



OLYMPIADES
DE PHYSIQUE FRANCE



Concours National des Olympiades de Physique France
A l'Université Saint -Charles de Marseille

Vendredi 31 janvier 2025

Inès LISSARRE Juliette VAAST Louise THOREZ
Lilou LACROIX Jeanne DELEPOUVE Tom PAUCHET
Présentent

Branly : des ondes au brouillard

Résumé

Après une première expérience aux Olympiades de Physique, nous avons entrepris d'explorer le fonctionnement des brumisateurs à ultrasons. Ces dispositifs utilisent des vibrations ultrasonores pour générer un brouillard composé de fines gouttelettes d'eau. En étudiant ces phénomènes, nous avons établi un lien avec les ondes stationnaires à la surface de l'eau, observées grâce à des vibrations générées par des haut-parleurs.

Nous avons également contacté M. Emmanuel FORT, chercheur à l'ESPCI. Ce dernier a confirmé la validité de nos observations et nous a orientés dans l'étude des instabilités de Faraday, un phénomène où des ondes stationnaires entraînent l'émission régulière de gouttelettes. Dans le cadre de nos recherches, nous avons analysé avec précision l'influence de la fréquence, de l'amplitude et de la viscosité.

Enfin, nous avons conclu nos travaux en illustrant clairement le lien entre les vibrations et le processus de brumisation. Nous nous préparons désormais à présenter une nouvelle expérience dans le cadre du concours national à Marseille.

Partenaires



Remerciements

- ④ M. Éric LENGAGNE, proviseur, Mme Delphine ANQUEZ, proviseur adjointe, M. Régis LOONIS, chef des travaux, et Mme Sophie NEYRINCK, agent comptable, constituent les personnels de direction du lycée E. BRANLY. Leur engagement, leur détermination et la confiance qu'ils ont su instiller ont été des facteurs essentiels à la réussite de nombreux projets.
- ④ M. Christophe BEAUMONT ainsi que ses équipes techniques s'adaptent à leur planning en libérant des créneaux chaque mercredi après-midi, alors que nous utilisons des salles habituellement inoccupées.
- ④ M. Didier SORET, professeur de mathématiques retraité depuis plus de 10 ans, reste néanmoins présent chaque mercredi après-midi pour nous encadrer, nous aider et nous soutenir dans ce projet, en nous consacrant généreusement son précieux temps chaque semaine.
- ④ Les personnels de laboratoire, et tout particulièrement Mme REMOND, technicienne, pour son aide précieuse, sa patience et son écoute attentive tout au long de notre projet.
- ④ Mme Sophie DEPERLECQUE, Mme Claire LISSARRE et Mme Sandrine THOREZ pour les nombreuses relectures et corrections qu'elles ont apportées à notre dossier.
- ④ M. Stéphane DEMARTHE, professeur de sciences de l'ingénieur et numérique et sciences informatiques, et M. Guillaume GAIGNEUR (OdP 2004), professeur de physique et de SNT (Sciences Numériques et Technologie) au lycée Branly, pour son aide précieuse dans la gestion et l'élaboration des différents programmes Python.
- ④ l'ensemble des professeurs de « SOS Math », qui assurent un soutien quotidien dans notre lycée entre 12 h et 14 h. Leur aide précieuse dans nos démonstrations et leurs nombreuses vérifications ont grandement contribué à la rigueur de notre travail.
- ④ M. Emmanuel FORT, professeur à l'ESPCI Paris, directeur de l'espace Pierre-Gilles de Gennes et spécialiste de l'interaction onde-matière, qui nous a conseillés, soutenus et consacré beaucoup de son temps. Grâce à lui, nous avons énormément appris lors de la visioconférence qu'il nous a offerte. Nous le remercions également pour son invitation à visiter l'ESPCI et l'EPGG.
- ④ M. Alain LEFEBVRE, Directeur d'IFREMER Boulogne-Sur-Mer, ainsi que MM. Gaël DANIEL et Romain LAMARRE, techniciens au lycée Léonard-de-Vinci de Calais, pour leur contribution aux mesures de viscosité des solutions de glycérol.
- ④ M. Olivier GENOUX, CPE au lycée Branly et président de la Maison des Lycéens, qui a accepté de nous prêter l'ensemble ampli et haut-parleur puissant de la Maison des Lycéens, comme il l'avait fait en 2007 avec M. Philippe LANCEL.
- ④ MM. Nicolas PERNET, Doctorant ESPCI 139^{ème} promotion (OdP 2009 & 2010, TS₂ Promotion Philippe LANCEL), Stéphane BRANLY, Étudiant UTCéen Data Scientist à l'EPSF (OdP 2018, TS₂ promotion Cédric VILLANI), Louis VADET, Étudiant polytechnicien (OdP 2018 & 2019, TS₂ promotion Jean-Michel COURTY), Cédric MANIER, professeur agrégé (OdP 2019, TS₂ promotion Dominique LANGEVIN), M^{elles} Eugénie GOBERT, Ingénieure EdF (OdP 2012 & 2013, TS₂ promotion Kamil FADEL), Laurine ANDRIEUX, Ingénieure (OdP 2014 & 2015, TS₂ promotion Pierre Gilles de GENNES), Juliette CHAVALLE, Étudiante ENV Lyon (OdP 2018, TS₂ promotion Cédric VILLANI), Léa DEMARTHE, Étudiante ENS Saclay (OdP 2020, TG₂ promotion Julien BOBROF) Aurore MARÉCHAL, Clara DEFRETIN (OdP 2021 & 2022, TG₂ promotion José BICO) Pour leurs idées, leurs conseils, et surtout pour la richesse de leur bibliographie ainsi que le matériel précieux qu'ils ont laissé dans le local des Olympiades.
- ④ Les jurys des finales nationales des Olympiades de Physique France et du concours C.Génial, qui nous ont sélectionnés et permis de vivre une aventure extraordinaire tout au long de notre année de première.
- ④ M. Michel FOULON, Professeur émérite des Universités, Université de Lille, et M. Jean-Marc BOUGENIÈRE, Professeur CPGE retraité, nos rapporteurs lors du concours interacadémique d'Hazebrouck, le 11 décembre 2024, pour leurs précieux conseils et leur expertise.
- ④ Nos camarades des différents groupes des Olympiades, avec qui nous avons partagé des moments inoubliables, et dont les observations pertinentes ont enrichi notre travail.
- ④ Nos premiers spectateurs, nos familles, qui nous ont aidés à améliorer notre projet en y apportant un regard extérieur et de précieux conseils sur l'utilisation des différents logiciels. Ils ont également su adapter leurs emplois du temps pour nous permettre de rester au lycée aussi longtemps que nécessaire afin de faire avancer notre travail.
- ④ Un grand merci à toutes celles et à tous ceux qui, depuis 1992, rendent les Olympiades de Physique possibles grâce à leur engagement et leur dévouement. Leur investissement permet de faire perdurer cet événement chaque année, offrant ainsi à de nouveaux élèves l'opportunité de vivre une aventure aussi enrichissante sur le plan humain que scientifique.
- ④ Notre professeur de physique au lycée E. BRANLY, M. Olivier BURIDANT, qui nous consacre chaque mercredi après-midi de longues heures, ainsi que d'autres moments dans la semaine, pour nous permettre d'explorer notre projet sous toutes ses facettes. Bien plus qu'un simple transmetteur de connaissances, il nous inspire l'envie et le plaisir d'apprendre, tout en nous encourageant à nous dépasser pour aller toujours plus loin.

