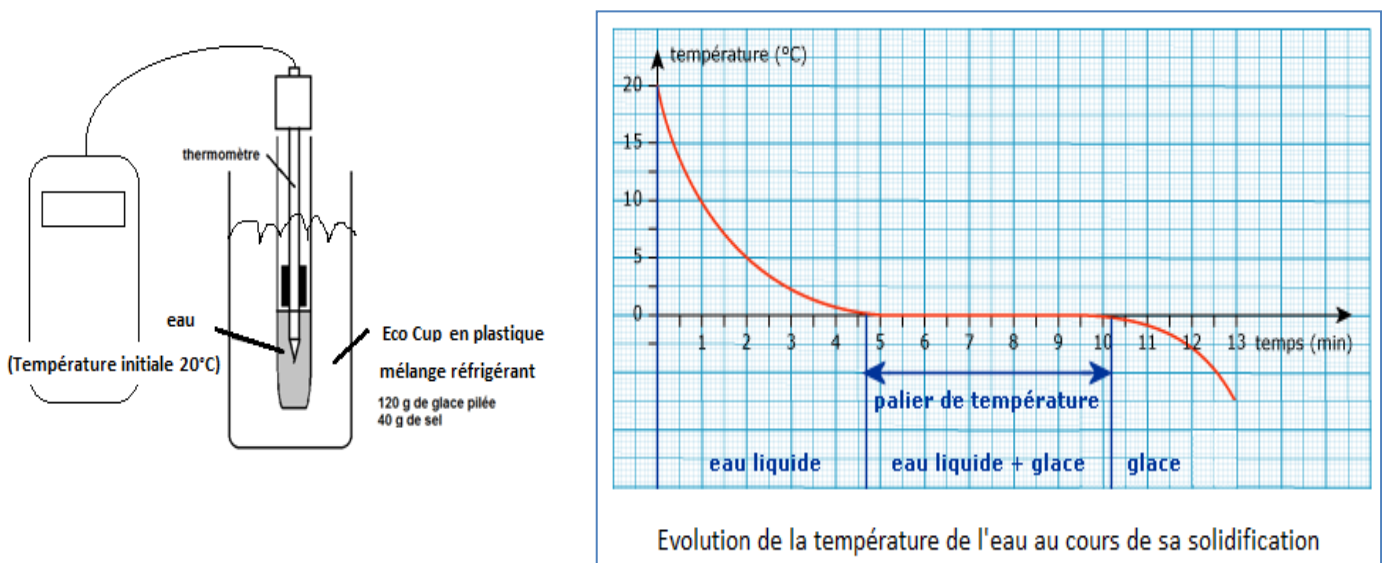
Les verres sont traditionnellement fabriqués par refroidissement d'un mélange en fusion ; mais là aussi ce n'est pas un procédé exclusif, car certains verres peuvent être fabriqués par dépôt de couches minces, par procédés « sol-gel », par irradiation de matériaux cristallins...

Alors, comment définir un « verre » ? Tous les verres ont en commun deux caractéristiques :

- **Aucun verre ne présente de périodicité dans l'organisation de ses atomes**
- **Tous les verres présentent un phénomène de « transition vitreuse »**

Pour comprendre cette notion, revenons sur une expérience faite en seconde lors de l'étude des transformations physiques de l'eau. (ci-dessous)

On place un tube à essai agité à la baguette) est, placé dans un mélange réfrigérant), la température descend, ce qui montre que le contenu du tube perd de l'énergie ; mais on observe au moment de la solidification un palier de température, signe que de l'énergie est cédée uniquement pour que l'eau dans le tube passe de l'état liquide à l'état solide. La quantité nécessaire (333 Joules par gramme) est « l'enthalpie de solidification de l'eau ».



En Terminale, nous apprenons que l'énergie interne d'un matériau est la somme de toutes les énergies cinétiques et potentielles de ses atomes.

L'existence d'une libération d'énergie au moment de la solidification montre qu'il existe une différence importante d'énergie interne entre un échantillon liquide et le même échantillon solide à la même température.

Si l'on veut faire fondre l'échantillon, il faudra cette fois apporter de l'énergie et on comprend que celle-ci correspond à l'énergie nécessaire pour briser les liaisons inter-moléculaires.

Le phénomène de transition vitreuse

Par ailleurs au cours de la même expérience, si on n'agit pas l'eau, on peut observer un phénomène de « surfusion » : l'eau reste liquide bien en dessous de 0°C , jusqu'au moment où une perturbation (vibration, choc) va déclencher une solidification immédiate. Cette eau surfondue est un « liquide super-froid ».

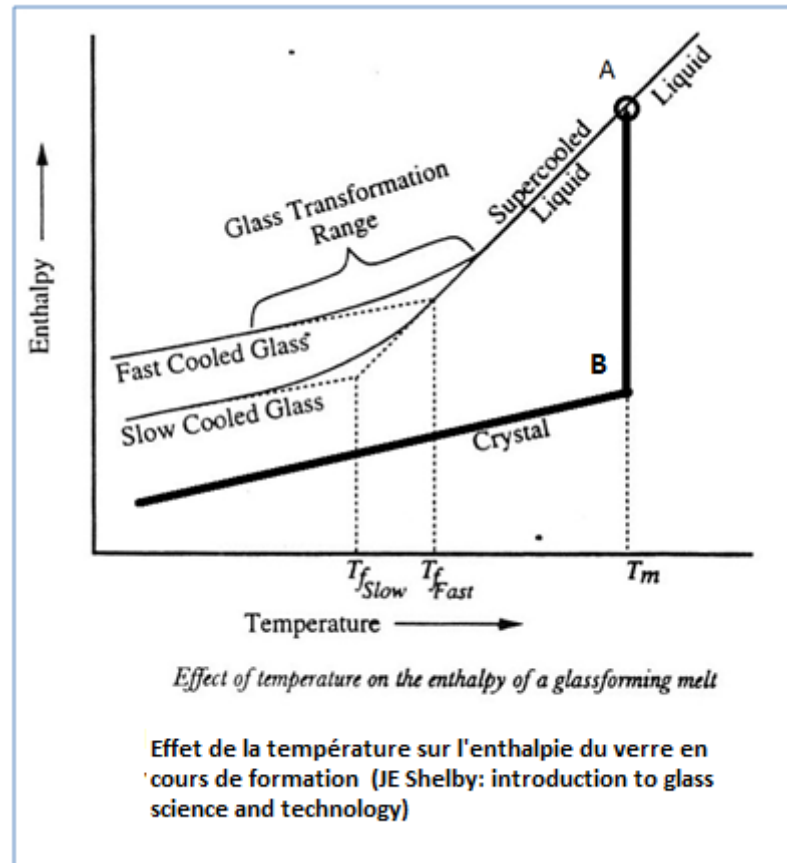
Sur la figure de droite, en gras nous voyons l'évolution de l'énergie interne (« l'enthalpie », mais à notre niveau nous ne ferons pas la distinction entre ces deux grandeurs) d'un matériau refroidi.

La plupart des matériaux suivent à partir du point A le segment en gras : à une température T_m , l'énergie interne chute brutalement quand l'échantillon passe de l'état liquide à l'état solide, avec organisation d'un cristal (structure atomique régulière) et libération de chaleur.

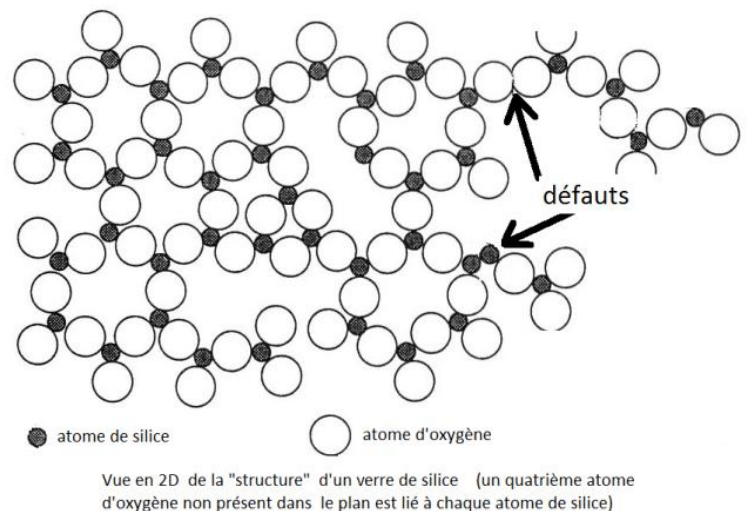
La différence d'énergie $H(A) - H(B)$ est cédée au milieu extérieur ; c'est l'enthalpie de solidification.

