Collège et Lycée Maxence VAN DER MEERSCH

Le verre à moitié plein

Élèves de première générale participants au projet :

COCHETEUX Arthur

DEMASSIEUX Juline

MANOURY Corenthin

JOLY Basile

HUYS Thomas

Professeur gérant le projet : Mme Gronlier Sophie

Avec l'aide de Holger Vach (école Polytechnique de Paris)

CONCOURS Collège Lycée CGÉNIAL

Sciences à l'École

FONDATION CGENIAL

Table des matières

I. Introduction 2
II. Un peu d'histoire 2
III. Production d'un son par un verre à pied 4
a) Constitution d'un verre 4
b) Frappé versus frotté 4
c) Estimation de l'influence du rayon du buvant 6
IV. Conception d'un dispositif excitateur 8
a) Premier dispositif expérimental 8
b) Amélioration du dispositif 9
V. Effet e la technique de jeu 9
a) Effet de la vitesse de rotation 10
b) Effet de la force exercée par le doigt 11
c) Conclusion : la puissance ménanique exercée 12
VI. Accordage par ajout d'eau 13
a) Première approche : ajout de volumes constants 13
b) Correction : influence de la hauteur de liquide 13
c) Le verre à moitié plein : dehors ou dedans ? 16
VII. Conclusion et perspectives 18
VIII. Bibliographie et webographie 18
ANNEXE 1 : Vocabulaire 19
ANNEXE 2 : fréquences des notes de musique 19
ANNEXE 3 : Programmes Arduino 20
ANNEXE 4 : Le niveau sonore acoustique/digitale 22

I. Introduction

Lorsque que vous trinquez pour un engagement, un hommage, des retrouvailles ou encore une fête, vous-êtes-vous déjà demandés, d'où vient ce son que vos verres produisent en se touchant ? Et pourquoi un doigt en rotation sur son bord maintient le son produit ?

Nous constatons aussi que le son est modifié par la présence de liquide. Est-ce que cela provient du fait que le volume de caisse de résonance est affecté ?

C'est parce que nous nous sommes posés beaucoup de questions à propos d'un simple verre que nous avons créé le projet "Le verre à moitié plein", constitué de nos plus talentueux scientifiques : Cocheteux Arthur, Demassieux Juline et Manoury Corenthin, aidés par Joly Basile et Huys Thomas, accompagnés de la plus grande physicienne au monde Mme Gronlier Sophie.

Dans un premier temps, nous avons commencé par nous poser tout un tas de questions du type : "Est-ce que la fréquence change selon la taille du verre, son volume, sa matière ou sa forme, son contenu (eau ou vin ?). Y-a-t 'il une vitesse de rotation du doigt idéale ?" ; mais aussi "Comment pouvons-nous isoler chacun des paramètres ?" Nous avons cherché les possibilités de répondre à ces questions, en utilisant du matériel adapté, des méthodes de calculs complexes ou simples, diverses hypothèses et pas mal de notre temps.

Enfin, nous nous sommes mis au travail, nous avons réalisé une multitude de tests, qui parfois nous ont surpris et bien servi par la suite, et d'autres que nous n'avons pas pu exploiter, mais jamais nous ne nous sommes découragés.

II. Un peu d'histoire

Le vérillon est un instrument de musique de la famille des idiophones, c'est à dire que le son est produit par le matériau de l'instrument lui-même. Il est composé de plusieurs verres, généralement des verres à vin, disposés sur une table et accordés par remplissage de différentes quantités d'eau. Différents verres et niveaux d'eau permettent d'obtenir une gamme.

Figure 1: Verrillon https://www.rjb.ch/Format-A3/Les-instruments-insolites.html

Cet instrument s'appelle également : verres musicaux, verres chantants, orgue des anges, séraphin, harpe de verre... Comment en joue-t-on ? Simplement par la friction sur le buvant avec un doigt mouillé.

L'histoire de cet instrument débute en Asie, (Chine au XIIe siècle, XIVe à Perse) avec le mode de percussion sur les verres suspendus et/ou sur table, avant qu'il ne soit introduit en Europe, avec le mode friction, connaissant une grande vogue au XVIIIe siècle.

En 1492, une illustration du théoricien musical italien Franchino Gafori (1451-1522) représente Pythagore (v.-580 - v.-495) expérimentant avec divers instruments de musique, dont un verrillon de six verres et un carillon de six cloches, ce qui suggère que le mot verrillon pourrait être la contraction de verre et de carillon. On notera les indications quantitatives concernant la taille des cloches et les volumes d'eau. Il s'agit toujours des nombres 4, 6, 8, 9, 12 et 16, révélant un lien intime entre des nombres entiers très simples et des accords musicaux harmonieux.

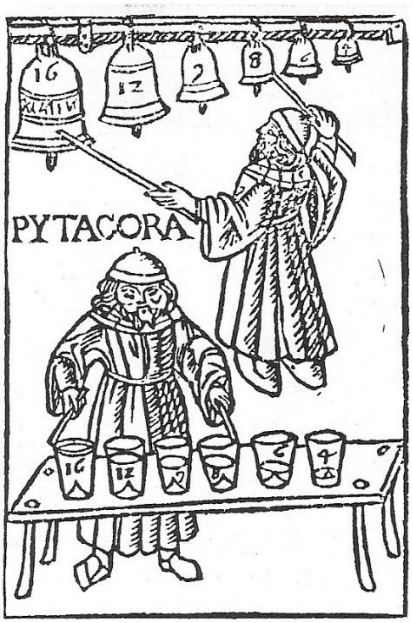


Figure 2: Illustration par Franchino Gafori représentant le verrillon dans Theorica musicae, Milan, 1492

En 1741, Richard Pockrich (IRLANDAIS) se fait reconnaitre comme le premier virtuose du vérillon, qu'il appelle orgue des anges.

Figure 3: Vérillon deRichardPockrich https://www.museum.ie

En 1746 à Londres, le compositeur Christoph Willibald Gluck exécute triomphalement son concerto pour verrillon (26 verres accordés avec de l'eau) et orchestre et affirme "pouvoir jouer tout ce qui se joue au violon ou au clavecin sur des verres musicaux, et ainsi parvenir à contenter les curieux aussi bien que les mélomanes".

Wolfgang Amadeus Mozart à comme nom de naissance Joannes Chrysostomus Wolfgangus Theophilus Mozart né le 27 janvier 1756 à Salzbourg qui est une ville autrichienne. Il est mort le 5 décembre 1791 à Vienne à l'âge de 35ans. Mozart c'est l'un des plus grands compositeurs de l'histoire de la musique européenne. Il a écrit dans tous les genres musicaux de son époque et a excellé dans chacun d'eux. On reconnaît généralement qu'il a porté à un point de perfection le concerto, la symphonie et la sonate, qui devinrent après lui les principales formes de la musique classique, et qu'il fut l'un des plus grands maitres de l'opéra.

L'adagio en DO majeur avec son harmonica en verre est une œuvre écrite par Mozart en 1791 à Vienne. Il s'agit de la dernière d'une série de cinq œuvres écrites pour des instruments peu usités (orgue mécanique, harmonica de verre). Dans la vidéo, à 0.11 secondes nous avons un aperçu sur l'harmonica en verre où nous voyons des verres imbriqués entre eux pour un fonctionnement comme un piano.

Adagio de Mozart

Il semblerait que l'instrument ait été interdit par la police vers 1835 : la légende dit qu'il rendait fous ses interprètes ! On pense que cela était lié au plomb contenu dans la peinture noire appliquée sur certains verres pour repérer les touches noires. Au bout de 15 ou 20 ans de pratiques, les musiciens finissaient donc par s'empoisonner. Puis, l'instrument a disparu, devant la taille des salles et des orchestres qui croissaient (ce n'est pas un instrument très sonore).

Le verre a refait son apparition de nos jours dans l'œuvre « Stars » d'Eriks Esenvalds, un compositeur Letton de renom qui mêle voix et son de verres pour un effet cosmique.