Sommaire

Résumé	2
Partenaires	2
Remerciements	3
Introduction	5
Du brumisateur aux ondes de surface	6
Nos premiers essais avec le brumisateur	6
Le passage à l'eau vibrée	7
Première analogie eau / corde vibrante	8
Visio conférence avec Monsieur FORT	9
Le botafumeiro	10
Étude des instabilités de Faraday	12
Technique de mesure de l'amplitude d'un vibreur	12
Le miroir plan	12
La méthode dite de Poggendorff	12
La boule réfléchissante	13
Mesure de l'amplitude de notre haut-parleur	16
Influence de l'amplitude sur le seuil d'apparition des instabilités de Faraday	17
Influence de la viscosité sur l'apparition des instabilités de Faraday	17
L'expérience de Monsieur FORT	18
Retour sur la brumisation	19
Conclusion	19
Bibliographie	20

Annexes

Sommaire des annexes	III
Annexe A : Démonstration de la relation de tangente θ	III
Annexe B : Relation entre les vecteurs unitaires incident et réfléchi	VII
Annexe C : Signification physique du motif M	VII
Annexe D : Code python pour visualiser la variation de $\tan(\theta)$ en fonction de h	VIII
Annexe E : Test de la limite de validité du modèle	X
Annexe F : Quelques rappels	XIV
Annexe G : Les Olympiades vues par Inès.	XV
Annexe H : Les Olympiades vues par Jeanne	XVI
Annexe I : Les Olympiades vues par Juliette	XVII
Annexe J : Les Olympiades vues par Lilou	XVIII
Annexe K : Les Olympiades vues par Louise	XIX
Annexe L : Les Olympiades vues par Tom	XX

Introduction

2024 restera une année extraordinaire, marquée par l'incroyable ferveur des Jeux Olympiques de Paris. Des lieux emblématiques tels que la Tour Eiffel, le Trocadéro, le Grand Palais ou encore le Château de Versailles ont accueilli des épreuves spectaculaires, devenues de véritables célébrations collectives du sport et de ses valeurs. Personne n'oubliera les exploits de Léon Marchand, de Teddy Riner, ni des milliers d'autres athlètes qui ont illuminé ces jeux.

Si Paris célébrait en 2024 l'excellence sportive des Jeux Olympiques, nous avons, à notre échelle, vécu notre propre aventure olympique sur le terrain de la physique, avec la même passion et la quête de dépassement de soi. Nous y avons découvert la joie de l'universalité de la science et le plaisir du partage d'expériences. Après une première aventure avec notre projet « Le turbulent et Zadig »(1), qui nous a menés jusqu'à la finale nationale des Olympiades de Physique France à Paris et au prestigieux concours C.Génial sous le Concorde, notre motivation est à son comble pour relever un nouveau défi.

Cette première participation a été une expérience extrêmement enrichissante, tant sur le plan de la rigueur scientifique que du développement de nos capacités d'analyse. Au-delà de l'aspect purement scientifique, elle nous a permis de renforcer notre esprit de camaraderie, d'améliorer notre travail en équipe et d'acquérir des compétences en communication. Ce projet nous offre l'opportunité de partager nos idées, de nous inspirer des approches variées et d'aller bien au-delà des connaissances dispensées dans les cours classiques.

Le concours national s'achève en apothéose par une journée d'exposition ouverte à un public incroyablement diversifié, une véritable effervescence d'idées, de découvertes et d'échanges. Nous explorons les projets des groupes voisins, fascinés par leurs démarches et leurs trouvailles, tout en accueillant les regards curieux de professeurs et de chercheurs venus jauger les idées des "petits jeunes", souvent avec des conseils bienveillants et inspirants. Mais ce sont les enfants qui laissent une empreinte particulière dans nos souvenirs. Leurs yeux brillent de cette curiosité pure, ce mélange d'émerveillement et de soif de comprendre. Il faut alors trouver les bons mots, les bonnes images, pour expliquer simplement ce qui, pour nous, représente des mois de travail acharné. Et lorsque l'un d'eux revient quelques minutes plus tard, tenant fièrement la main de sa mamie pour lui montrer ce qu'il a appris, nous savons que nous avons touché quelque chose de profond.

C'est une expérience à la fois intense et bouleversante, un moment suspendu où les générations se croisent, où la passion de transmettre et de partager devient palpable. C'est une aventure que chacun devrait avoir la chance de vivre, ne serait-ce qu'une fois, pour ressentir cette magie unique et cette humanité partagée.



Un souvenir emblématique, chargé d'émotion et de fierté, qui illumine notre année de première au lycée.

Après cette journée riche en échanges, une conférence accessible au grand public précède la cérémonie de remise des prix. Lors de la cérémonie qui clôture ces Olympiades, M. Jean-François Aubry a remis le prix de la "Focused Ultrasound Foundation" au lycée Bernard-Palissy d'Agen. Plus tôt dans la journée, nous avons eu le plaisir d'échanger avec lui. Son laboratoire développe des techniques innovantes pour détruire des tumeurs cérébrales grâce aux ultrasons. Ils ne sont pas uniquement un outil de diagnostic mais sont également un outil thérapeutique, il nous met sur la piste des brumisateurs à ultrasons : l'idée est née. Ce sera le support de notre sujet d'Olympiades 2025.

Portés par l'inspiration de notre rencontre avec M. Aubry et le bouillonnement d'idées suscité par les Olympiades, nous avons entamé l'approfondissement de notre cours sur les ondes. Ce nouvel apprentissage, centré sur la célérité des ondes à la surface de l'eau, marque les premières étapes de notre réflexion pour 2025.

- [Comment fonctionne un brumisateur à ultrasons ?](#)
- [Peut-on établir une analogie avec des phénomènes que nous connaissons déjà ?](#)

Pour répondre à ces questions, nous avons eu la chance de pouvoir contacter M. Emmanuel FORT. Grâce à ses explications précieuses, il nous a grandement aidés à approfondir notre travail.

Du brumisateur aux ondes de surface

Nos premiers essais avec le brumisateur

Les brumisateurs à ultrasons sont largement utilisés, tant à des fins décoratives que médicales. En effet, bien qu'ils soient fréquemment choisis pour produire un brouillard esthétique et apaisant, ces appareils

s jouent également un rôle clé dans le domaine de la santé, notamment dans les inhalateurs à basse température utilisés pour traiter les affections respiratoires. Ils sont également couramment employés dans les élevages de volailles et les serres pour réguler l'humidité. Leur utilisation est donc très répandue.

Nous avons acquis un brumisateur pour quelques euros..



Notre brumisateur

L'appareil se compose d'un bloc d'alimentation et d'un transducteur. Ce dernier contient un circuit électronique qui fait vibrer une pastille de céramique à une fréquence élevée de 15 MHz, selon la notice de l'appareil. Son fonctionnement est simple : il suffit de le plonger dans l'eau, puis, une fois mis sous tension, un brouillard apparaît rapidement à la surface. C'est cet effet que l'on cherche généralement à obtenir.