Mais pour les verres, à l'image de l'eau surfondue, la cristallisation ne commence pas au point A et on n'observe pas d'enthalpie de changement d'état ; **par contre la viscosité du mélange augmente, ce qui finit par bloquer toute possibilité de cristallisation ultérieure.**

C'est cela que l'on appelle « **transition vitreuse** » (« glass transformation range » sur la figure).



Il se forme bien des liaisons covalentes entre les atomes, comme dans les solides mais il n'existe aucune organisation régulière assimilable à un cristal. C'est cela que l'on appelle un « verre ». (à droite)



Que se passe-t-il quand le verre casse ?

Si l'on prend l'exemple du quartz de silice (cristal de silice), il est clair qu'il est beaucoup moins cassant que le verre, même si comme tous les cristaux il peut en revanche se cliver suivant certains plans.

Les liaisons covalentes sont des liaisons de haute énergie. Ce qui rend le verre plus fragile ce n'est pas son manque d'organisation mais surtout la présence de **défauts** (par exemple des liaisons Si-Si ou des liaisons peroxyde O-O, ou encore la présence d'impuretés).

Lorsque le verre est soumis à une contrainte ces défauts agissent comme des points de concentration de contraintes, et le verre se déchire (ou s'ouvre comme une fermeture-éclair) en passant par une suite de défauts.

C'est ainsi que nous avons obtenu lors des tests de rupture des cassures très diverses, allant du simple bout de bord qui saute à la destruction complète du récipient, en passant par des verres fendus en deux dans le sens de la hauteur, ou encore dont seulement le fond s'est brisé.

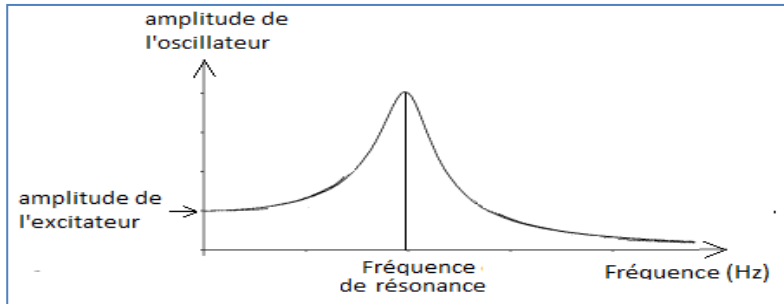
Le phénomène de résonance : oscillateur en régime libre et forcé

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 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 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 (et c'est bien sûr ce que nous chercherons à faire).

Considérons un oscillateur très simple peu amorti, par exemple une masse suspendue à un ressort. Livré à lui-même (« régime libre »), le système oscille à une fréquence précise, sa « fréquence propre ».

Si maintenant le système (via son point d'attache par exemple) est soumis à une excitation sinusoïdale externe (« régime forcé »), nous observerons typiquement la réponse suivante :



Observations :

- Il existe une fréquence précise pour laquelle le mouvement de l'oscillateur s'amplifie, souvent bien au-delà de l'amplitude de l'excitation elle-même. C'est la « fréquence de résonance ». Elle est souvent proche de la fréquence propre mais n'est égale à celle-ci que dans les cas d'amortissements extrêmement faibles.
- Pour des fréquences inférieures à la fréquence de résonance, en gros l'oscillateur suit l'excitation.
- Pour des fréquences très supérieures à la fréquence de résonance, l'oscillateur n'arrive plus à suivre l'excitation et son amplitude se réduit jusqu'à être nulle à hautes fréquences.

Le fait qu'à la résonance l'amplitude de l'oscillateur soit très supérieure à celle de l'excitation s'explique en faisant l'hypothèse que le système accumule de l'énergie. Pour cela il faut que l'excitateur apporte de l'énergie « au bon moment » à une fréquence particulière ; et bien sûr il faut que l'énergie dissipée par frottements pendant chaque cycle soit inférieure à l'énergie reçue à chaque impulsion.

C'est ce que nous chercherons à faire avec nos verres : parvenir à leur fournir de l'énergie à une fréquence telle que leur énergie mécanique augmente, se traduisant par des oscillations d'amplitude de plus en plus grande jusqu'à la rupture.

L'oscillateur amorti en régime libre et forcé

(Les démonstrations, classiques, ont été déplacées en annexe 3 ; leurs résultats seront repris dans l'étude expérimentale)

Pour nous familiariser avec les oscillateurs et la résonance, leurs équations et leurs paramètres notre professeur nous a proposé de commencer par une expérience très simple : une masse suspendue à un ressort oscillant sans frottements en régime libre et forcé (fig5)

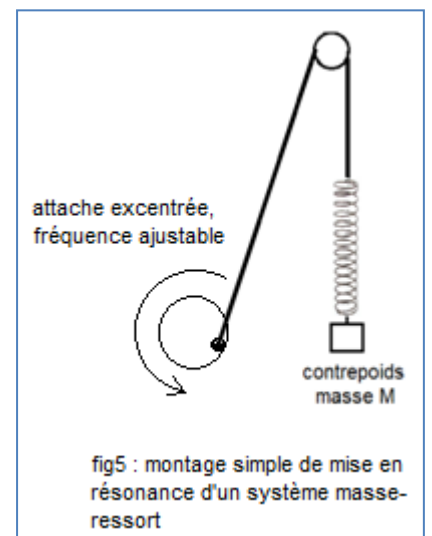
La masse valait 200g +/- 5g, et provoquait (système au repos) un allongement L du ressort de 60 +/- 4 mm.

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

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 prédit ainsi que la fréquence des oscillations, en situation de frottements très faibles, sera telle que

$$2\pi f = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ soit } f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$



Nous avons estimé k avec la même masse donc en fait $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{L}}$ d'où $f \approx 2,0$ Hz et $\frac{u(f)}{f} = 0,5 \frac{u(L)}{L} = 0,5 \times \frac{4}{60}$ soit $u(f) \approx 0,07$ Hz.

Donc $f = 2,0$ Hz $\pm 0,1$ Hz, et nous avons mesuré effectivement une fréquence propre de 2,1 Hz, et en régime forcé une forte résonance a été observée pour la même fréquence (la masse se décrochait régulièrement).

et c'est bien ce que nous avons observé. Ensuite en régime forcé (oscillations entretenues) nous avons effectivement observé une amplification du mouvement pour une fréquence également proche de 2Hz.

Ondes stationnaires

Lorsqu'un verre entre en résonance nous observons au stroboscope essentiellement les mouvements de bord ci-contre.

Celui de gauche peut s'interpréter qualitativement de deux manières :

- En régime forcé le haut parleur impose des « ventres » de vibration », qui eux-mêmes induisent la présence de « nœuds ». Le bord du verre se comporte un peu comme une corde tendue refermée sur elle-même. C'est pourquoi le professeur a jugé utile de nous familiariser avec le problème de la « Corde de Melde ».
- La seconde façon de se représenter les choses est de considérer qu'une période progressive se propage dans le bord du verre. Dans le mode que nous avons baptisé « compression-dilatation » une onde se propage dans le bord et sa longueur d'ondes (liée à la célérité de l'onde et la fréquence d'excitation) est telle que l'onde peut interférer constructivement avec elle-même ; en « mouvement tournant » cette condition n'est pas remplie.

Dans l'article de Rossing cité en bibliographie (figure de droite), on constate d'ailleurs que les modes de résonance sont nommés d'après le nombre de longueurs d'ondes qui prennent place sur un périmètre.

Pour nous familiariser avec les ondes stationnaires, nous avons donc réalisé l'expérience classique de la Corde de Melde dont les calculs (sauf le départ avec la seconde loi de Newton) nous sont accessibles.