Stars d'Esenvalds

III. Production d'un son par un verre à pied

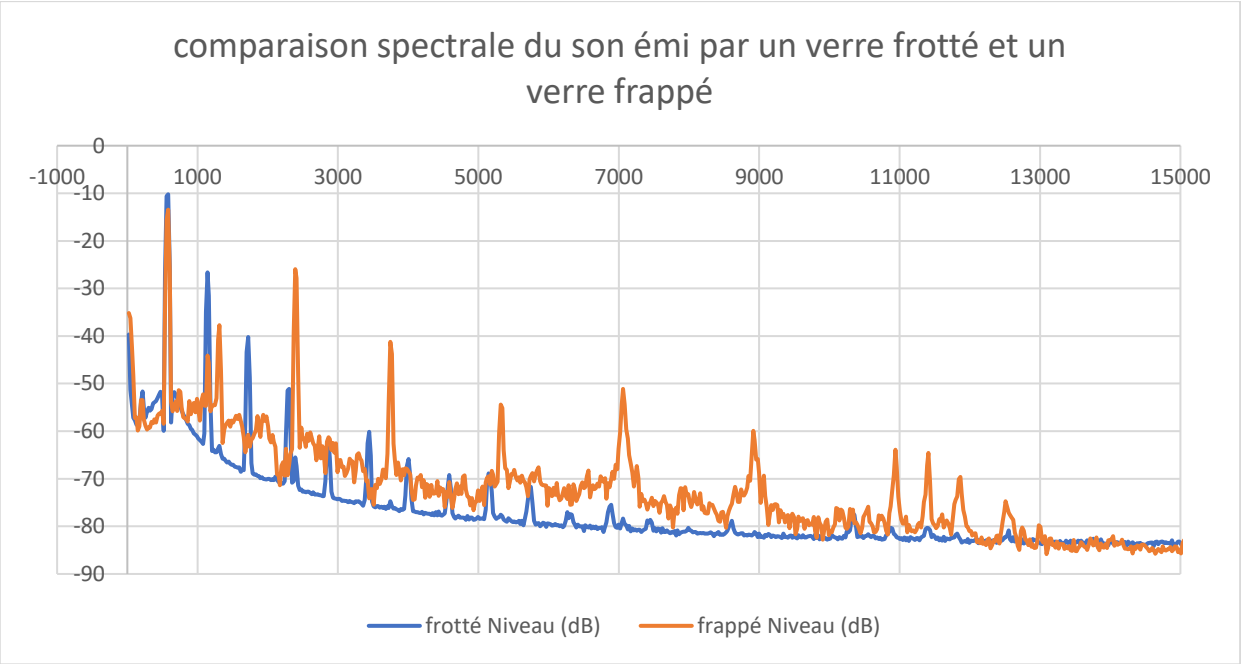
a) Constitution d'un verre

Un verre à pied est constitué de huit parties qui sont :

Figure 4: image provenant de https://www.d-vine.com/le-guide-de-la-verrerie-anatomie-et-parties-du-verre-a-vin/

b) Frappé versus frotté

En enregistrant le son produit par le même verre lorsqu'il est frappé ou frotté, on constate que l'on obtient la même note jouée définie par la fréquence fondamentale de $572 \pm 2\ Hz$ alors que l'excitation n'est pas la même.



On note cependant que le timbre sera bien différent, ce qui se révèle par les spectres obtenus qui ne se superposent pas.

<u>Cas du verre frotté</u>

Fréquences (Hz)	572	1145	1717	2294	2859	3442	3999	4584
f/f1	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0

<u>Cas du verre frappé</u>

Fréquences (Hz)	574	1147	1306	2399	3754	5329	7165	8971
f/f1	1,0	2,0	2,3	4,2	6,6	9,3	12,5	15,7

On constate que le son est harmonique dans le cas du verre frotté car les partiels sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale. En revanche, le son produit par un verre frappé est inharmonique.

Le verre frotté est plus adapté pour constituer un instrument car cela permet de jouer des accords harmonieux.

Même si cela reste imperceptible pour l'opérateur, le mouvement du doigt par rapport au verre est de type « collé-glissé », c'est-à-dire une succession de petits cisaillements : la peau souple du doigt reste accrochée au verre et se déforme légèrement alors que le doigt avance jusqu'à ce que l'attraction du doigt soit la plus forte, et que la peau se décroche du verre et se repose un tout petit peu plus loin. On effectue des légers étirements longitudinaux.

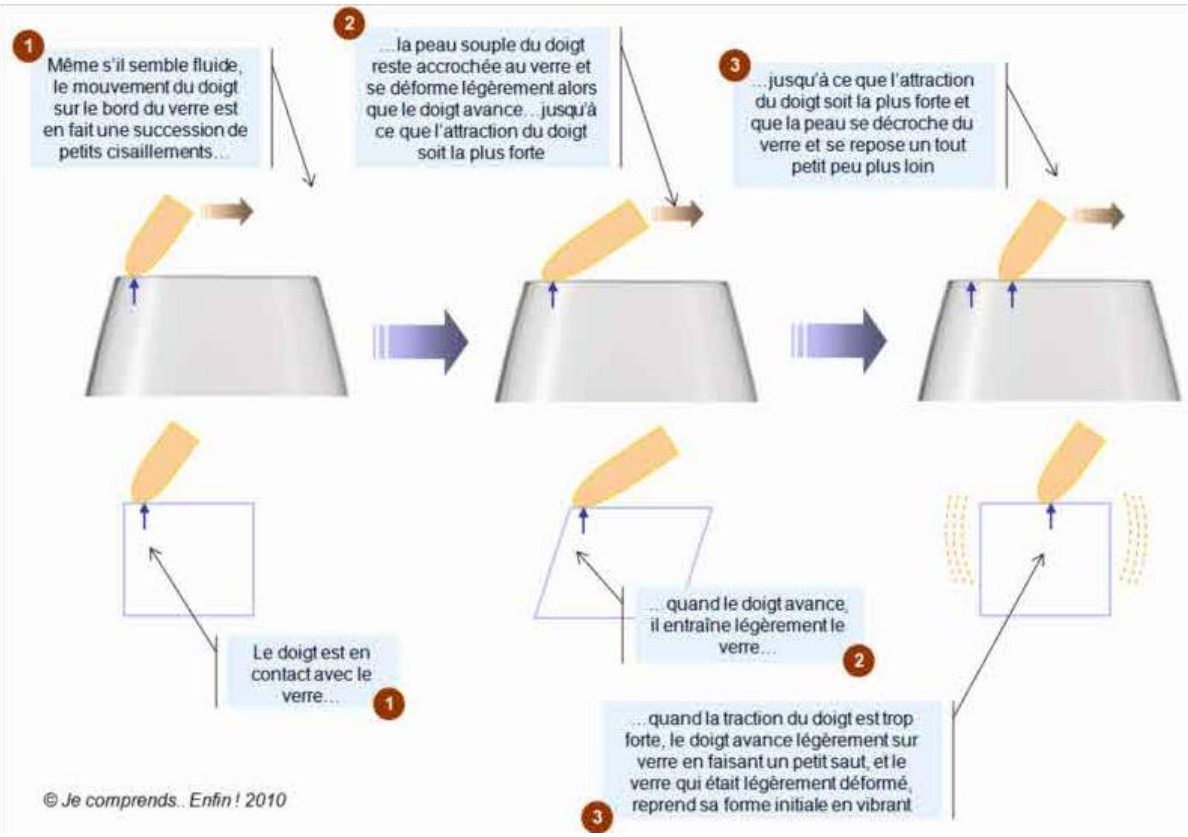


Figure 5: http://jl.domec.free.fr/siteDjl_fichiers/TP-Cours_BTS_CIM/cours/Mod7SolidMvt/oSCILLATmECA/videoResonnance/verreOndSonorResonnanc.html

Puisque frapper un verre transversalement ou frotter un verre longitudinalement produit la même note, alors on peut dire que l'onde est alors à la fois transversale et longitudinale, c'est-à-dire que quand on frappe le verre, il s'étire également longitudinalement et lorsque l'on étire le verre par la technique du « collé-glissé » il se déforme à la fois transversalement. L'onde est à la fois longitudinale et transversale sans changer le périmètre du buvant : les zones étirées sont attirées vers le centre du verre et les zones contractées s'en éloignent comme l'illustre la figure suivante :

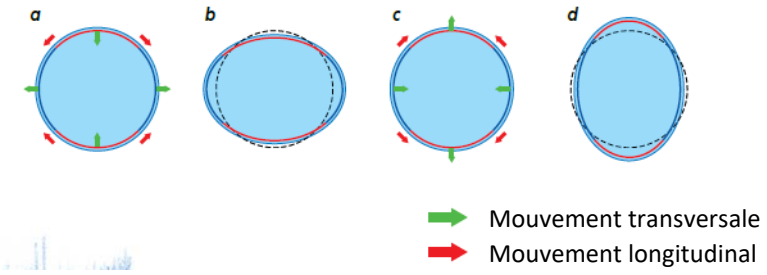


Figure 6: d'après une illustration issue de "pour la science" n°494 de décembre 2018

c) Estimation de l'influence du rayon du buvant

Le verre à pied en cristal possède une fréquence d'oscillation naturelle qui est appelé « la fréquence propre ».

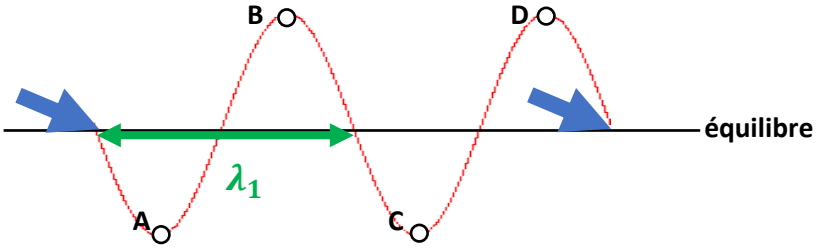
Lors de la mise en vibration par percussion, le périmètre du verre reste inchangé du fait de la résistance du verre. Ainsi, Le buvant se déforme, passant du cercle à l'ellipse de façon imperceptible.