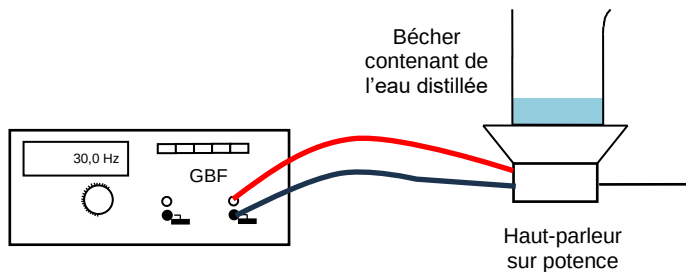


Ce brouillard est froid et constitué de fines gouttelettes d'eau, facilement condensables. La température de l'eau dans le récipient reste stable et proche de celle de la pièce. Cependant, lorsque l'on pose un doigt au-dessus de la cellule, sur la surface de l'eau, on ressent un picotement thermique sur la peau, ce qui incite à retirer rapidement le doigt. Un thermomètre placé à cet endroit ne révèle aucune température dangereuse. Mais que mesurons-nous réellement ? L'eau, libre de circuler, montre même des mouvements à sa surface. Nous avons compartimenté notre récipient en cellules élémentaires à l'aide de films alimentaires, et il semble que les ultrasons traversent ces cloisons, provoquant un phénomène de surface similaire à celui observé dans le reste du récipient.

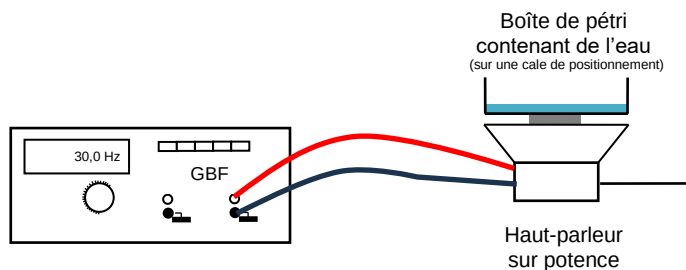
Ne disposant pas d'instruments pour détecter les ultrasons, nous n'avons pas pu cartographier l'intensité des ondes ultrasonores dans notre récipient. Nous avons donc cherché à comprendre l'origine de la formation des gouttelettes. Très rapidement, lors de nos recherches en ligne, nous avons découvert un site de physique de l'Université de Lille (<https://phymain.unisciel.fr/le-brumisateur-et-les-ondes-de-faraday/index.html>) qui nous a orientés vers l'étude des vibrations dans un récipient d'eau.

Le passage à l'eau vibrée

Pour étudier le comportement de l'eau lorsqu'elle est soumise à une sollicitation alternative verticale, nous avons choisi de placer un bécher sur un haut-parleur. La vibration de la membrane du haut-parleur se transmet ainsi à la colonne d'eau qui se trouve au-dessus, permettant d'observer l'effet des oscillations sur le liquide. Le montage expérimental que nous avons utilisé était le suivant :



Très rapidement, afin d'éviter tout risque d'accident, nous avons stabilisé le haut-parleur et le bécher en les fixant ensemble à l'aide de pâte adhésive (Blu Tack™). En étudiant l'influence de la quantité d'eau, nous avons constaté que la masse du bécher en verre était parfois plus importante que celle de l'eau elle-même. Nous avons donc opté pour des contenants en plastique à fond plat : des pots plastiques remplis de résine pour aplatir le fond, ou encore des boîtes de Petri jetables, que nous avons empruntées aux laboratoires de biochimie et de SVT de notre lycée.

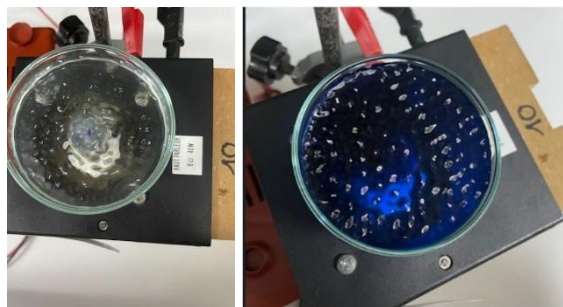


En augmentant la fréquence progressivement, nous avons pu observer qu'au-delà d'un certain seuil, on voit apparaître des ondulations à la surface de l'eau, des vagues apparaissent à la surface de l'eau.



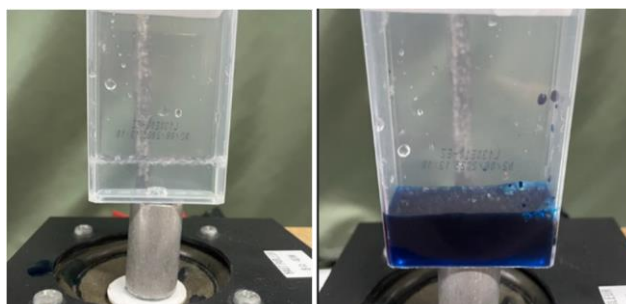
Schéma d'une coupe de boîte de Pétri présentant des vagues à la surface

Pour photographier le phénomène vous avons choisi de mettre un colorant alimentaire.



Onde à la surface de la boîte de Petri sans et avec colorant

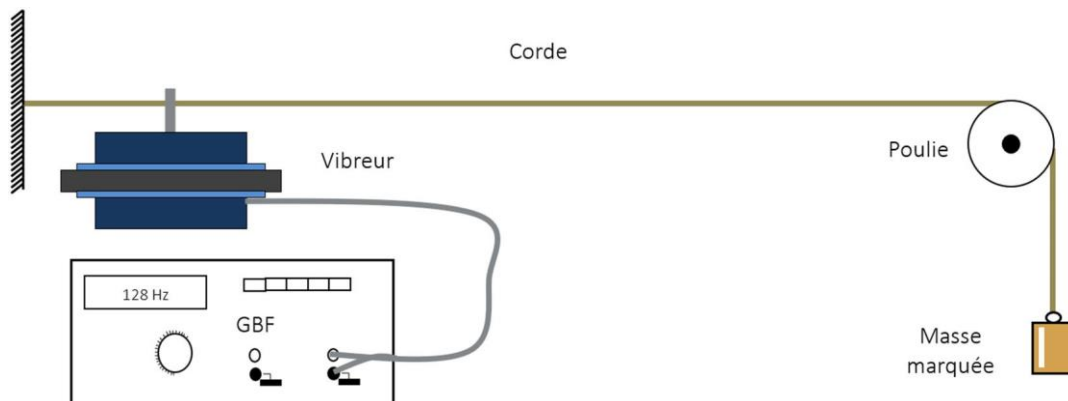
Les observations sont assez difficiles à visualiser sur ces photos. Pour y remédier, nous avons opté pour une cuve légère, permettant de prendre des photos de côté : une boîte de Tic-Tac™.



Première analogie eau / corde vibrante

Ces vagues qui se forment à la surface de l'eau, nous rappellent le phénomène des ondes sur la corde de Melde(2-4), abordé en cours d'enseignement scientifique dans le cadre de l'acoustique musicale.

Une corde est fixée entre un vibreur vertical et une poulie, une masse permet de la tendre et de régler sa tension.



Lorsque le GBF n'est pas en marche, il est possible de faire vibrer la corde en la grattant ou en la frappant, comme on le ferait avec une corde de guitare ou de piano. Dans ce cas, elle oscille librement.

Lorsque le GBF est en fonctionnement, les oscillations deviennent forcées. À une fréquence spécifique, la corde adopte la forme d'un fuseau.



Lorsque la corde entre en résonance, l'amplitude du mouvement au centre de la corde devient bien supérieure à celle près de l'extrémité du vibreur. Cette fréquence est appelée fréquence fondamentale.