(Les démonstrations, classiques, ont été déplacées en annexe 4 ; leurs résultats seront repris dans l'étude expérimentale)

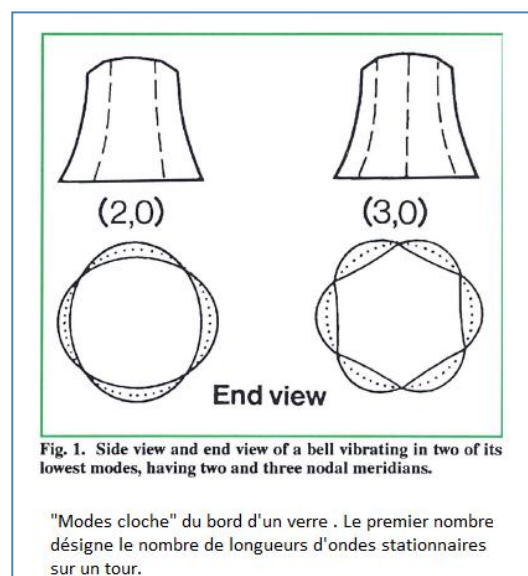
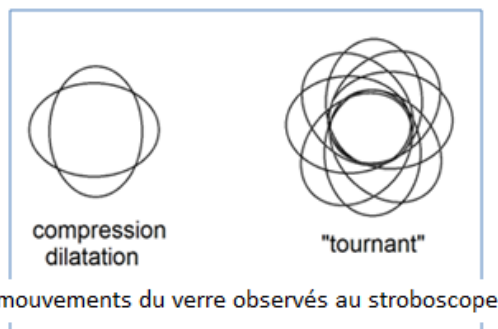
La masse de la corde était de 8 g pour une longueur totale $L = 1,3$ m.

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

$$F = nc/2L' \quad \text{avec} \quad c = \sqrt{\frac{T}{m}} \quad \text{soit ici} \quad \sqrt{\frac{0,400 \cdot 9,81}{0,008}} = 25 \text{ m/s}$$

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



4 – Les outils

Choix du verre

Afin de pouvoir effectuer des expériences comparatives, notre choix s'est porté sur un verre du commerce, facile à acheter en grandes quantités, le verre Hederlig de Ikea.

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

Sur les 30 verres achetés nous en avons brisé 24, donc notre choix était relativement pertinent. Mais en réalité le verre Hederlig est assez solide et nous aurions pu obtenir des casses beaucoup plus tôt avec d'autres modèles plus fragiles.

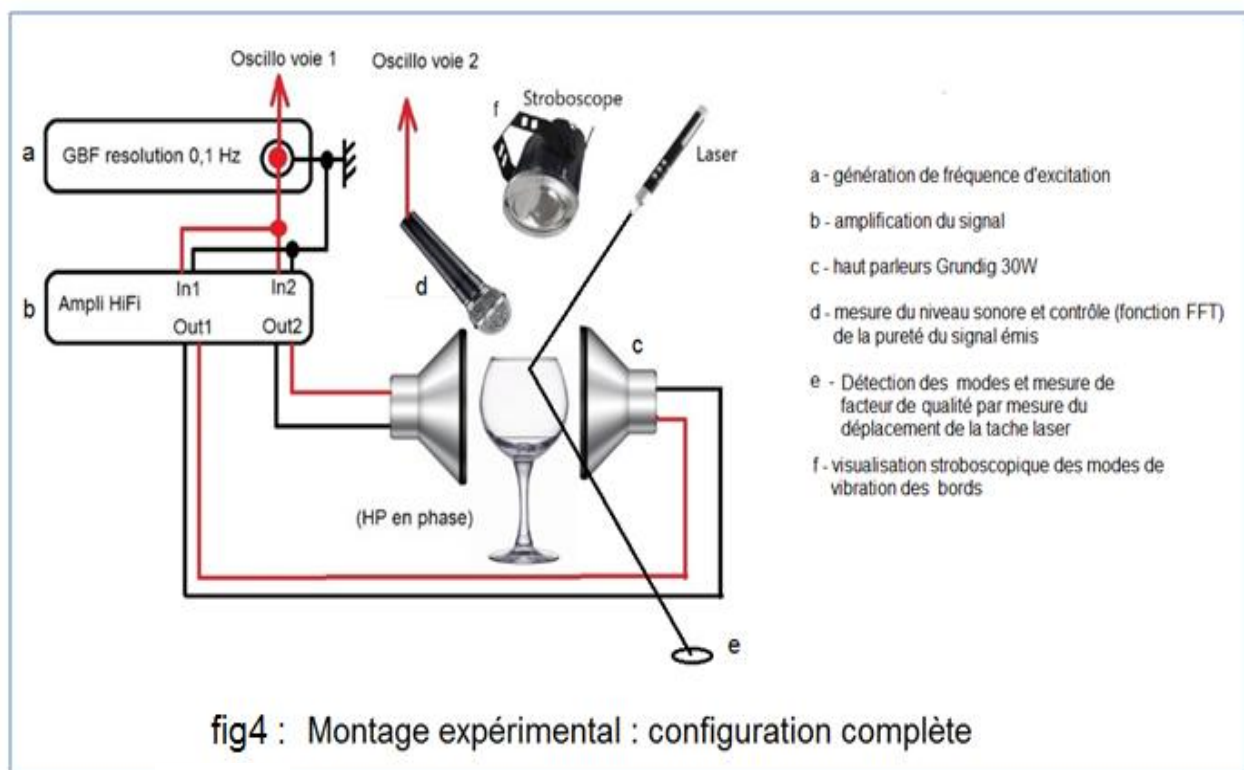
Il demeure que du coup, nous avons dû optimiser notre système au maximum pour atteindre nos objectifs, ce qui a permis d'élargir nos connaissances et notre savoir-faire.

Cependant pour la seconde phase (excitation par la voix) nous sommes passés à des modèles de forme similaire mais beaucoup moins résistants, et avons même approvisionné quatre verres en « cristal » (verre au plomb) faits à la main et ultra-légers.

Le montage

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 propres nous utilisons aussi l'appli « spectroïd » sous Android, très pratique.

Pour les manipulations et les tests de rupture, ci dessous un schéma de 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.



Méthodes d'analyse spectrale : voir Annexe 1

5 -partie expérimentale (phase 1 / excitation par GBF)

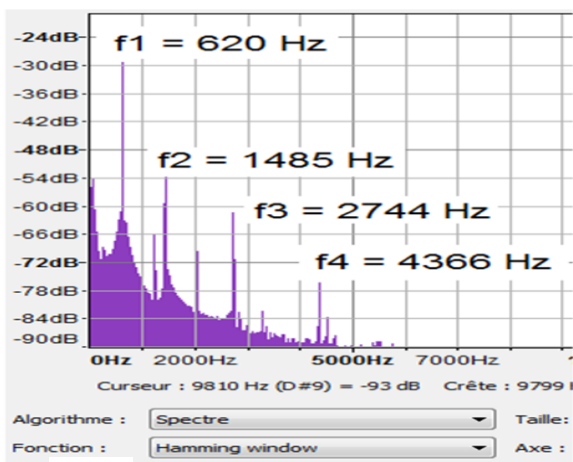
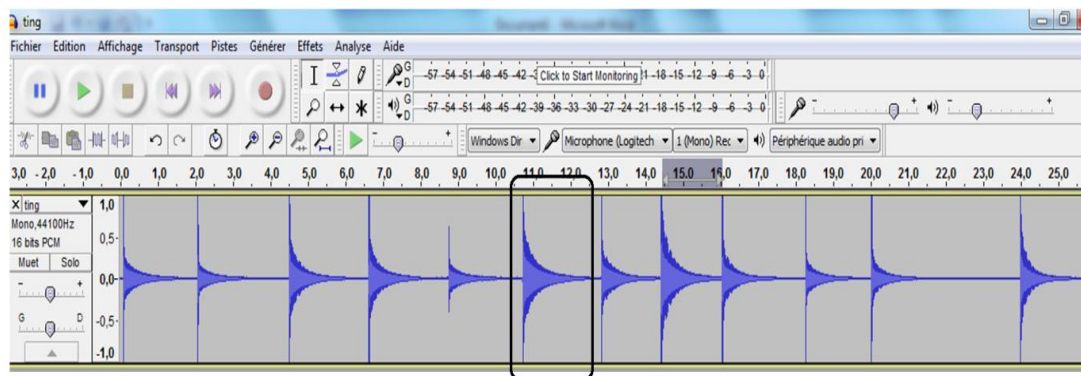
Dans cette partie, nous avons mis en œuvre les outils décrits pour répondre à des questions particulières et surtout faire évoluer nos connaissances et notre savoir-faire.