La déformation s'étant sur la paroi du verre et s'atténue à mesure que l'on se rapproche du pieds. La paroi de verre va davantage vibrer proche du buvant et être immobile au niveau du pieds, de sorte que la paroi du verre va se comporter comme une membrane de haut-parleur qui transmet sa vibration à la couche d'air environnante.

L'illustration ci-contre montre que la déformation est transversale par rapport à la situation d'équilibre (cercle).

Figure 7: "Wine glass sound excitation by mechanical coupling to plucked strings", Elsevier, Applied Acoustics, volume 124, Septembre 2017

La longueur d'onde propre est intimement liée à la fréquence du son produit qui correspond à l'intervalle de temps entre deux déformations de la paroi. On se rend compte sur cette illustration, que la longueur d'onde propre dépend du rayon du cercle du verre. En effet, en regardant le déplacement transversal quand on parcourt le buvant du verre. On constate que le périmètre du buvant permet d'estimer la longueur d'onde de la vibration fondamentale.



$$P = 2\pi R \cong 2\lambda_1$$

$$\lambda_1 = \pi R$$

En notant v la vitesse de propagation de l'onde déformant le buvant, la fréquence fondamentale propre f_1 au verre à pied peut être déduite par :

$$v = \lambda \times f_1$$

On en déduit :

$$f_1 = \frac{v}{\pi R}$$

Nous avons alors enregistré le son produit par 3 verres de diamètre différent en frottant leur buvant avec un doigt mouillé et mesuré la fréquence fondamentale produite f_1 :

R (cm)	3,5	4,75	6,75
f_1 (Hz)	216	564	671
$R \times f_1$	756	2679	4529,25

On constate que plus le rayon augmente plus la fréquence diminue. Ce qui correspond à notre prévision.

En revanche, d'après notre équation :

$$R \times f_1 = \frac{v}{\pi}$$

Le produit $R \times f_1$ n'est pas constant, ce qui suggère que la vitesse de propagation de l'onde dans le verre n'est pas constante, elle doit dépendre d'autres paramètres comme peut-être le rayon, le volume, la hauteur du verre, l'épaisseur des parois, la pureté de la matière qui le constitue etc… L'équation doit être plutôt complexe.

Néanmoins cela nous apporte une première indication : jouer sur le diamètre des verres peut permettre d'explorer des gammes différentes, les verres de petits diamètres ayant tendance à sonner aigu et les verres de grand diamètre à sonner grave.

IV. Conception d'un dispositif excitateur

Pour commencer, nous avons voulu faire un dispositif permettant d'être plus précis. Pour cela, il nous fallait une vitesse de rotation du verre constante pour nos mesures. Nous avons donc créé un plateau tournant relié à un moteur nous permettant de choisir la vitesse de rotation de notre verre. On anticipe que la pression du doigt sur le verre ralenti cette vitesse de rotation. C'est pourquoi, au lieu de choisir la vitesse imposé par l'ordinateur, nous l'avons mesuré.

Restais le problème du doigt : en effet, nous, les expérimentateurs, sommes incapables de maintenir une pression stable avec nos doigts. Nous avons donc fait plusieurs essais, avec du silicone, du latex, du silicone et du latex, de la colle... Après des résultats non concluants, nous avons essayé dans un élan d'humour, de mettre un pansement sur un bâton. Cela ne fonctionnait toujours pas, ayant seulement le mou du doigt, le pansement n'était pas suffisant pour exciter le verre. Ensuite, nous avons rajouté la première chose que nous avions sous la main, un ballon. Bizarrement, ces 2 composants ont réussi à reproduire un son pratiquement similaire à celui de nos doigts.

Nous avons voulu élaborer un dispositif afin de soustraire toute influence de l'expérimentateur.

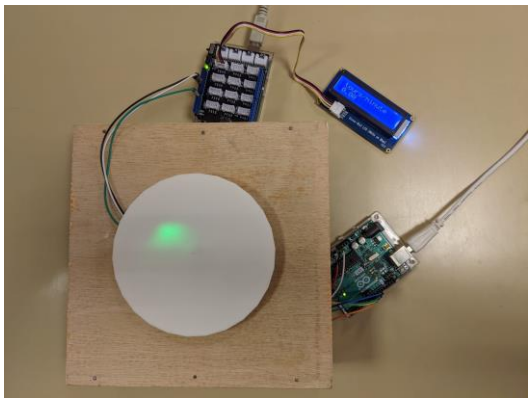
Pour recréer l'effet de l'excitation par frottement sur le buvant, il nous est apparu plus simple que ce soit le verre qui tourne. Nous avons donc créé un plateau tournant relié à un moteur nous permettant de choisir la vitesse de rotation de notre verre. On anticipe que la pression du doigt sur le verre ralenti cette vitesse de rotation. C'est pourquoi, au lieu de choisir la vitesse imposée par l'ordinateur, nous l'avons mesuré.

Reste le « problème du doigt » : en effet, nous, les expérimentateurs, sommes incapables de maintenir une pression stable avec nos doigts. Il nous fallait modéliser un doit : quelque chose d'un peu mou mais qui frotte. Nous avons testé plusieurs modèles de « doigt » : une gomme, un bâton, du silicone sur un bâton avec empreinte digitale, un gant latex rempli de colle... Après des résultats non concluants, nous avons essayé dans un élan d'humour, de mettre un pansement latex sur un bâton. Cela n'excitait toujours pas le verre pour résonner. Ensuite, nous avons rajouté la première chose que nous avions sous la main, un ballon de baudruche. Bizarrement, ces 2 composants ont réussi mettre en vibration le verre !

Ce doit est maintenu à une potence via un roulement à bille d'un hand-spinner mort pour la science. Ceci nous permet de relever et déposer le doigt à notre guise.

a) Premier dispositif expérimental

Comme premier dispositif expérimental, nous avons fabriqué un support en bois auquel nous avons attaché un moteur pas à pas 28BYJ-48. Ce moteur est piloté par une carte Arduino, ce qui nous permet de choisir le nombre de tour par minute voulu en changeant simplement la valeur correspondante dans le programme. Nous suspectons que la vitesse de rotation du moteur va diminuer une fois le verre sera disposé dessus et frotté, aussi nous avons ajouté au dispositif un compteur de tour à l'aide d'une fourche optique.



Grâce à ce compteur, nous avons pu remarquer que lorsque le nombre de tour par minute est trop faible, la justesse du compteur de tours à fourche optique perd en précision. Nous avons relevé ce qui a été affiché en fonction de la consigne lorsque le moteur est à vide :

Consigne (rpm)	5	6	7	9	10	12	15	18
Mesure (rpm)	6,38	6,75	7,13	9,00	10,00	12,00	15,00	18,00

Du fait de l'écart consigne/mesure à faible vitesse, nous estimons que la lecture de la vitesse de rotation est fiable à partir de 9 tours par minute.

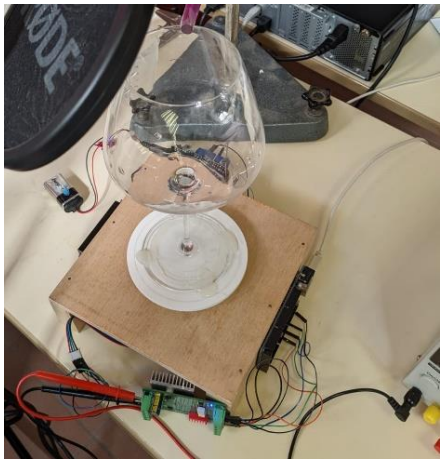
Nous avons ensuite essayé une valeur bien supérieure à celles testées et nous avons découvert qu'au-delà de 20 tours par minute, le moteur n'arrive plus à tourner. En effet, la carte Arduino 5V ne peut alimenter le moteur qu'à faible puissance. Il nous faut donc découpler l'alimentation du moteur de celle d'Arduino.

b) Amélioration du dispositif

Pour améliorer notre dispositif expérimental, il nous faut donc séparer l'alimentation du moteur de celle de la carte Arduino. De cette manière, nous permettrons au moteur de tourner à bien plus de 20 tours par minute.

Nous disposons d'un moteur NEMA 17 qui peut être alimenter jusqu'à 35V. Il est piloté par un Driver de moteur pas à pas TB6560 3A. Nous avons suivi le protocole disponible sur https://youtu.be/g-xnanD7vUs

Nous avons pu obtenir des vitesses de rotation du verre de plus de tours/minutes ce qui est bien au-dessus de ce que nous réalisons au doigt !



V. Effet e la technique de jeu

a) Effet de la vitesse de rotation

Protocole

Nous avons collé un verre sur la plateforme tournante. Ensuite, nous avons mesuré dans le son que produit le moteur qui fait tourner le verre sur lui-même, à l'aide d'Audacity.

Puis nous avons installé le « doigt » et téléversé le programme arduino avec la vitesse consigne. Nous avons enregistré le son produit.

Nous avons répété cette manipulation en augmentant la vitesse de consigne.