En augmentant progressivement la fréquence, on observe l'apparition de différents modes de vibration, appelés harmoniques.

- Fondamental : f_1
- Harmonique 2 : $f_2 = 2f_1$
- Harmonique 3 : $f_3 = 3f_1$
- Harmonique 4 : $f_4 = 4f_1$

Les zones où l'amplitude des vibrations est maximale sont appelées "ventres de vibration", alors que les zones où il n'y a pas de mouvement sont appelées "nœuds de vibration".

La fréquence du fondamental est donnée par la relation.

$$f_1 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

Où :

- L est la longueur de la corde en mètre, m ,
- T , la force de tension en newton, N ,
- μ , la masse linéique, la masse d'un mètre de corde, en $kg.m^{-1}$.

Selon M.FORT les instabilités de Faraday sont des ondes stationnaires.

Visio conférence avec Monsieur FORT

Nous avons tenté de contacter plusieurs chercheurs afin d'obtenir leur aide pour mieux comprendre les phénomènes observés, mais malheureusement, nous avons reçu un grand nombre de réponses négatives ou aucune réponse. Heureusement, M. Emmanuel FORT, professeur à l'ESPCI Paris, Directeur de l'espace Pierre Gilles de Gennes, spécialiste de l'interaction onde-matière, a accepté de répondre à notre demande par e-mail.

Cette réponse s'est révélée être une véritable mine d'informations. M. FORT nous a proposé plusieurs articles, ainsi que des sujets de concours(5), dont certains sont en français, un article de *Nature*¹(6), et la thèse de l'un de ses étudiants(7). Bien que l'Anglais soit assez accessible, ces documents restent bien au-delà de notre niveau de terminale. Notre professeur éprouve également des difficultés à tout saisir, il nous autorise à le dire. Cependant, comme il nous le répète souvent, depuis Newton, les articles sont généralement bien illustrés, et les schémas aident grandement à la compréhension des concepts. C'est ce que nous faisons : nous nous appuyons sur ces illustrations pour corriger certaines erreurs que nous avons commises et, surtout, pour identifier de nouvelles pistes qui nous permettront de continuer à progresser dans notre compréhension.

Surtout le mail de Monsieur FORT se terminait par : « *Bonne continuation et n'hésitez pas à revenir vers moi pour toute question complémentaire (On peut faire un zoom si vous voulez)* ». Évidemment, nous avons accepté, en précisant toutefois nos contraintes liées à nos emplois du temps, aux devoirs surveillés, compétitions sportives et aux inscriptions au bac. Eh bien, un scientifique de cette envergure, certainement très occupé, a réussi à se libérer pour organiser avec nous une visioconférence un mercredi en début d'après-midi.



Photos prises lors de la visioconférence avec M. SORET

La visioconférence se déroule en toute simplicité, donnant l'impression que lui et son doctorant sont venus nous rendre visite spontanément au lycée. Nous projetons les images sur le vidéoprojecteur et avons disposé notre matériel sur la table. Nous avons l'impression très agréable de revivre l'atmosphère de l'exposition publique du concours national. La discussion est fluide, directe et dépourvue de tout artifice.

Nos deux interlocuteurs s'adaptent à notre niveau de compréhension : ils s'expriment en termes simples et s'assurent que nous comprenons bien leurs explications. Nous abordons de nombreux points techniques, notamment sur les vibreurs, les haut-parleurs, les amplificateurs, la forme des signaux, les mesures d'amplitude et l'évaluation de l'accélération. Monsieur FORT nous impressionne car il reconnaît immédiatement le modèle de notre vibreur de Melde dès que nous le lui présentons. Il identifie le modèle et se rappelle même qu'il est équipé d'un fusible intégré d'un ampère, ce que Monsieur BURIDANT confirme. Nos GBF ne semblent pas assez puissants. Les intensités délivrées sont probablement bien inférieures à leur valeur maximale possible, ce qui limite l'amplitude de nos signaux. On nous recommande donc d'utiliser un amplificateur... de guitare.

Nous abordons également des notions théoriques et des termes spécifiques, tels que l'origine des ondes observées ou leurs caractéristiques. Ils confirment le lien entre les ondes à la surface de l'eau et le nébulisateur à ultrasons : tout se résume à une question de fréquence. Nos spécialistes, toujours avec la même bienveillance exemplaire, s'efforcent de transmettre des explications claires et accessibles, en vulgarisant sans jamais tomber dans la simplification excessive. Ils nous proposent des expériences supplémentaires accompagnées de très précieux conseils pour les mener à bien. Enfin, ils nous encouragent à partager avec eux nos résultats et même à envisager une prochaine visioconférence pour poursuivre les échanges.

Pour terminer la visioconférence, M. FORT nous a invités à visiter son laboratoire dès que possible, que ce soit en groupe ou individuellement, selon nos disponibilités. Cette occasion nous permettra non seulement de refaire nos expériences dans un cadre professionnel, mais aussi de découvrir le métier de chercheur et les perspectives offertes par une classe préparatoire. Nous avons déjà commencé à organiser notre visite.

Enfin, nous souhaitons remercier chaleureusement M. FORT pour sa disponibilité, sa gentillesse et sa bienveillance. Prendre le temps d'aider de jeunes lycéens confrontés à des expériences complexes est un geste rare, surtout pour un chercheur avec autant de responsabilités et un emploi du temps si chargé. Merci, Monsieur, pour cette après-midi à la fois constructive et très enrichissante.

Remarque : cette page a été publiée après relecture et approbation des intervenants concernés.

¹ *Nature* est une revue scientifique de référence, reconnue mondialement pour sa rigueur et son prestige. Dans le domaine de la physique, l'une de ses principales publications est *Nature Physics*, elle est accessible à l'adresse suivante : <https://www.nature.com/nphys/>. Cette revue, sérieuse et de grande qualité, est également présente sur Instagram à l'adresse <https://www.instagram.com/nature.physics/>, et offre un accès plus interactif à ses contenus et à ses dernières publications.

Le botafumeiro

Le Botafumeiro est le nom donné à l'encensoir emblématique de la cathédrale de Saint-Jacques-de-Compostelle. Cet objet liturgique impressionne par ses dimensions : il mesure 1,60 mètre de haut, pèse 54 kg et est suspendu à une hauteur de 32 mètres. Sa manipulation requiert la coordination de huit moines, appelés thuriféraires.

Le mouvement de l'encensoir est particulièrement spectaculaire : ses oscillations lui permettent d'atteindre une hauteur de plus de 20 mètres, soit presque l'équivalent de la hauteur de notre lycée. Ce phénomène illustre parfaitement le principe d'un oscillateur paramétrique(8–11).

Un pendule simple est constitué par un objet ponctuel de masse m suspendu à un point O fixe par un fil inextensible de longueur L .

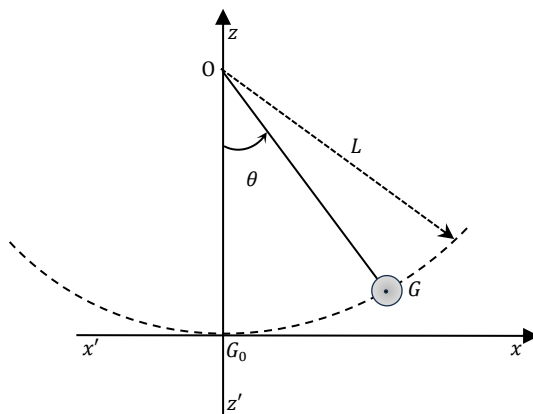


Schéma de principe d'un pendule simple

Pour de petites oscillations, on parle d'isochronisme(4,9–11) car la période est identique et vaut :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

- T est la période en seconde, s.
- L la longueur du pendule en mètre, m.
- g , l'accélération de la pesanteur, $g=9,81 \text{ m.s}^{-2}$.