Un verre se comporte-t-il comme un oscillateur amorti en régime sinusoïdal ?

(expérience a été inspirée par le sujet Centrale-Supelec cité en référence).

Pour confirmer qu'un verre obéit à des lois proches de celles d'un oscillateur en régime sinusoïdal (libre et forcé), nous avons cherché à savoir si l'amplitude de vibration du verre est en régime libre une exponentielle décroissante, ce qui permettrait au passage d'évaluer son facteur de qualité.

Graphes obtenus (audacity)



spectre du signal entouré

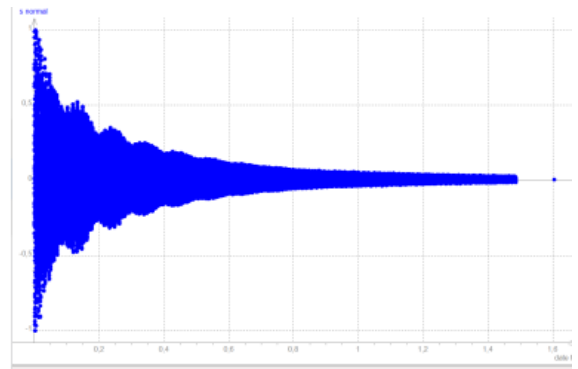


Fig8 : graphe s(t) exporté sous Regressi

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 $s(t) = A e^{-Bt}$.

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. Confirmé par la présence d'un léger battement sur le signal). En utilisant tout de même l'expression de la fonction exponentielle décroissante

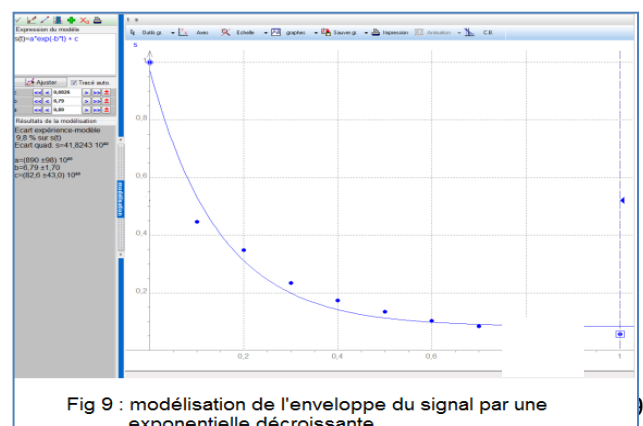


Fig 9 : modélisation de l'enveloppe du signal par une exponentielle décroissante

l'oscillateur amorti en régime libre (annexe 3) en première approximation

L'amplitude $A(t)$ des oscillations en régime libre contient un facteur exponentiel $e^{\frac{-\omega_0}{2Q}t}$

$$\text{Donc } \frac{A(t+nT)}{A(t)} = e^{\frac{-2\pi}{2Q}n} \quad \text{donc} \quad Q = \frac{n\pi}{\ln \frac{A(t+nT)}{A(t)}}$$

En faisant l'hypothèse que le facteur de qualité est grand, la fréquence propre en régime libre amorti (620Hz) est très proche de la fréquence propre en régime libre non amorti.

Or d'après le graphe précédent, au bout de 0,6s (soit $0,6 \times 620$ périodes) l'amplitude relative du signal chute de 1 à 0,1.

Par conséquent $Q = \frac{0,6 \times 620}{\ln \frac{1}{0,1}} \approx 500$ ce qui est un ordre de grandeur compatible avec nos autres estimations.

Etude des déplacements du bord- Orientation des verres – Autre mesure du facteur de qualité

Orienter correctement le verre : un paramètre crucial

Au départ nous pensions que seuls certains verres étaient capables, pour une raison inconnue, de vibrer correctement en mode « compression-dilatation » (2, 0). Nous partions du principe que les verres étaient nécessairement de révolution.

Nous plaçons donc plusieurs verres différents sans orientation particulière jusqu'à observer au stroboscope un mode satisfaisant, et ensuite nous optimisons la fréquence d'excitation.

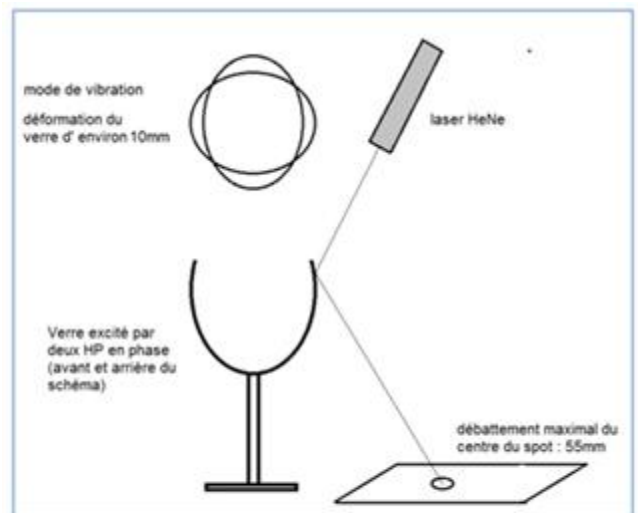
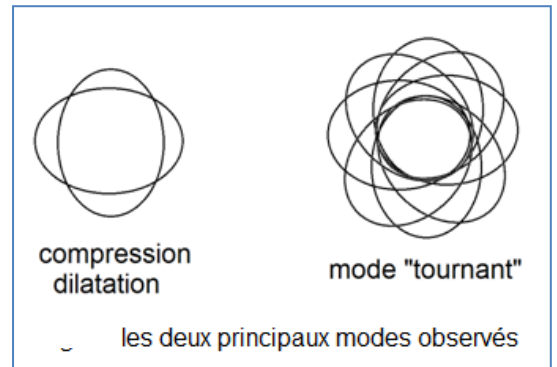
Même si rétrospectivement cela peut paraître étrange, nous nous sommes longtemps demandé comment faire pour favoriser le mode (2,0) ; il nous a fallu beaucoup de temps (et le hasard, comme cela arrive souvent en sciences) pour réaliser que l'on pouvait facilement « forcer » un mode ou l'autre en **pivotant le verre sur lui-même**.

Au départ, le professeur Hilico nous a suggéré de visualiser les déformations du bord du verre en utilisant un laser. Par ailleurs le professeur Cavatore nous a communiqué le sujet du concours des Mines cité dans la bibliographie, où la déformation du bord de verre est également mesurée à l'aide d'un laser, mais par une méthode interférométrique.

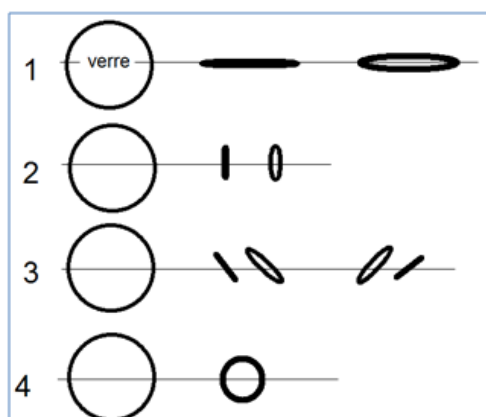
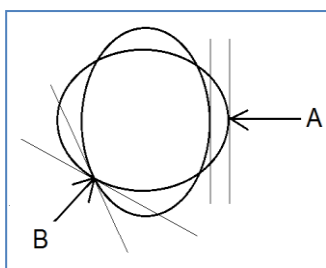
La méthode du P. Hilico était beaucoup plus simple ; nous avons alors modifié le montage comme décrit à droite.

Il faut noter que si le bord du 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 débattements du spot laser, 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 presque 10 cm !



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



Types de trajectoires observées de la tache laser

En utilisant le laser nous avons très rapidement observé, au départ par hasard, que lors de la mise en place l'orientation des verres changeait la trajectoire du spot, directement liée aux mouvements du bord.

En effet lorsque le verre est en mode de compression-dilatation (2,0) et que le laser intercepte le bord (par le haut) comme en A, le spot laser oscille sur un axe passant par le centre du pied. Si l'orientation n'est pas parfaite, sa trajectoire est légèrement ovale.