Pour terminer nous avons soustrait la contribution du bruit du moteur au son émis par le verre puis nous avons tracé le spectre sonore pour chaque vitesse de rotation. Nous avons relevé la valeur du niveau sonore digital associé la fréquence fondamentale de la note jouée.

Tout d'abord, nous avons modifié une donnée du programme le programme Arduino pour obtenir une vitesse de rotation différente. Nous avons ensuite téléversé le programme et posé le verre ainsi que notre doigt.

Ensuite, nous avons donc mesuré dans un premier temps le son que produit le moteur qui fait tourner le verre sur lui-même, à l'aide d'Audacity. Puis nous avons fait de même avec le son que le doigt seul produit sur notre verre, et nous avons répété cette manipulation en augmentant la vitesse du programme.

Pour terminer nous avons enregistré nos mesures, et nous avons soustrait la contribution du bruit du moteur puis nous avons tracé le spectre de chacune des données. Nous avons relevé la valeur du niveau sonore associé la fréquence jouée. Nous avons alors remarqué que la fréquence tournait pour tous autour de 370Hz. A l'inverse nous avons constatés que plus nous augmentons la vitesse plus le niveau sonore augmentais.

Mesures

$\omega\ (rpm)$	27.37	36.00	43.63	53.67	61.88	70.12	78.37	85.50	94.50	102.75
$f_1\ (Hz)$	371	370	371	371	370	370	370	370	371	370
NS (dB)	-18.5	-17.1	-16.1	-15.1	-14.2	-12.3	-11.2	-10.6	-8.3	-5.4

* En dessous de 27.37 rpm nous n'avons pas entendu de son

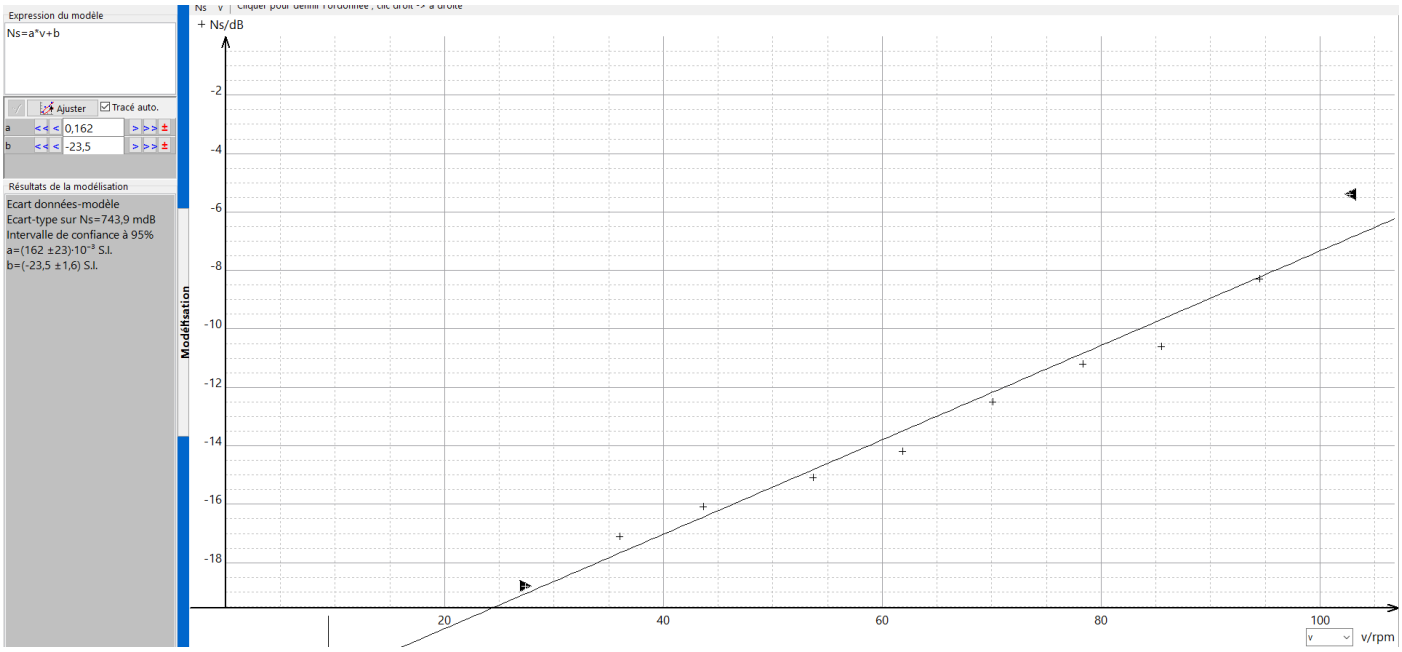
Analyse

Nous constatons que la fréquence fondamentale de résonance n'est pas affectée par la vitesse de rotation du verre. Dans le cas du verre utilisé pour cette expérience, la fréquence est d'environ 370 Hz.

En revanche, le niveau sonore croit à mesure que la vitesse de rotation augmente.

Nous avons tracé le niveau sonore digital atteint par rapport à la vitesse de rotation mesurée.

Nous observons que les mesures expérimentales sont raisonnablement alignées. Nous choisissons alors une modélisation affine.



L'équation obtenue est : $NS = 0{,}162 \times \omega - 23{,}5$ avec ω exprimé en tours par minute.

Cela suggère que plus la vitesse de rotation du doigt augmente, plus l'amplitude de vibration augmente et par conséquent le niveau sonore du son produit. Le niveau sonore augmente de 1 dB si la vitesse de rotation augmente de $\frac{1}{0{,}162} \approx 6{,}17\ rpm = 0{,}646\ rad/s$ soit environ 6 tours de plus à faire en 1 minute.

b) Effet de la force exercée par le doigt

Protocole

Tout d'abord, nous avons choisi une vitesse adaptée pour obtenir un niveau sonore suffisant, ici 27 tours par secondes. En effet si nous avions choisi une vitesse inférieure nous aurions eu un son moins puissant, et si nous avions choisi une vitesse supérieure le verre aurait fini par se décoller dû aux vibrations mécaniques.

Ensuite, nous avons donc mesuré dans un premier temps le niveau sonore que produit le moteur qui fait tourner le verre sur lui-même, à l'aide d'Audacity. Puis nous avons enregistré le son produit par frottement du « doigt » sur le verre en ajoutant des masses de 50g.

Nous avons tracé le spectre de chaque enregistrement avec soustraction préalable du bruit du moteur et relevé encore une fois la valeur du niveau sonore digital associé la fréquence fondamentale de la note jouée.

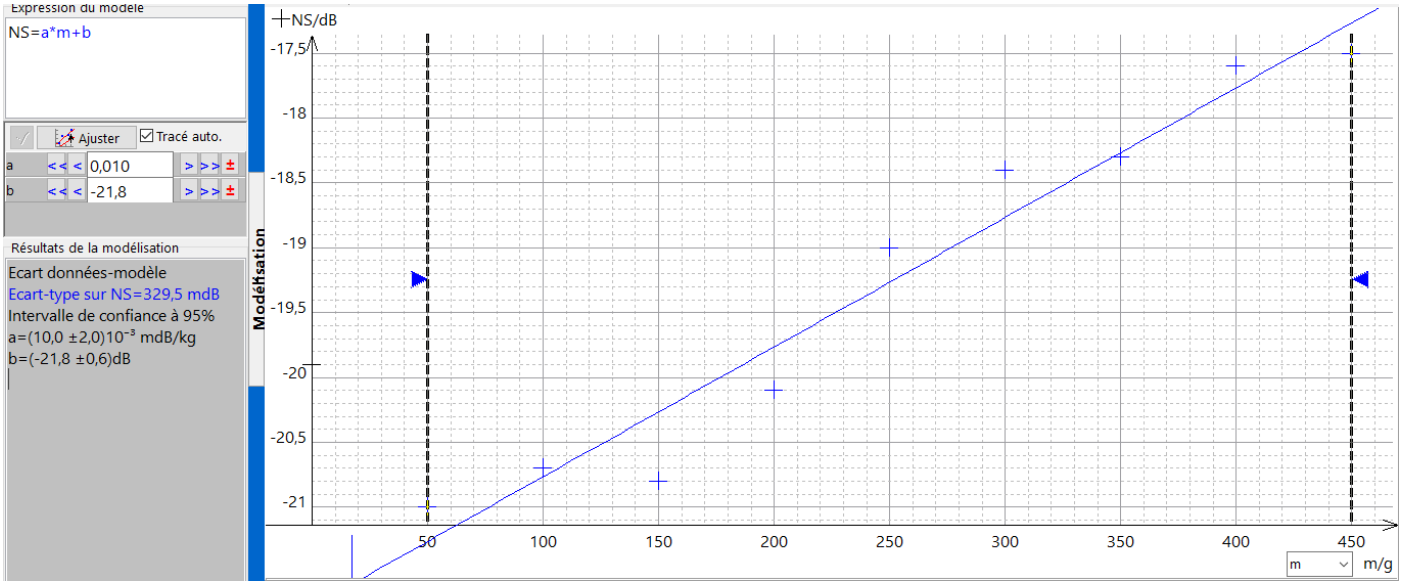
Pour terminer nous avons enregistré nos mesures, et nous avons soustrait la contribution du bruit du moteur, puis nous avons tracé le spectre de chacune des données. Nous avons alors remarqué que la fréquence tournait pour tous autour de 370Hz. A l'inverse nous avons constatés qu'au plus nous ajoutons de poids au plus les décibels augmentaient.