Pour un petit pendule de 25,0 cm

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{0,250}{9,81}} = 1,00 \text{ s}$$

Nous avons une fréquence de 1Hz.

Pour mieux comprendre le mécanisme du Botafumeiro, nous avons réalisé un montage destiné à reproduire et expliquer son mouvement.

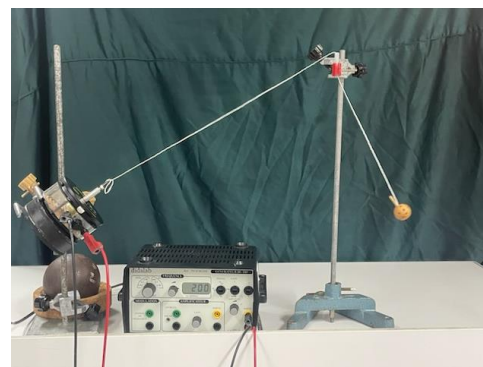
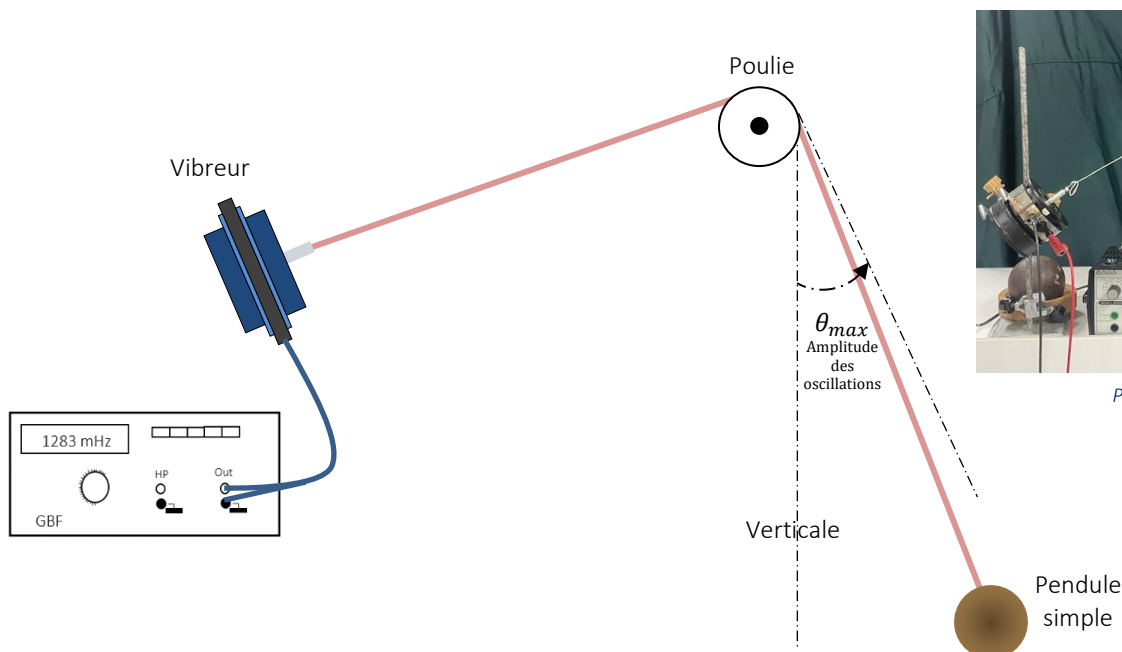
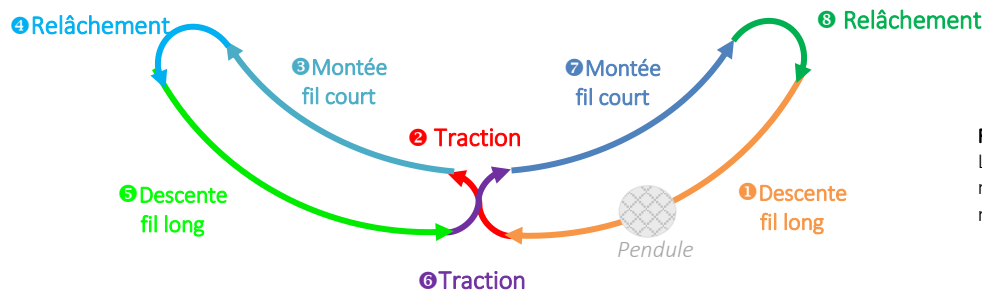


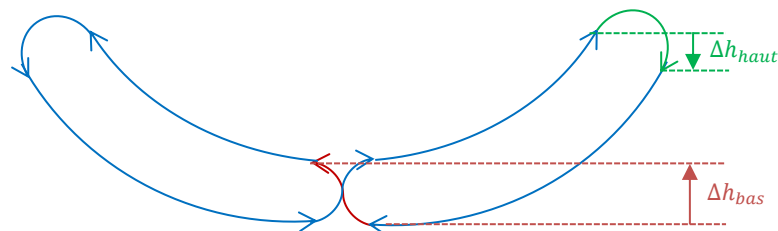
Photo de notre montage

On peut schématiser le mouvement du pendule comme ci-dessous (les allures des tractions et relâchements ne sont pas réalistes mais simplifiées)



Remarque importante :
Les allures des tractions et relâchements ne sont pas réalistes mais simplifiées

L'opération est cyclique.



Si l'on simplifie en considérant que les allongements et raccourcissements des cordes se produisent uniquement aux sommets et aux points bas, les différences de hauteur entre la fin de la descente et le début de la montée (Δh_{bas}) et entre la fin de la montée et le début de la descente (Δh_{haut}) ne sont pas identiques. Cette asymétrie introduit une légère quantité d'énergie dans le système à chaque cycle. Par conséquent, l'amplitude des oscillations augmente progressivement, entraînant le système en résonance.

On réalise deux manœuvres par oscillation du pendule. Par conséquent, la fréquence excitatrice, f_e , vaut deux fois la fréquence propre du pendule simple f_0 .

$$f_e = 2f_0$$

C'est une signature de ce type d'oscillateur paramétrique.

Cela nous rappelle un autre phénomène. Le problème de la queue de cheval est bien connu de toutes les filles lors des cours de sport. Lorsqu'on court elle fait un aller-retour tous les deux impacts au sol. La fréquence de ces oscillations est la moitié de celle des impacts au sol.



Images extraites d'une vidéo faite dans la mezzanine de notre lycée

Ici, les cheveux oscillent de gauche à droite. La queue de cheval effectue 1,5 oscillations pour 3 impacts au sol. La fréquence d'oscillation des cheveux est la moitié de celles des pas (12,13).

Il n'est pas utile d'aller à Saint Jacques de Compostelle pour observer des oscillateurs de ce type là.