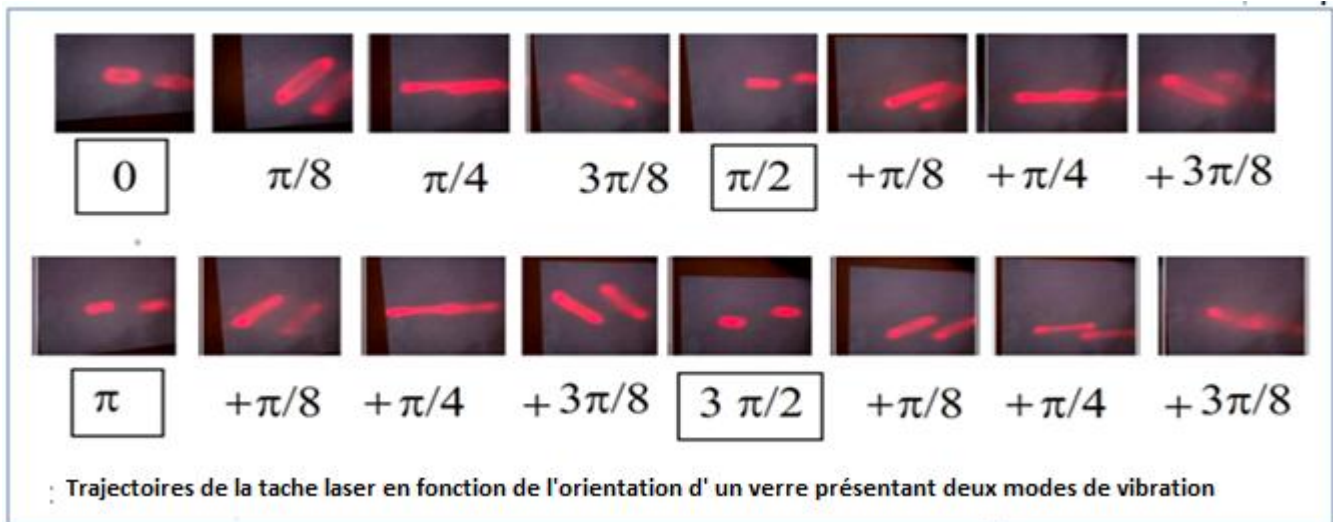
Lorsque le laser intercepte le bord comme en B (figure précédente), idéalement le spot laser se déplace comme en 2 puisque la tangente au bord pivote sous l'effet de la vibration. Dans les faits, le laser ne touche pas exactement les mêmes points du verre et on voit le plus souvent les motifs 3 (un peu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

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

Nous avons alors commencé à délaissé le stroboscope, mais à systématiquement utiliser le laser pour rechercher une trajectoire rectiligne du spot, dirigée vers le verre, typique d'un mode de compression-dilatation correct.

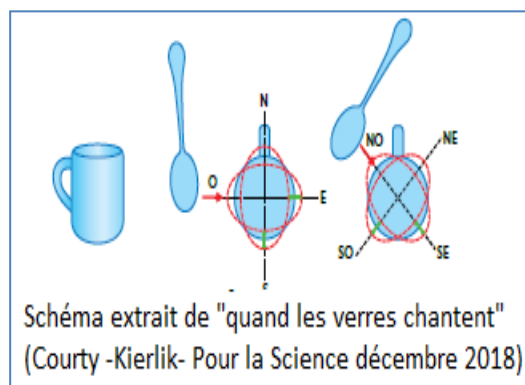
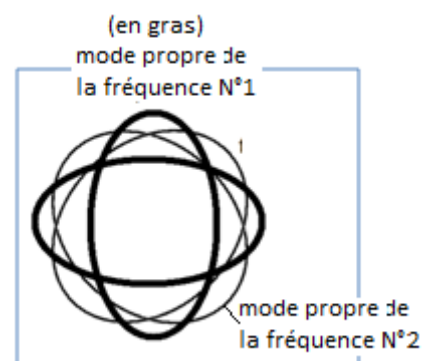
En parlant de ceci aux professeurs Hilico et Cavatore tous deux ont suggéré l'existence de **deux modes de compression-dilatation à 45° l'un de l'autre** et nous ont transmis l'article de Pour la Science cité en bibliographie, qui parle de ce phénomène pour des objets présentant un plan de symétrie.

Du coup nous avons excité en changeant son orientation un verre présentant typiquement ce phénomène (et 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)



On voit que pour les positions 0, $\pi/2$ etc... le mouvement du bord est plus faible. Mais il pouvait potentiellement être plus important en optimisant l'excitation avec une résolution de 0,1 Hz.

En ajustant l'orientation du verre de façon très fine, et en optimisant la fréquence de résonance chaque fois que la trajectoire était horizontale **nous avons alors eu la confirmation expérimentale que le plupart des verres présentaient effectivement deux orientations préférentielles à 45°**, l'une étant le plus souvent plus « favorable » que l'autre en termes de débattement. D'ailleurs le verre utilisé ci-dessus a cassé lors de la recherche de la fréquence optimale du second mode propre.



Evidemment nous avons été très intrigués par ce comportement. Dans l'article de Pour la Science c'est l'anse de la tasse de café qui est cause que l'objet présente un plan de symétrie.

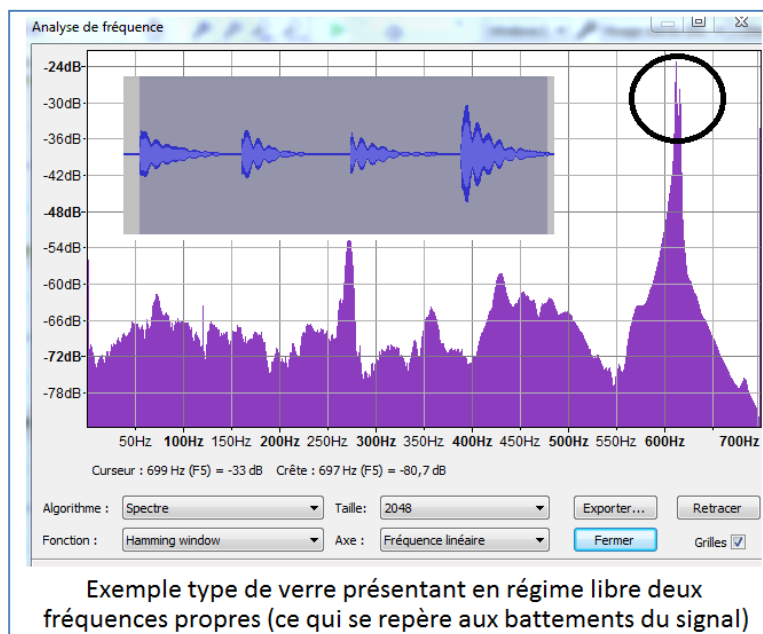
Dans notre cas ce sont probablement les défauts de révolution du verre lui-même (que l'on peut en définitive voir à l'œil nu, lorsque l'on pivote le verre en appui contre des cales).

La raison trouve probablement son origine dans le procédé de fabrication. Dans sa phase finale de moulage, le verre est enserré dans deux demi-moules. En principe ils sont parfaits mais au moment du démoulage le verre n'est pas encore parfaitement rigide. Peut être qu'il est légèrement étiré au moment où les moules s'ouvrent.