Mesures

Masse ajoutée	50g	100g	150g	200g	250g	300g	350g	400g	450g
NS (dB)	-21,0	-20,70	-20,80	-20,10	-19,0	-18,40	-18,30	-17,60	-17,50
$f_1\ (Hz)$	366	365	365	365	366	366	365	366	365

Analyse

On peut apercevoir que si la force exercée augmente alors le niveau sonore augmente. En revanche la fréquence fondamentale, donc la note jouée, n'est pas affectée.



Cette fois, les points sont grossièrement alignés et une modélisation affine donne la relation suivante :

$$NS = 1{,}0 \times 10^{-2} \times m - 21{,}8$$

Avec la masse m exprimée en gramme.

Cela veut dire que pour augmenter le niveau sonore de 1dB, il faut augmenter la force du poids d'une masse de $\frac{1}{1{,}0\times10^{-2}} = 100\ g$, soit augmenter la force de :

$$P = m \times g = 100 \times 10^{-3} \times 9{,}81 = 9{,}81 \times 10^{-1}\ N$$

c) Conclusion : la puissance ménanique exercée

La vitesse de rotation et la force exercé sur le buvant sont tous les deux impactant. Cela correspond à la puissance mécanique exercée sur le verre :

$$Puissance = F \times v = F \times R \times \omega$$

Avec F la force pressante et ω exprimé en rad/s.

Plus la puissance transmise en continu au verre est élevée, plus ce dernier va pouvoir vibrer avec de grandes amplitudes. Plus la déformation est grande, sans en modifier la fréquence, plus la quantité d'air déplacé est importante et plus le son est fort.

En considérant l'ordre de grandeur des résultats précédents, une augmentation de 1 N ou 1 rad/s provoque une augmentation du niveau sonore de 1 dB.
Cette première étude permet de donner des directives de jeu : il faut jouer à la fois sur la vitesse de frottement et la pression exercée. Pour un effet *piano* il convient de ralentir le frottement sur le buvant et relever le doigt pour exercer moins de pression. Au contraire, pour un effet *forte* il faut exercer un mouvement rapide en appuyant sur le buvant.

VI. Accordage par ajout d'eau

a) Première approche : ajout de volumes constants

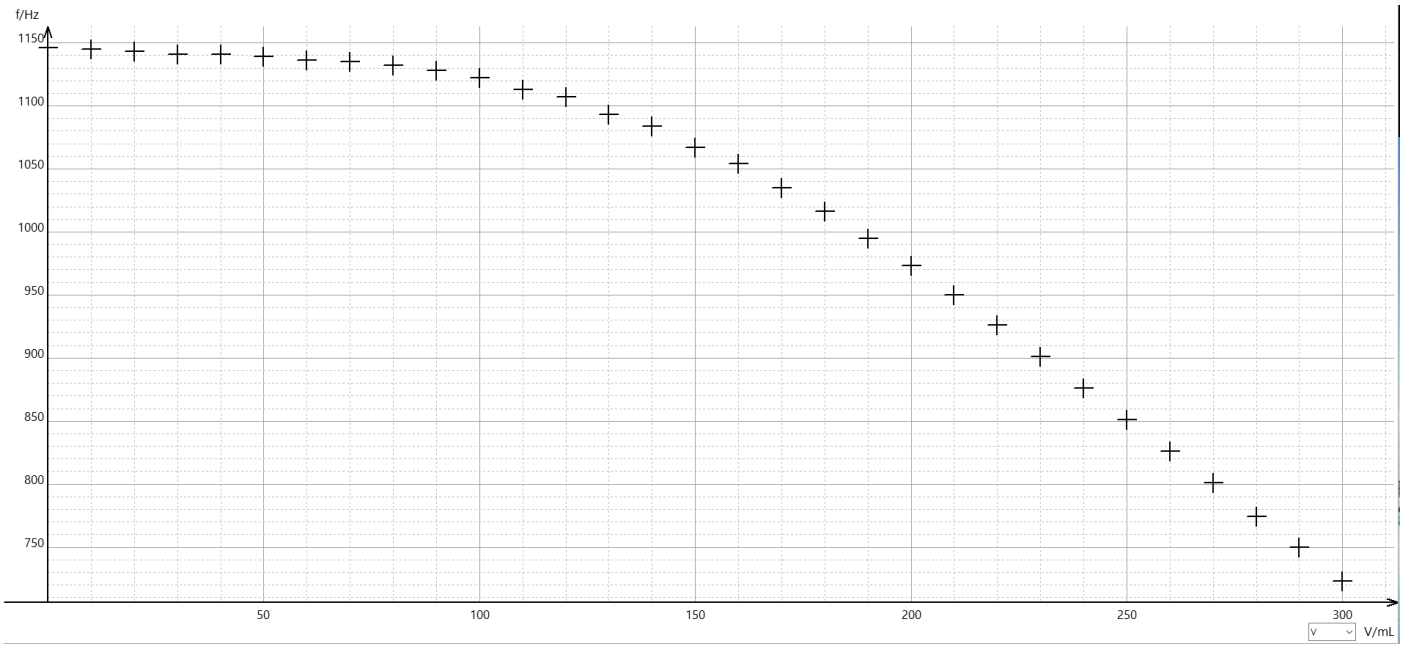
Dans cette expérience, nous cherchions à établir un lien entre la fréquence et le volume.

protocole

Tout d'abord, nous avons mesuré la fréquence fondamentale du verre sans eau par analyse spectrale du son émis. Puis, nous avons ajouté 10 ml d'eau mesuré à l'éprouvette graduée et, à nouveau, nous avons noté la valeur de la fréquence fondamentale. Nous avons continué d'ajouter 10 ml d'eau jusqu'à la capacité maximale du verre en notant à chaque fois les valeurs de la fréquence fondamentale f_1 par rapport au volume V d'eau introduit.

Mesures

Nous avons reporté ces mesures sur un graphique :



Analyse

Nous en avons conclu que le volume d'eau influe sur la fréquence. En effet, plus le volume d'eau V et important, plus la fréquence est basse. En ajoutant de l'eau dans le verre cylindrique, La fréquence passe 1150 Hz à 723 Hz. Nous pouvons jouer les notes entre Fa#4 (739,99 Hz) et Do#5 (1108,73 Hz) avec ce verre.

Les points n'étant pas alignés, nous ne savions pas comment modéliser ces données. Nous avons alors contacté Holger Vach, directeur de recherches à l'école Polytechnique, qui a écrit un article sur le sujet intitulé « Vibrational modes of partly filled wine glasses » publié au *Journal of the Acoustical Society of America* en juin 2006.

b) Correction : influence de la hauteur de liquide

Selon Holger Vach, le paramètre d'influence n'est pas le volume mais la hauteur h car cela donne la relation suivante :

$$\left(\frac{f_{eau}}{f_{vide}}\right)^2 = \frac{1}{1+\alpha h^n}$$

Avec

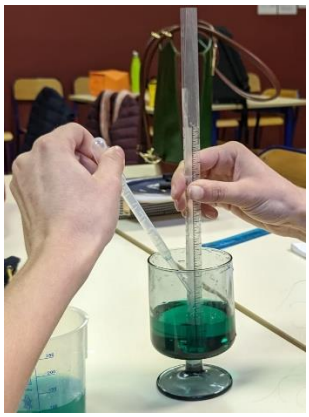
f_{eau} : la fréquence fondamentale de la note obtenue par ajout d'eau

f_{vide} : la fréquence fondamentale du verre vide

α : une constante qui dépend de la densité du liquide, de la forme du verre et de l'épaisseur de la paroi

n : un coefficient de forme du verre : $3 \leq n \leq 5$ pour un verre cylindrique, $4 \leq n \leq 6$ pour un verre paraboloïde, $5 \leq n \leq 7$ pour un verre conique.

On s'est fabriqué un nouvel outil, une règle graduée fine, permettant de mesurer la hauteur de liquide versé. Pour simplifier la lecture graduée, nous avons coloré l'eau avec du colorant alimentaire.