Étude des instabilités de Faraday

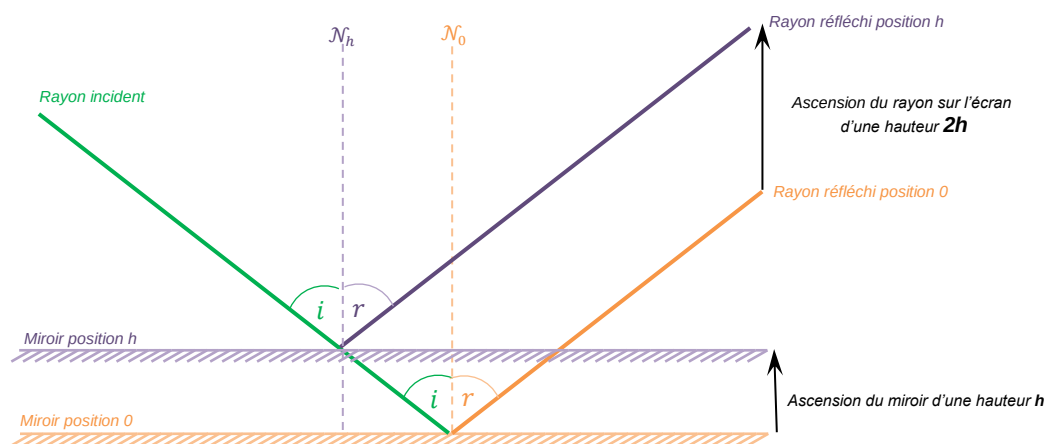
Nous avons décidé d'étudier les instabilités de Faraday, un phénomène qui apparaît à la surface d'un fluide soumis à une excitation verticale périodique. Notre objectif est d'analyser les paramètres influençant ces instabilités, tels que la fréquence, l'amplitude de vibration et les propriétés du fluide. En observant les formes des ondes générées, nous chercherons à comprendre comment ces paramètres modifient la stabilité et l'organisation des motifs.

Technique de mesure de l'amplitude d'un vibreur

L'amplitude du vibreur influence directement celle des ondes à la surface de la cuve. Nous avons observé visuellement que l'amplitude du haut-parleur varie en fonction de la fréquence. À des fréquences très basses, de l'ordre de quelques millihertz, il est relativement facile de mesurer l'écart entre les positions extrêmes à l'aide d'une règle graduée. Toutefois, lorsque la fréquence atteint quelques dizaines de hertz, cette mesure devient beaucoup plus complexe. Comment peut-on mesurer cette amplitude avec précision ? Dès le début, nous avons naturellement envisagé d'utiliser des méthodes optiques.

Le miroir plan

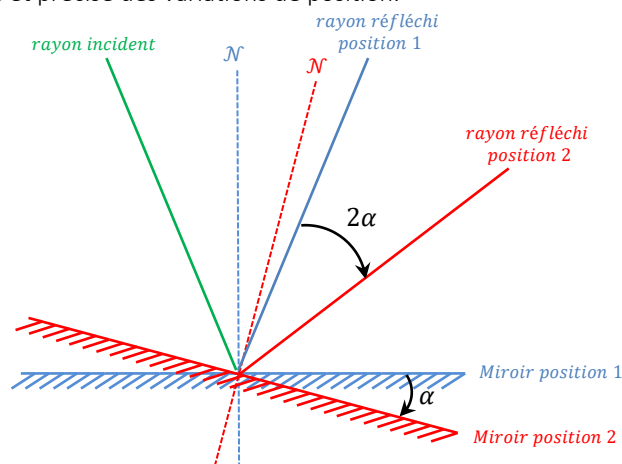
La première idée qui nous est venue (partagée également par notre jury académique) consiste à placer un miroir plan sur la membrane. Cependant, une simple analyse géométrique basée sur la symétrie montre que si le miroir s'élève d'une hauteur h , la position du spot réfléchi sur l'écran se déplace d'une hauteur double, soit $2h$.



Cela revient simplement à transférer le problème de la mesure du déplacement de la membrane du haut-parleur à celui de l'écran. Si cela offre un léger gain en confort, cela n'améliore ni la précision ni la simplicité de la méthode.

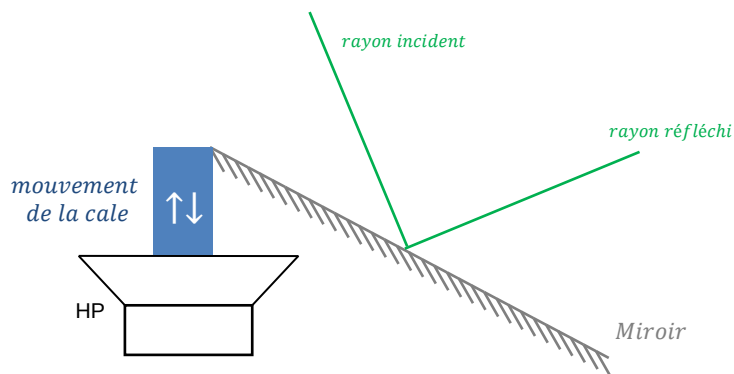
La méthode dite de Poggendorff

Bien que de nombreux exercices fassent référence à cette technique, nous n'avons trouvé aucune source bibliographique établissant un lien direct entre cette méthode et Johann Christian Poggendorff. Elle repose sur l'utilisation d'un miroir tournant pour mesurer des déplacements ou des oscillations. En réfléchissant un faisceau lumineux, le miroir amplifie les petits mouvements grâce à l'angle de rotation, permettant ainsi une mesure indirecte et précise des variations de position.



On démontre facilement qu'une rotation du miroir d'un angle α entraîne une rotation du rayon réfléchi de 2α . Cette propriété est au cœur des exercices portant sur la méthode dite de Poggendorff.

Nous avons tenté de positionner un miroir en appui sur deux points : d'un côté, une cale légère fixée à la membrane d'un haut-parleur, et de l'autre, un support rigide. L'idée est que les mouvements de va-et-vient de la membrane, transmis par la cale, induisent une oscillation d'un côté du miroir. Plus la longueur du miroir est réduite, plus la variation de son angle par rapport à l'horizontale devient significative, amplifiant ainsi les petits déplacements de la membrane.



L'idée est séduisante en théorie, mais sa mise en œuvre s'avère délicate pour plusieurs raisons. Tout d'abord, les amplitudes de déplacement, pouvant dépasser un centimètre, posent des contraintes importantes. De plus, des phénomènes de flexion se produisent au niveau du point d'appui sur la cale. À ce jour, aucun adhésif, ni même un joint en silicone, n'a été capable de résister durablement à des flexions répétées à une fréquence de 10 oscillations par seconde ou plus.

Après plusieurs tentatives infructueuses, une idée nous est venue en réutilisant les décorations de Noël.

La boule réfléchissante

Le principe est simple : l'angle du rayon réfléchi par une boule réfléchissante dépend de la position du point d'incidence, à condition que le rayon incident ne soit pas parallèle à la direction de déplacement de la boule.