Ceci naturellement est à rapprocher du fait que nous avons dès l'origine remarqué que sur les signaux et les spectres apparaissaient deux fréquences propres . (à droite)

En conclusion

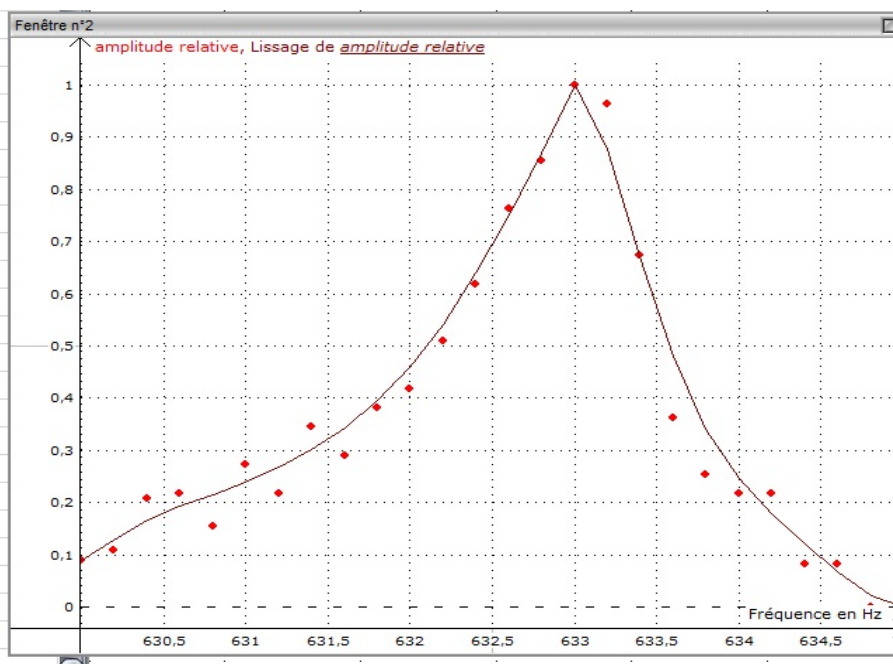
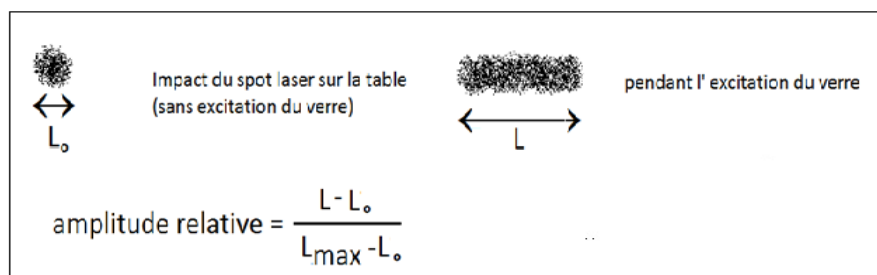
- L'orientation joue un rôle essentiel dans la mise en résonance du verre , et c'est pour cette raison que nous avons fait tant d'essais infructueux (verre présenté de façon aléatoire)
-
- Somme toute , nous avons deux « chances » par verre.(ou plutôt: si le verre ne casse pas à une fréquence, il faut impérativement essayer l'autre)



Comparaison des verres par mesure du facteur de qualité

Très rapidement nous avons compris que nous tenions désormais une méthode de mesure quantitative des réponses en fréquence des verres au voisinage de la résonance.

Fréquence Hz	Var	amplitude cc	amplitude r
630 Hz	23	5	90,909E-3
630,2 Hz	24	6	0,109
630,4 Hz	29,5	11,5	0,209
630,6 Hz	30	12	0,218
630,8 Hz	26,5	8,5	0,155
631 Hz	33	15	0,273
631,2 Hz	30	12	0,218
631,4 Hz	37	19	0,345
631,6 Hz	34	16	0,291
631,8 Hz	39	21	0,382
632 Hz	41	23	0,418
632,2 Hz	46	28	0,509
632,4 Hz	52	34	0,618
632,6 Hz	60	42	0,764
632,8 Hz	65	47	0,855
633 Hz	73	55	1
633,2 Hz	71	53	0,964
633,4 Hz	55	37	0,673
633,6 Hz	38	20	0,364
633,8 Hz	32	14	0,255
634 Hz	30	12	0,218
634,2 Hz	30	12	0,218
634,4 Hz	22,5	4,5	81,818E-3
634,6 Hz	22,5	4,5	81,818E-3
634,8 Hz	18	0	0
635 Hz	18	0	0



On constate qu'il est essentiel pour trouver la résonance maximale d'ajuster la fréquence de l'excitation avec une résolution de l'ordre de **0,1 Hz**.

Estimation du facteur de qualité (méthode « $\frac{f_{res}}{f_1-f_2}$ » cf annexe 3)

- D'après le graphe, le pic de résonance se trouve entre 633Hz et 633,2 Hz. La résolution de notre GBF étant de 0,1 Hz, nous estimerons l'incertitude sur la mesure de la fréquence de résonance à 0,2 Hz.
 - En supposant (faiblement probable au vu de nos observations) que le vrai maximum (en amplitude relative) soit aux alentours de 1,1 alors F1-F2, correspondant à l'amplitude relative $\frac{1,1}{\sqrt{2}}$ vaudrait 0,6 Hz.
- L'incertitude sur F1-F2 est donc de 0,1 Hz (c'est donc cela qui dégrade nos calculs)

➤ Comme $Q = \frac{f_{res}}{f_1-f_2}$, alors $\frac{u(Q)}{Q} = \sqrt{\left(\frac{u(f_{res})}{f_{res}}\right)^2 + \left(\frac{u(f_1-f_2)}{f_1-f_2}\right)^2}$

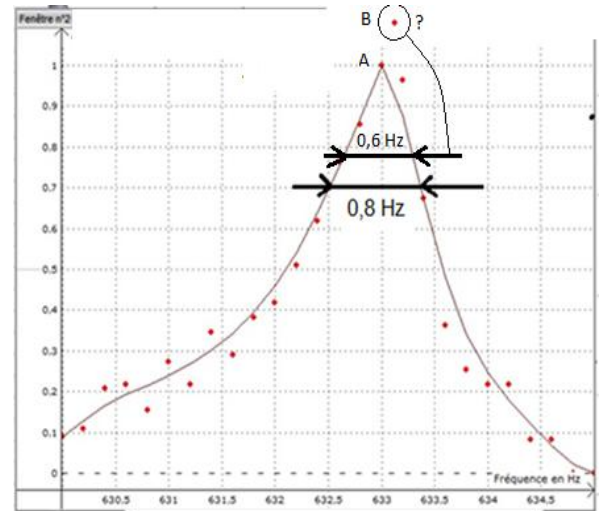
Application numérique $\frac{u(Q)}{Q} = \sqrt{\left(\frac{0,2}{633,1}\right)^2 + \left(\frac{0,1}{0,6}\right)^2} = 0,14 \approx 0.2$

Le quotient $Q = \frac{633,1}{0,7}$ vaut $9 \cdot 10^2$

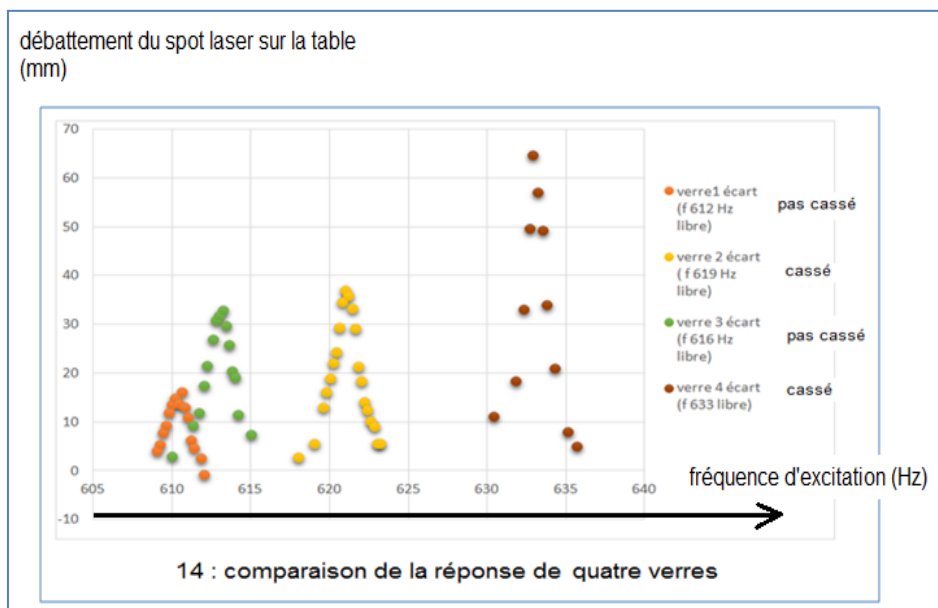
par conséquent $u(Q)$ vaut 200 environ

Conclusion : le facteur de qualité de notre verre est donc estimé à $Q = 900 \pm 200$.

Pour cette valeur (voir annexe 3) la ou les fréquences de résonance seront égales aux fréquences propres.