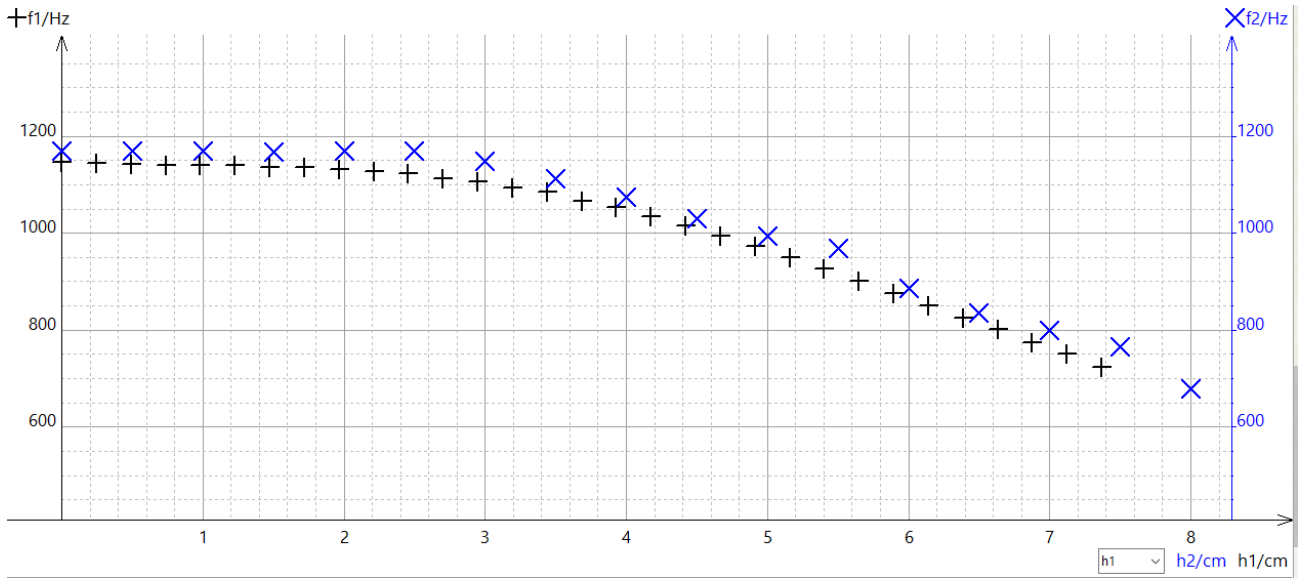
Le verre testé précédemment était cylindrique. Il existe alors une relation entre hauteur est volume connaissant le rayon du verre :

$$V = \pi R^2 \times h$$

Donc

$$h = \frac{V}{\pi R^2}$$

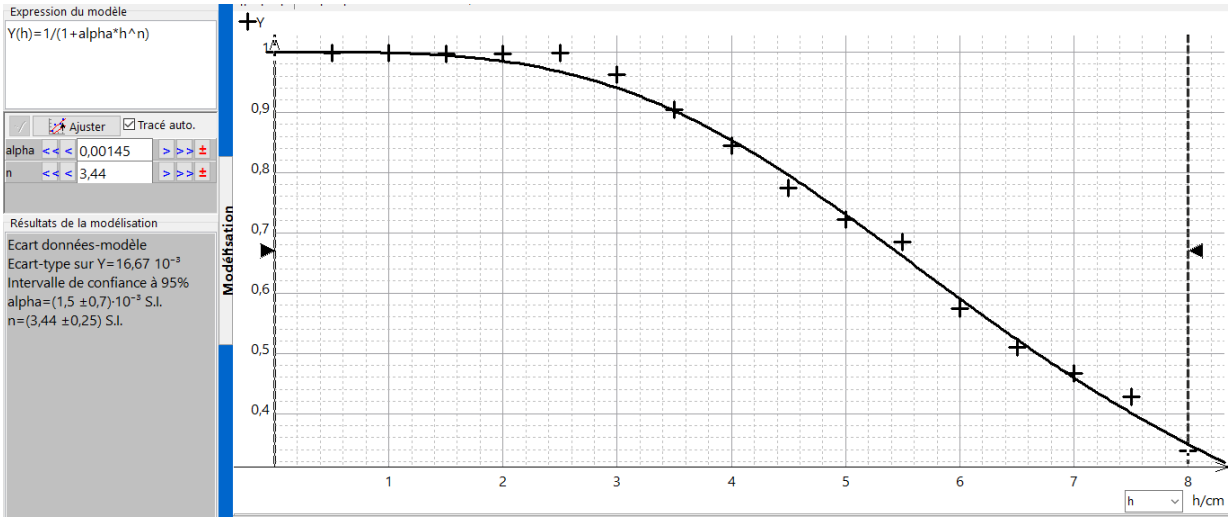
On peut donc, sur les mesures précédentes, changer la variable V par la variable h sachant le verre utilisé avait un diamètre de 7,2 cm.



On a refait des mesures avec la règle (en bleu sur le graphique précédent) et on constate que les mesures coïncident raisonnablement, donc nous pouvons affirmer que les mesures à mesures à la règle seront acceptables, ce qui nous permettra d'étudier des verres non cylindriques.

Nous n'avons pas une gamme complète avec ce verre, il nous faudra plusieurs verres de rayons et hauteur h différentes pour constituer un vérillon.

On effectue la modélisation proposée par monsieur Vach en changeant l'ordonnée par $Y = \left(\frac{f_{eau}}{f_{vide}}\right)^2$



On trouve

$$\left(\frac{f_{eau}}{f_{vide}}\right)^2 = \frac{1}{1 + 1{,}5 \times 10^{-3} \times h^{3{,}44}}$$

n=3,44 ce qui correspond bien à un verre cylindrique. La hauteur de liquide critique à partir de laquelle la fréquence diminue est d'environ $h_c \approx 3\ cm$.

Nous réitérons l'expérience dans le cas d'un verre plutôt sphérique avec une épaisseur de paroi plus fine

On trouve

$$\left(\frac{f_{eau}}{f_{vide}}\right)^2 = \frac{1}{1 + 90 \times 10^{-6} \times h^{4{,}74}}$$

n=4,74 ce qui correspond bien à un verre paraboloïque. La hauteur de liquide critique à partir de laquelle la fréquence diminue est d'environ $h_c \approx 3\ cm$.

On constate que le paramètre α est environ 100 fois plus faible que précédemment, ce que nous pouvons corréler avec le fait que les parois sont ici beaucoup plus fines et le verre a une forme différente.

Par conséquent, Pour que l'effet d'ajout d'eau soit conséquent, on en conclut d'après cette équation :

$$\left(\frac{f_{eau}}{f_{vide}}\right)^2 = \frac{1}{1+\alpha h^n}$$

Il vaut mieux, en ordre de préférence, un verre conique, puis paraboloïde puis cylindrique afin que le paramètre n soit grand. Une paroi épaisse permet d'avoir un α grand, mais expérimentalement, le verre est plus difficilement excitable.

Lorsque l'on ajoute de l'eau, la vibration des parois est transmise à l'eau. Ajouter de l'eau ajoute de la masse mise en mouvement, il y aura moins de vibrations par seconde du fait de la masse d'eau entrainée donc la fréquence diminue.

Puisque l'amplitude des vibrations est nulle au fond du verre et maximale au niveau du buvant, alors l'eau au fond du verre est bien moins mise en mouvement que celle située en hauteur. L'existence de la hauteur critique de liquide est alors liée à l'existence d'un seuil à partir duquel le verre vibre et contribue au son produit.

Voici les deux verres utilisés rempli d'eau colorée jusqu'au niveau critique h_c ce qui permet un visuel de la zone où les parois varient peu.

L'effet de l'eau ajoutée est donc d'autant plus important que le verre est déjà rempli : une même quantité d'eau ajoutée à un verre presque plein a plus d'effet que si on l'ajoute à un verre presque vide.

c) Le verre à moitié plein : dehors ou dedans ?

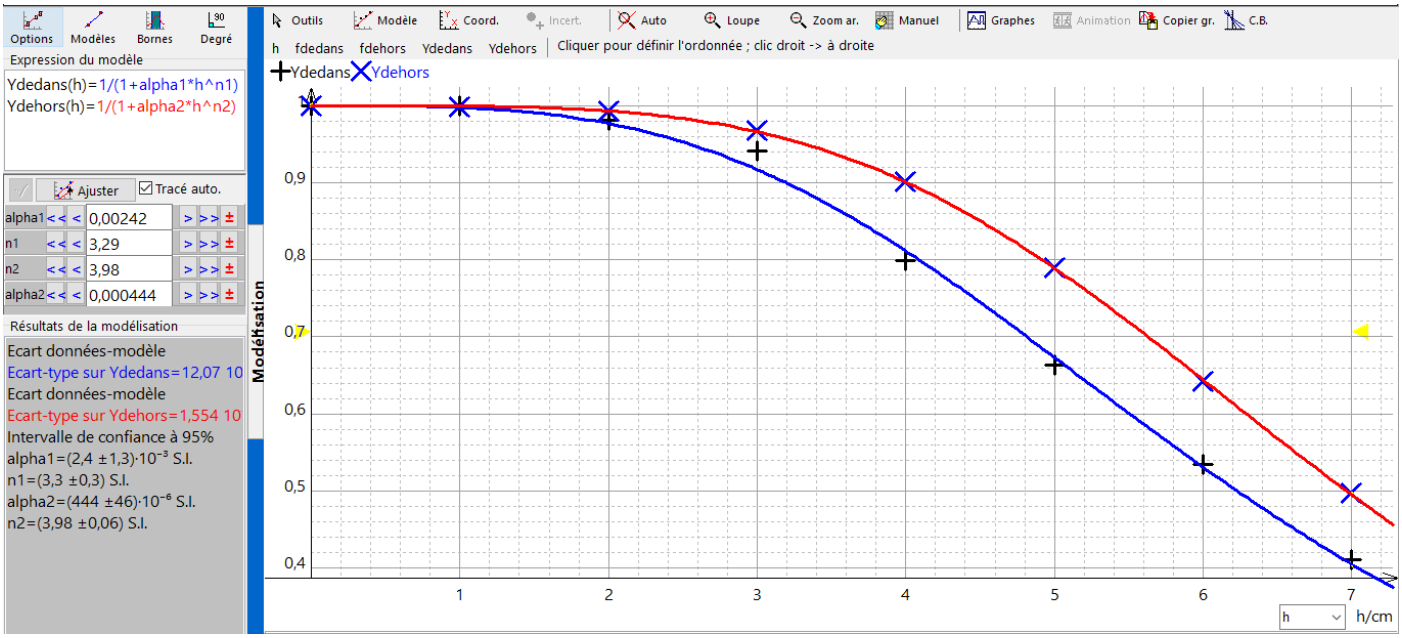
Nous remarqué que lorsque l'on plonge un verre vide dans un bac rempli d'eau, ce dernier émet un son et que la note jouée dépend de la hauteur d'eau à l'extérieur du verre. Est-ce que l'on atteint les mêmes notes avec le même niveau d'eau à l'extérieur ?