Notre montage :

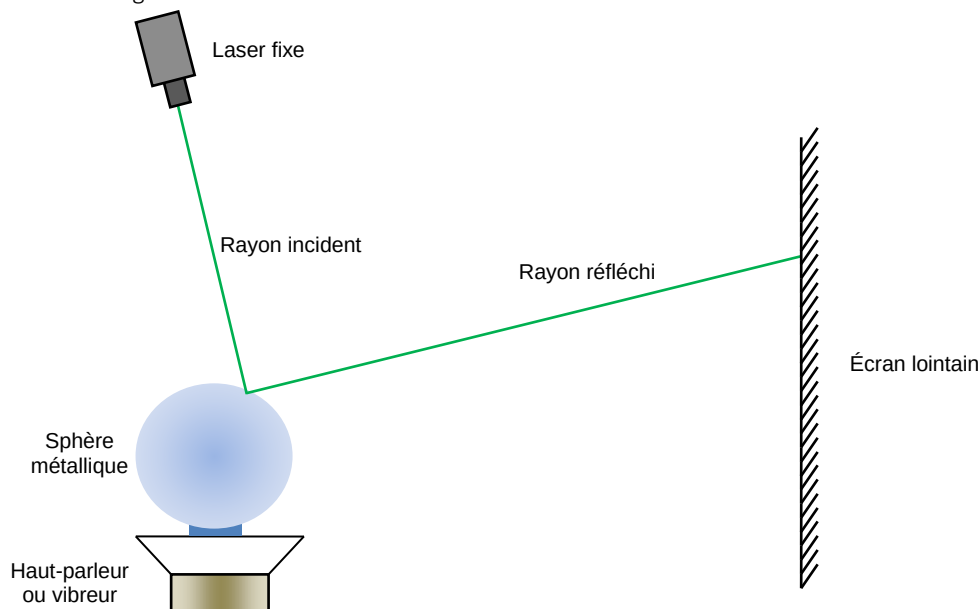
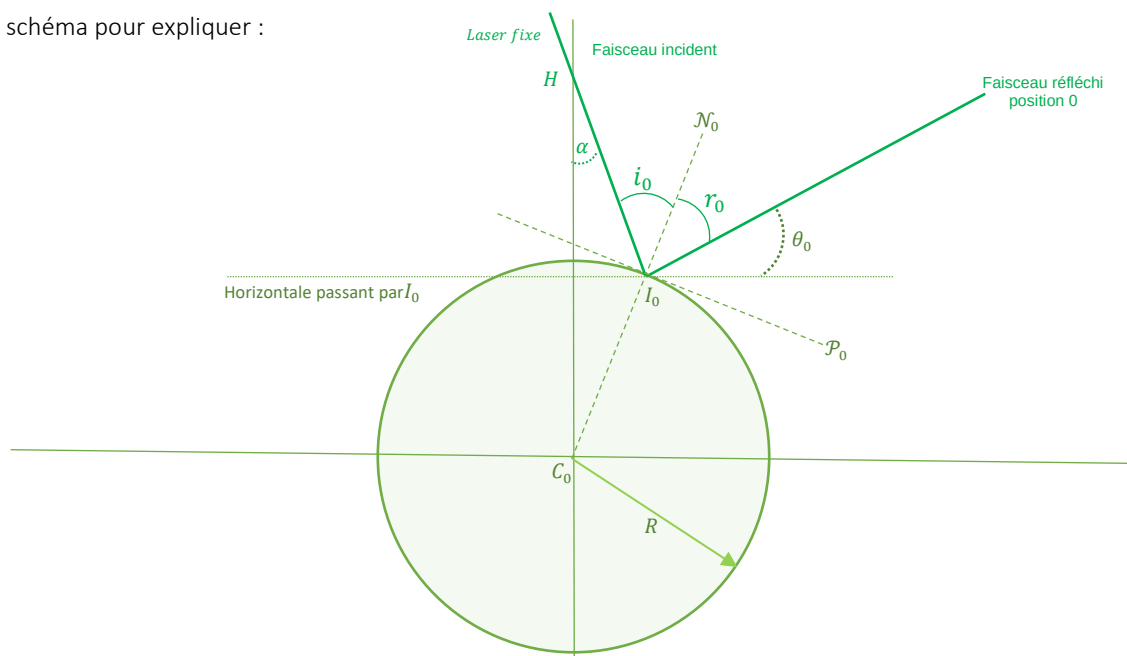


Schéma de principe de notre montage pour mesurer l'amplitude



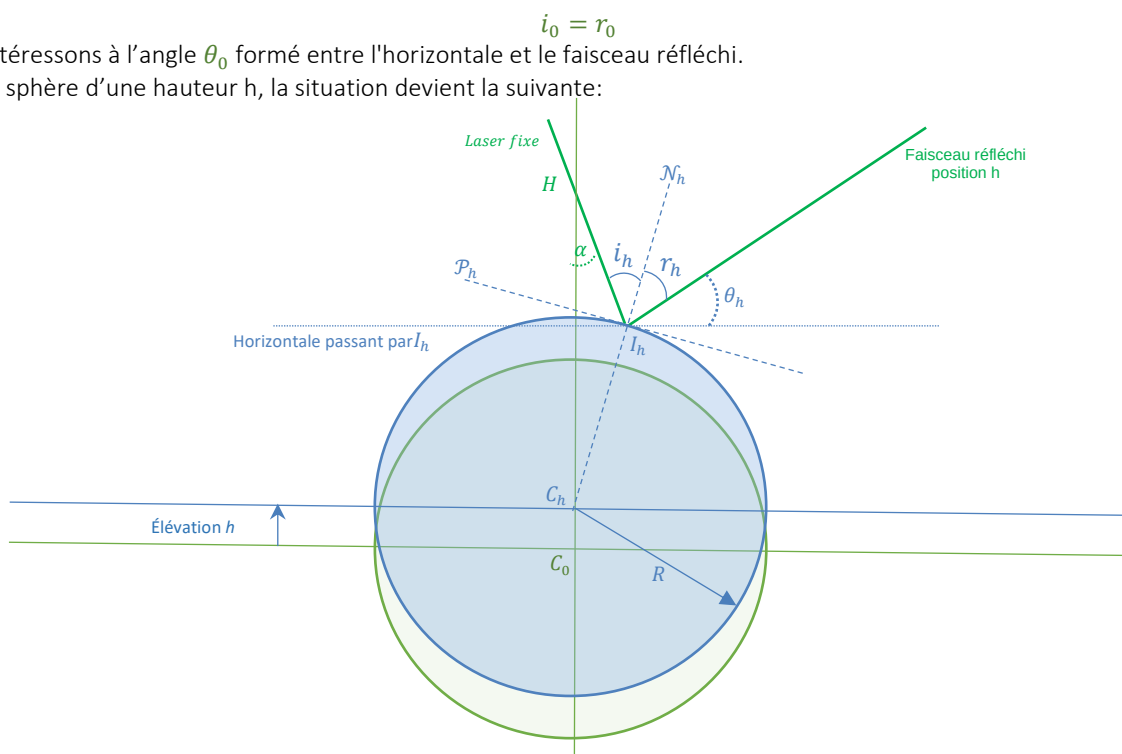
Photo de notre montage depuis l'écran

Faisons un schéma pour expliquer :



Un faisceau laser, formant un angle α avec la verticale (coupée en H), est envoyé sur une sphère de rayon R de centre C_0 . Le rayon incident atteint la sphère en I_0 . On définit β comme l'angle entre la verticale et le segment $[C_0I_0]$. Un plan $\mathcal{P}_0$ est alors défini comme étant tangent à la sphère en I_0 , et une normale $\mathcal{N}_0$ de même direction que le rayon $[C_0I_0]$. On note i_0 l'angle entre le faisceau incident et la normale, et r_0 l'angle entre le faisceau réfléchi et cette perpendiculaire au dioptré. Selon la première loi de Descartes