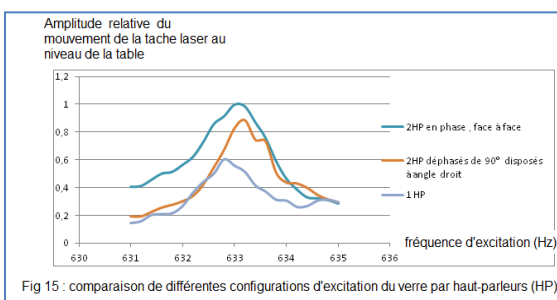


Avec cette méthode on dispose d'un moyen de comparer des verres identiques, comme par exemple ci-dessous où 4 verres ont été étudiés strictement dans les mêmes conditions:



A noter que

- Le verre « 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 « 2 » était le verre 11 de la série, qui a cassé
- Le verre « 3 » est le verre 5 de la série, que nous n'avons pas réussi à casser
- Le verre « 4 » a été cassé quasi-immédiatement.



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 à vis, émettant en phase :

Mesures et tests sur un échantillon de 22 verres

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.

L'objectif de cette campagne de tests était d'établir une corrélation entre les données (audiogrammes et spectrogrammes ANNEXE 2), nos observations, et les résultats obtenus, afin d'être si possibles capables d'identifier les meilleurs candidats à la rupture par une méthode non destructive.

A la lumière de ce qui précède, nous avons compris qu'il fallait avant tout 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 bord, 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 **110dB 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.

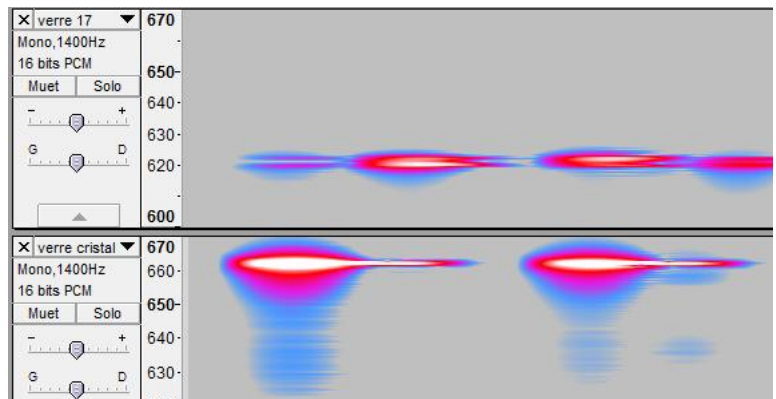
Sur les 22 verres, 13 ont cassé, ce qui fait que nous avons au total brisé 23 verres Hederlig sur 32 (2 sur 3)

En effectuant les manipulations et en étudiant les audiogrammes nous avons fait les observations suivantes :

- a) L'existence de deux fréquences distinctes (d'au moins 4Hz) semble favoriser la casse
- b) Trajectoire 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 susceptible (avec difficulté) de provoquer la rupture. Une explication possible (voir plus loin) est un phénomène de « couplage de modes ».
- c) Facteur de qualité : nous avons clairement remarqué que les verres qui résistent aux tests de rupture présentent des amplitudes de vibration à la fois beaucoup plus faibles que les autres et moins sensibles à la fréquence. (On rappelle que pour un oscillateur amorti en régime forcé, l'amplitude maximale du mouvement est à la résonance égale à Q fois l'amplitude de l'excitateur. Un faible débattement du spot laser à la fréquence de résonance est donc lié à un faible facteur de qualité.)

- d) Décroissance du signal (audiogramme ou spectrogramme) : non concluant entre verres similaires, mais critère très valable (peut être même le plus fiable et aisé) pour comparer deux types de verres différents :

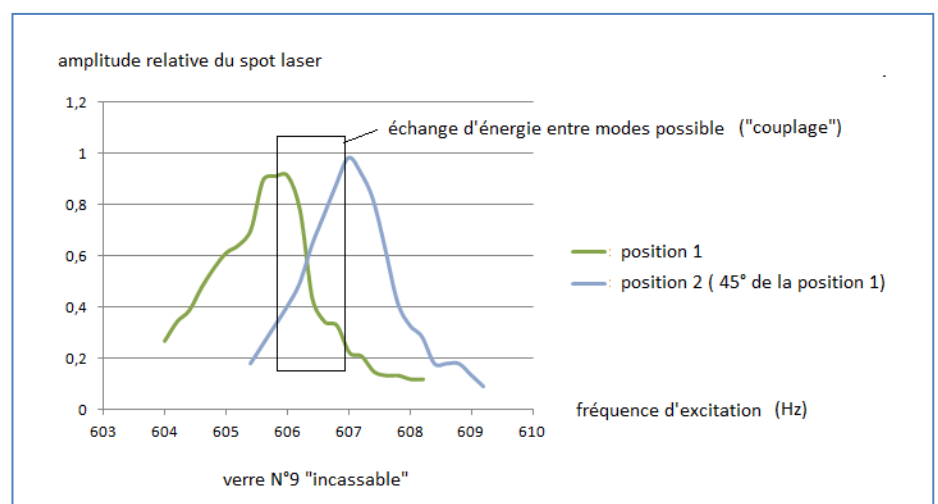
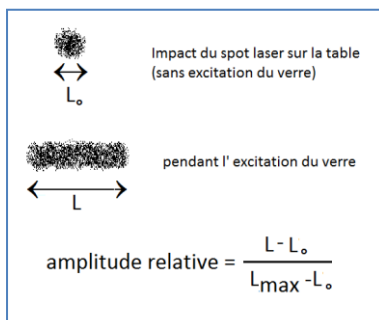
(ci contre en haut un verre Hederlig, en bas un verre en cristal de très haute qualité qui n'a fait aucune difficulté à se briser).



Pourquoi certains verres cassent-ils et d'autres non ?

Avant de répondre à cette question, voici deux expériences complémentaires que nous avons effectuées sur des verres « récalcitrants » (réponse en fréquence des verres N°9 et verre N°8)

Rappel



Observation : le verre 9 présente deux fréquences de résonance (605,8 et 607,2 Hz environ) . Mais les deux pics se recouvrent. **Il est donc possible et très probable qu'un mode excite l'autre (« couplages de modes »)** ce qui évidemment empêche le bord du verre d'avoir une amplitude importante car on a addition de deux ondes de fréquence différente.

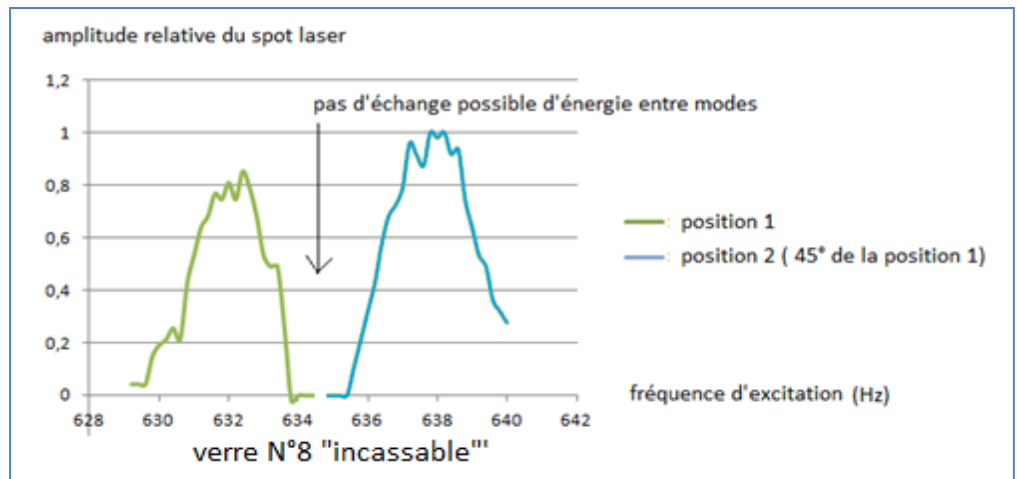
De fait le verre 9 présente des trajectoires laser ovales ou rondes ; il faut vraiment une orientation extrêmement précise pour arriver à isoler un mode (2,0) (comme cela a été fait pour effectuer cette mesure).

Cependant de nombreux verres brisés de notre campagne présentaient aussi deux fréquences proches. Donc plus précisément ce qui est en cause est le couplage de modes résultant de l'existence de deux fréquences très proches , **associée à un faible facteur de qualité** .