protocole

Nous avons rempli un bac d'eau et choisit le verre cylindrique, que nous avons plus ou moins immergé pour comparer avec les mesures précédentes.

Mesures

Nous avons reporté les mesures sur un graphique et nous les avons modélisé.



On remarque que, quand l'eau est à l'extérieur, il faut un niveau d'eau plus élevé pour que la fréquence commence à diminuer. Pour une même hauteur d'eau, la fréquence atteinte quand l'eau est à l'extérieur est supérieure que lorsque l'eau est à l'intérieur.

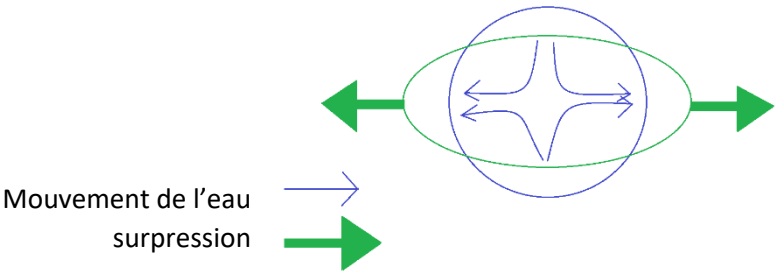
Ce qui est surprenant, est que le paramètre n qui tient compte de la forme du verre est différent. Il augmente de 20% quand l'eau est à l'extérieur. Ceci peut être lié au fait que, comme la paroi n'a pas même épaisseur du pieds au buvant, ce n'est pas exactement la même géométrie vue à l'intérieur et à l'extérieur. Les valeurs correspondent toujours au cas d'un verre cylindrique.

Nous avons ici refait lors de la même séance les mesures avec l'eau à l'intérieur et à l'extérieur pour être dans les mêmes conditions. A la rentrée des fêtes, l'eau du lycée était cette fois particulièrement froide !

<u>Analyse</u>

On a retrouvé les mêmes conclusions dans l'article « Variations on a theme by a singing wineglass » de Kuan-Wen Chen dans Europhysics letters de 2005. Nous l'avons contacté pour mieux interpréter nos observations. D'une part, le volume d'eau à l'intérieur est inférieur à celui à l'extérieur. Mis en vibration, le niveau d'eau à l'intérieur va légèrement augmenter par la déformation du verre. La hauteur d'eau mesurée au repos est donc très légèrement inférieur à la hauteur d'eau lorsque le verre vibre, ce qui induit un léger décalage horizontal de la courbe lorsque l'eau est à l'intérieur. Cet effet est négligeable sur le grand volume d'eau à l'extérieur.

Un autre paramètre s'ajoute à cela. L'eau est chassée, par les mouvements de la paroi, dû à son incompressibilité lors de la mise en vibration. Lorsque l'eau est confinée à l'intérieur du verre, le mouvement de l'eau accompagne la déformation du verre, ce qui a pour conséquence de générer une surpression supplémentaire sur les parois s'opposant aux mouvements de celle-ci. Ainsi, la période de vibration augmente et la fréquence diminue davantage en conséquence.



Ici la surpression s'oppose au retour à l'équilibre du verre

VII. Conclusion et perspectives

D'après notre étude, un verre à vin peut être utilisé comme un instrument très harmonieux, avec des partiels très bien définis.

Constituer un vérillon nécessitera de disposer de verres à vin (ou bière !) de rayons différents et il sera très utile que ces verres aient une grande hauteur de paroi. En effet un verre se comporte comme un haut-parleur, à ceci près que la vibration n'est pas uniformément répartie sur le verre : elle est plus forte au buvant et nulle à la jonction avec le pied du verre, ce qui justifie une grande hauteur de paroi afin d'obtenir un son fort. Aussi, par ajout d'eau, il sera possible de sélectionner plusieurs notes différentes et plus le verre a des parois hautes, plus sa gamme sera large.

Même si nous avons pu vérifier l'impact de certains paramètres physiques isolés d'un verre sur sa note jouée, il nous est impossible d'établir une loi générale qui nous permettrait de prévoir mathématiquement quel verre choisir avec quelle quantité d'eau. La construction d'un vérillon se fera donc à tâton.

Nous avons abouti à la création d'un vérillon pouvant jouer d'un mi3 à un la4 par ajustement de niveau d'eau dans des séries de verres de 4 formes différentes.

Le joueur de vérillon doit se laver les mains avant de jouer pour éliminer la couche graisseuse sur ses doigts afin de pouvoir agripper le verre. La pression qu'il exerce et la rapidité de mouvement aura un impact sur la qualité de son fort/faible.

Il est aussi possible de jouer du monovérillon inversé : un seul verre que l'on plonge plus ou moins dans l'eau. Cette technique à le mérite de pouvoir jouer des glissandos. En revanche, le nombre de notes sera limité, et dans notre étude nous n'avons jamais obtenu une gamme complète sur un seul verre.

Sachant que nous avons une gamme de note spécifique pour l'eau, nous nous sommes demandé quel est l'impact de la masse volumique comme elle afflue sur la densité ? Nous pensons que si nous changeons le liquide, nous obtiendrons une gamme supplémentaire, et par conséquent plus de fréquences.

Maintenant, nous nous demandons quel est l'impact de la masse volumique. Nous pensons que si le liquide est plus dense, alors la période de vibration sera encore plus grande et donc la fréquence encore plus diminuée par ajout de liquide. il est peut-être alors possible d'obtenir une plus grande plage de notes à jouer pour un unique verre.

VIII. Bibliographie et webographie

« Quand les verres chantent », POUR LA SCIENCE N°494, décembre 2018.
« Vibrational modes of partly filled wine glasses » *Journal of the Acoustical Society of America* en juin 2006
« Variations on a theme by a singing wineglass » *Europhysics letters*, 2005
https://mschoeffler.com/2017/09/23/tutorial-how-to-drive-the-28byj-48-stepper-motor-with-a-uln2003a-driver-board-and-an-arduino-uno/

http://jl.domec.free.fr/siteDjl_fichiers/TP-Cours_BTS_CIM/cours/Mod7SolidMvt/oSCILLATmECA/videoResonnance/verreOndSonorResonnanc.html

https://acoustics.org/pressroom/httpdocs/163rd/August_2pMU4.html

https://wiki.ubc.ca/Course:PHYS341/Archive/2016wTerm2/TibetanSingingBowl

http://www.maison-des-sciences.org/pourquoi-un-verre-emet-il-des-sons/

https://www.radiofrance.fr/francemusique/video-l-armonica-de-verre-comment-ca-marche-thomas-bloch-7930813

ANNEXE 1 : Vocabulaire

Buvant bord supérieur d'un verre.

Fréquence Grandeur liée à un phénomène, qui mesure le nombre de fois où ce phénomène se reproduit en une seconde.

Fréquence fondamentale fréquence la plus basse d'un son musical qui donne la note.

Hauteur La hauteur d'un son correspond à la fréquence de vibrations de celui-ci. L'oreille humaine peut entendre des fréquences émises entre 16 et 16 000 Hz environ. En musique, si la fréquence est haute, elle est aiguë et si la fréquence est, au contraire, basse, elle est considérée comme grave.

Harmoniques -un partiel **harmonique** est une composante d'un son périodique, dont la fréquence est un multiple entier d'une fréquence fondamentale.

Partiel -En acoustique, un **partiel** désigne toute composante simple ou fréquence d'un son. Les harmoniques sont des partiels particuliers. La somme des partiels donne le timbre d'un instrument de musique.

Onde mécanique Perturbation qui se propage dans un milieu matériel sans transport de matière avec un transport d'énergie.

rpm « round per minute » ou tour par minute en français. Unité de mesure de la vitesse de rotation.