(par la méthode $Q = \frac{f_{\text{resonance}}}{f_2 - f_1}$ où f_1 et f_2 sont les fréquences pour lesquelles l'amplitude du mouvement = $\frac{\text{Amplitude maxi}}{\sqrt{2}}$)
 Q est de l'ordre de $\frac{600}{1,5} = 400$ pour chaque pic soit deux fois moins qu'un verre « sensible » (voir plus haut).

Autre mesure, avec le verre 8 :

Commentaire : Ce verre présente deux fréquences de résonance assez éloignées (632 et 638 Hz environ) . Le couplage de modes n'est pas possible (« l'éloignement » des fréquences est donc un facteur favorable) . Mais de même c'est le faible facteur de qualité qui est en cause . En effet par la méthode $Q = \frac{f_{\text{resonance}}}{f_2 - f_1}$ Q est visiblement de l'ordre de $\frac{600}{2} = 300$.



En conclusion, nos hypothèses pour expliquer pourquoi certains verres cassent et pas d'autres sont:

- Un faible facteur de qualité (trop de matière ou pas assez de défauts !)
- Des conditions autorisant le couplage de modes
- Et sûrement aussi, un verre « sans défauts » (en contenant très peu) .

6- Partie expérimentale / phase 2 (excitation par voix humaine)

Pour briser un verre avec du son il faut en résumé

- Une fréquence d'excitation proche d'environ **0,1 Hz** de la fréquence propre d'un mode de compression-dilatation favorisant la rupture
- Pas de couplage entre modes
- Un niveau sonore suffisant
- Un verre de facteur de qualité élevé (peu de matière)
- Un verre riche en défauts de structure
- Et enfin, puisque un très grand nombre de verres présentent une à deux orientations préférentielles pour l'excitation, un verre correctement orienté (et/ou une source sonore très directionnelle).

On comprend dans ces conditions qu'il doit être parfaitement possible de briser un verre à la voix, mais que le nombre de conditions requises simultanément rendent cet événement très peu probable.

Nous avons donc en conséquence et pour commencer approvisionné (enfin...) des verres beaucoup plus fragiles. (verres ballons vendus en grande distribution de 55 à 58 cl) .

Quant à l'excitation vocale, nous avons essayé deux méthodes différentes :

Méthode 1 : après estimation de la ou les fréquences propres du verre , nous enregistrons un échantillon sonore où **le chanteur chante dans un intervalle de fréquence très restreint contenant les fréquences propres** (demande pas mal d'oreille...)

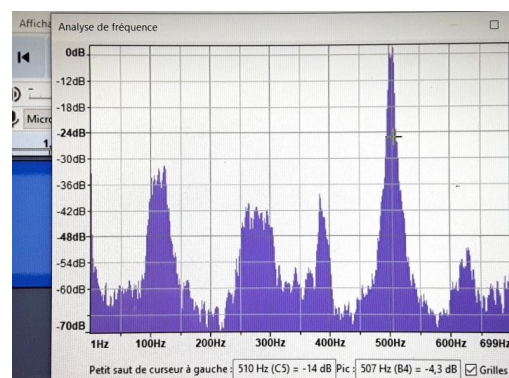
Méthode 2 : après estimation de la ou les fréquences propres du verre , **nous enregistrons un échantillon sonore où le chanteur chante une note de fréquence constante** (à la limite, quelconque) . Le fichier est ensuite converti en .wav et joué avec le logiciel Transcribe, logiciel d'écoute et d'analyse de fichiers musicaux avec lequel il est possible en temps réel (pendant la lecture) **d'ajuster la tonalité au centième de dièse près** (soit 0,06% de la fréquence , un dièse correspondant à un passage d'une hauteur F à une hauteur $F \times 2^{1/12}$ soit $F \times 1,05946$.)

Résultats de la méthode 1 :

(Marion + professeur ; test non enregistré en vidéo)

Verre Carrefour –Arques tulipe 58cL , fréquence propre 507 Hz .

- Le professeur (qui a une bonne oreille) a réalisé un échantillon sonore de 3 secondes en changeant progressivement (très légèrement) la tonalité . l'analyse avec Audacity a indiqué un spectre présentant un maximum d'émission compris entre 501Hz et 508 Hz.
- En excitant le verre avec l'échantillon joué en boucle le verre résonnait de multiples façons , si l'on en juge par les modes de déplacement du spot laser extrêmement divers . Toutefois une portion de l'échantillon sonore (+ verre correctement orienté) était favorable . **Sans sélectionner cette partie** mais en montant un peu le volume le verre a cassé au moment du passage correspondant à la bonne fréquence.



C'était la première voix que nous cassions un verre avec une voix. Il semble toutefois que nous avons eu beaucoup de chance car nous n'avons plus par la suite été capables de renouveler l'expérience .

Méthode 2 : (Edouard + Marion + Tim ; test enregistré en vidéo)

- Verre de grande distribution tulipe 58cL Les fréquences propres du verre ont été évaluées rapidement avec Spectroid à 480 et 486 Hz.
- Nous avons utilisé un échantillon sonore où Edouard maintenait pendant 2 secondes une fréquence de 475 Hz. Cet échantillon a été converti en fichier Wav , puis joué avec Transcribe.
- Pendant le test Tim ajustait/optimisait l'orientation du verre en interaction avec Edouard qui ajustait la fréquence avec l'outil de modification de tonalité.
- Une configuration {orientation-fréquence d'excitation} a été repérée pour une modification de tonalité de **+19**.
En montant un peu le volume le verre a cassé.
A 475 Hz, un centième de dièse correspond à une modification de fréquence de $(475 \times 1,05945 - 475)/100 = 0,282$ Hz
La fréquence d'excitation était donc de $475 + 19 \times 0,282 = 480,3$ Hz ce qui est parfaitement cohérent.

Ce type de test de rupture a été réalisé deux autres fois , et chaque fois avec succès . Nous espérons donc être en mesure d'en faire la démonstration au jury .

7 - Conclusion

Peut-on briser un verre avec une voix humaine ? Certainement, même si le nombre de conditions requises simultanément rendent cet événement très peu probable. Mais nous avons montré que c'était possible. Pour y parvenir avec une voix nue il faudra disposer d'un verre en cristal de haut facteur de qualité, dont les axes préférentiels d'excitation auront été convenablement repérés, à une fréquence pas plus éloignée que 0,2 Hz de la fréquence de résonance, et suffisamment près pour garantir une excitation directive et un apport d'énergie par cycle supérieur aux dissipations internes. Mais nous essayons...

Sinon, ce projet a été pour nous une expérience d'un grand intérêt. D'abord pour son côté scientifique : nous avons étudié des notions pas ou peu abordées à notre niveau et découvert des phénomènes dont nous n'imaginions pas l'existence. Voir un verre se contorsionner selon notre volonté est très impressionnant, bien que nous nous y sommes habitués après plus d'un an ! Réussir à briser un verre grâce à du son généré et amplifié dans notre montage, puis arriver à répéter le processus à notre guise est assez époustouflant pour nous !

Ces réussites successives nous ont permis de prendre confiance en notre projet, et de tenter d'améliorer au mieux notre démarche. Certaines découvertes tardives ont aussi permis de nous motiver à continuer nos expériences et à mieux les comprendre. Le passage du son généré à un enregistrement vocal était crucial dans notre projet, étant son objectif principal.

Ce projet a aussi été source d'un enrichissement personnel pour chacun d'entre nous. Il nous a permis d'effectuer un travail de groupe en adoptant une démarche scientifique. Nous avons pu effleurer et nous intéresser au domaine de la recherche scientifique. Partager notre projet au sein de notre établissement, ainsi qu'avec les autres équipes participantes notamment lors des qualifications fut très formateur, et nous a introduit aux nombreux domaines que la recherche et l'étude scientifique peuvent aborder.

Bien que les Olympiades de Physique restent un concours, nous considérons avoir déjà gagné de nombreuses choses, autant sous l'aspect des connaissances et de l'expérience de vie en menant à bout notre projet.

Nous sommes extrêmement fiers d'avoir été invités à la phase finale. Merci de tout cœur aux organisateurs de ce bel événement et à tous ceux qui le rendent possible.

Adel, Edouard, Marion, Tim

8- Bibliographie

Articles scientifiques

- Introduction to Glass Science and Technology / James E. Shelby, RSC Paperbacks 1997
- Concours Centrale-Supelec TSI 2018 (énoncé et corrigé) : 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

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

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>