Résonnance Augmentation de l'amplitude d'oscillation d'un système physique lorsque celui-ci est excité au voisinage de l'une de ses fréquences propres.

Timbre Le timbre est constitué de toutes les fréquences du son sauf sa fréquence fondamentale. Il permet d'identifier un son d'une façon unique. Deux sons peuvent avoir la même fréquence fondamentale et la même intensité mais deux timbres différents.

ANNEXE 2 : fréquences des notes de musique

Fréquences des notes (en hertz) dans la gamme tempérée (tempérament égal)

Note/octave	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
do ou *si* ♯	16,35	32,70	65,41	130,81	261,63	523,25	1046,50	2093,00	4186,01	8 372,02	16 744,04
do ♯ ou *ré* ♭	17,33	34,65	69,30	138,59	277,18	554,37	1108,73	2217,46	4434,92	8 869,84	17 739,68
ré	18,36	36,71	73,42	146,83	293,66	587,33	1174,66	2349,32	4698,64	9 397,28	18 794,56
ré ♯ ou *mi* ♭	19,45	38,89	77,78	155,56	311,13	622,25	1244,51	2489,02	4978,03	9 956,06	19 912,12
mi ou *fa* ♭	20,60	41,20	82,41	164,81	329,63	659,26	1318,51	2637,02	5274,04	10 548,08	21 096,16
fa ou *mi* ♯	21,83	43,65	87,31	174,61	349,23	698,46	1396,91	2793,83	5587,65	11 175,30	22 350,60
fa ♯ ou *sol* ♭	23,13	46,25	92,50	185,00	369,99	739,99	1479,98	2959,96	5919,91	11 839,82	23 679,64
sol	24,50	49,00	98,00	196,00	392,00	783,99	1567,98	3135,96	6271,93	12 543,86	25 087,72
sol ♯ ou *la* ♭	25,96	51,91	103,83	207,65	415,30	830,61	1661,22	3322,44	6644,88	13 289,76	26 579,52
la	27,50	55,00	110,00	220,00	440,00	880,00	1760,00	3520,00	7040,00	14 080,00	28 160,00
la ♯ ou *si* ♭	29,14	58,27	116,54	233,08	466,16	932,33	1864,66	3729,31	7458,62	14 917,24	29 834,48
si ou *do* ♭	30,87	61,74	123,47	246,94	493,88	987,77	1975,53	3951,07	7902,13	15 804,26	31 608,52

ANNEXE 3 : Programmes Arduino

Pilotage du moteur pas à pas 28BYJ-48 avec le driver ULN2003A

```
// (c) Michael Schoeffler 2017, http://www.mschoeffler.de
#include <Stepper.h>
const int STEPS = 2038; // the number of steps in one revolution of your motor (28BYJ-
48)
Stepper stepper(STEPS, 8, 10, 9, 11);

void setup() {

}
void loop() {
  stepper.setSpeed(15); // 1 rpm
  stepper.step(STEPS); // do 2038 steps - correspond
}
```

Pilotage du moteur pas à pas NEMA 17 avec le driver ULN2003A

```
// (c) Michael Schoeffler 2017, http://www.mschoeffler.de

// defines pins numbers
const int m=1;//variable de contrôle pour ajuster la vitesse de rotation
const int stepPin = 5;
const int dirPin = 2;
const int enPin = 8;
void setup() {

  // Sets the two pins as Outputs
  pinMode(stepPin,OUTPUT);
  pinMode(dirPin,OUTPUT);
  pinMode(enPin,OUTPUT);
  digitalWrite(enPin,LOW);

}
void loop() {

  digitalWrite(dirPin,HIGH); // Enables the motor to move in a particular
direction
  // Makes 200 pulses for making one full cycle rotation
  for(int x = 0; x < 800; x++) {
    digitalWrite(stepPin,HIGH);
    delayMicroseconds(500/m);
    digitalWrite(stepPin,LOW);
    delayMicroseconds(500/m);
  }
}
```

Mesure et affichage de la vitesse de rotation du moteur

```
#include <Wire.h>  // inclure la bibliothèque permettant la communication par le
protocole I2C
#include "rgb_lcd.h" // inclure la bibliothèque pour l'écran LCD

rgb_lcd lcd; // création d'un objet lcd

int sensor = A0; // broche pour détection du capteur
int etatSensor ; // état du capteur (haut ou bas)
unsigned long start_time=0; //temps de début d'un comptage
unsigned long end_time =0; //temps de fin d'un comptage
```

```
int nb_trous =20 ; // nombre de trous de la roue codeuse
bool etat_old= false ; //
bool  etat_new = false; // les états vont changer à chaque chaque modification de la
valeu lue par le capteur (haut/5V ou bas/0V)
int compt=0; // comptage initialisé à 0
float rps=0; // vitesse intialisée à 0
long temps; //mesure du temps pour l'acquisition

void setup()
{lcd.begin(16, 2);   // configurer le nombre de colonnes et de lignes de l'écran LCD :

}

void loop()
{
 compt = 0;
 start_time=millis(); //on mesure le temps
 end_time=start_time+1000; // pour un comptage toutes les secondes
 temps = millis(); //mesure du temps pour l'acquisition


while(millis()<end_time){ // comptage sur une seconde
  if (analogRead(sensor)< 50){
    etat_new = true;
  }
  else {
    etat_new =false;
  }
  if (etat_old != etat_new) {
    etat_old = etat_new;
    compt = compt + 1;
  }

}
rps = float(compt)/(2*nb_trous) ; // il faut diviser par 2 car pour chaque trou, deux
changements d'état vont être détectés
Serial.print("temps  ");
Serial.print(temps);
Serial.print("  rps ");
Serial.println(rps);
  // Ecrire un message sur l'écran LCD
lcd.clear();   // effacer l'écran
lcd.setCursor(1, 0);  // mettre le curseur à la cinquième colonne, première ligne
lcd.print("tour/minute");   // afficher "Arduino"
lcd.setCursor(1, 1);  // mettre le curseur à la deuxième colonne, deuxième ligne
lcd.print(rps);   //


}
```

ANNEXE 4 : Le niveau sonore acoustique/digitale

Niveau sonore acoustique :

Le niveau sonore acoustique L permet de prendre en compte la variation de la sensation auditive avec l'intensité de l'onde sonore, c'est-à-dire sa puissance surfacique :

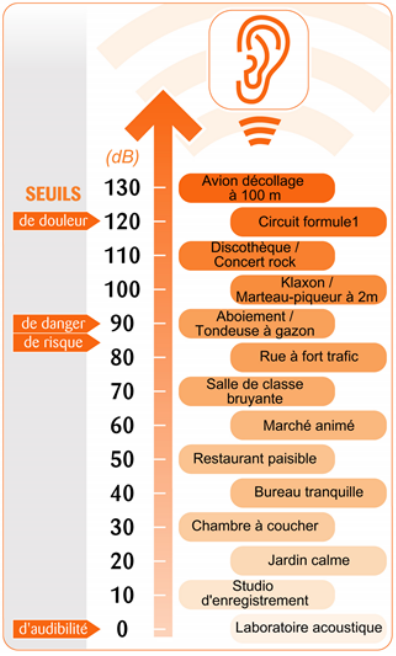
$$I = \frac{P}{S} = \frac{p^2}{\rho c}$$

I correspond à l'intensité sonore ($W.m^{-2}$)
P correspond à la puissance sonore (W)
S correspond à la surface (m^2)
p la pression (Pa)
La masse volumique du milieu (kg/m^3)
c la célérité du son dans le milieu (m/s)
On a

$$L = 10\log\left(\frac{I}{I_0}\right) = 10\log\left(\frac{p^2}{{p_0}^2}\right)$$

$I_0 = 1{,}00 \times 10^{-12}\ W/m^2$ correspondant à l'intensité sonore minimale audible.

Ainsi L=0 dB marque le seuil d'audibilité et pour les sons très forts, L=120 dB marque le début du seuil de la douleur.



> 105 dB(A) : Risques immédiats/ court terme pour l'audition : surdité, acouphènes...

85-105 dB(A) : Risques à moyen/long terme pour l'audition si exposition chronique : pertes auditives

A partir de 40 dB(A) la nuit et de 55 dB(A) le jour : effets extra-auditifs du bruit (fatigue, stress, troubles du sommeil, troubles de l'humeur, troubles cardio-vasculaires, troubles des apprentissages, gêne...)

Plusieurs facteurs entrent en considération : niveau sonore, fréquence, caractère continu ou intempestif du bruit, durée d'exposition, sensibilité individuelle...

Figure 8:https://www.bruitparif.fr/l-echelle-des-decibels/

Niveau sonore digital :

Un microphone transforme la mesure de variation de pression en variation de tension.

p→U

La tension affichée sur audacity varie entre 0 et 1.

Le niveau sonore digitale NB mesure simplement la variation de pression digitalisé, avec comme référence $U_0 = 1$:

$$NS \cong 10\log(\mathrm{U}^2)$$

Le niveau sonore maximal atteint est alors de 0 dB correspondant à une tension maximale de 1.

Par conséquent, les niveaux sonores des sons seront vus négatifs !