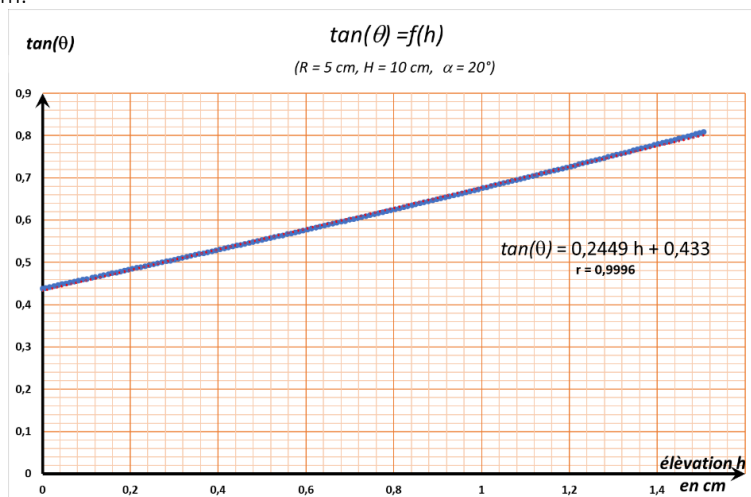
Nous nous intéressons à l'angle θ_0 formé entre l'horizontale et le faisceau réfléchi. Si on élève la sphère d'une hauteur h , la situation devient la suivante:



Seuls le rayon R , le point H et l'angle α demeurent constants. Tous les autres paramètres varient, notamment l'angle θ_0 qui devient θ_h .

Nous avons d'abord réalisé une simulation dans Géogébra² pour enregistrer les valeurs de θ_h en fonction de h dans un tableur intégré, qui permet également de calculer $\tan(\theta_h)$.

Pour un rayon $R = 5,0 \text{ cm}$, un point $H = 10,0 \text{ cm}$ et un angle $\alpha = 20^\circ$ nous obtenons le graphique suivant pour des valeurs de h comprises entre 0 et 1,5 cm.



Nous avons réussi à modéliser les variations de $\tan(\theta_h)$ en fonction des différents paramètres, et nous avons développé un programme en Python pour visualiser ces variations (voir annexes A à E).

Compte tenu des excellentes corrélations observées, nous pouvons conclure que $\tan(\theta_h)$ varie de manière linéaire avec h . Nous avons donc choisi d'utiliser cette méthode pour mesurer l'amplitude de notre vibreur.

Explication des phénomènes observés

Nous avons constaté qu'au cours de l'utilisation de notre système composé d'un laser et d'une boule, le faisceau subissait un élargissement considérable. Dans un premier temps, nous avons envisagé que ce phénomène soit dû à la diffraction, un concept récemment étudié en classe. Cependant, nous avons rapidement écarté cette hypothèse pour plusieurs raisons : l'absence d'éléments diffractants tels qu'une fente, un fil ou un motif texturé sur la surface de la sphère (hormis de légères traces de doigts), et surtout le

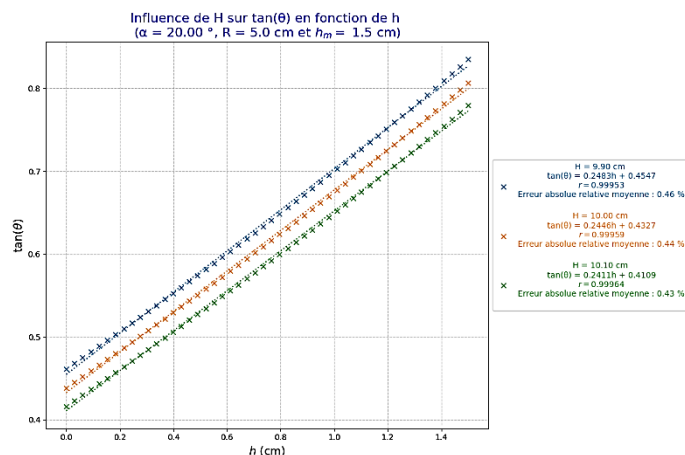
² Géogébra est un logiciel libre que nous utilisons depuis le collège en mathématiques, il est téléchargeable sur <https://www.geogebra.org/> ou utilisable en ligne

fait que nous observons un unique spot lumineux sans la présence d'anneaux concentriques caractéristiques des figures de diffraction, comme les anneaux d'Airy(2).

Nous avons alors pris en compte deux caractéristiques importantes de notre laser : d'une part, il ne s'agit pas d'un faisceau idéal comme dans les modèles théoriques, car il possède une épaisseur finie ; d'autre part, il n'est pas strictement unidirectionnel, puisqu'il présente une légère divergence(9–11). Pour intégrer ces paramètres à notre analyse, nous avons apporté des modifications à notre programme Python afin de simuler leur influence et d'évaluer leurs effets sur les résultats.

Influence de la largeur du faisceau

Selon la documentation technique de notre laser, le diamètre du faisceau est de 2 mm. Pour simuler cet aspect, nous avons modélisé la propagation de trois rayons idéaux aux hauteurs H de 9,9 cm, 10,0 cm et 10,1 cm. Les résultats de cette simulation sont présentés ci-dessous.



Tout d'abord, nous constatons une excellente corrélation constante et une faible erreur absolue moyenne relative. Les coefficients directeurs des rayons sont très proches, indiquant que ces derniers évoluent presque parallèlement pour toutes les altitudes h .

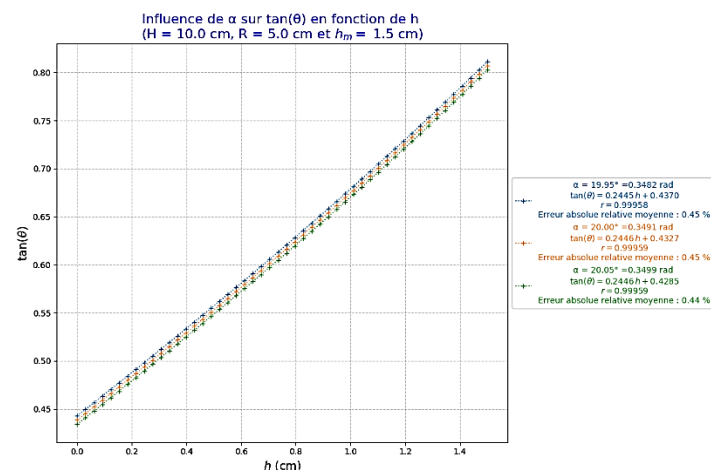
Concentrons-nous sur le cas $h = 0$ cm. En examinant les ordonnées à l'origine des simulations : pour $H = 9,90$ cm, la valeur est de 0,4547 et pour $H = 10,10$ cm, elle est de 0,4109. Le différentiel entre ces valeurs est $0,4547 - 0,4109 = 0,0438$.

Ce différentiel des tangentes implique qu'à une distance de 1 m de l'écran, l'écart entre ces deux rayons idéaux atteint 4,4 cm, révélant un élargissement significatif du faisceau.

Influence de la divergence du faisceau

Selon les spécifications techniques de notre laser, la divergence du faisceau est de 1,2 mrad. Cela correspond à une divergence d'environ 0,60 mrad de chaque côté par rapport à l'axe central, soit approximativement un angle total de $0,05^\circ$.

Pour tenir compte de cette caractéristique, nous avons modifié notre programme afin de simuler la propagation de trois rayons idéaux inclinés respectivement à $19,95^\circ$, 20° et $20,05^\circ$. Les résultats de cette simulation sont présentés ci-dessous.



Une nouvelle fois, nous observons une corrélation remarquable et une erreur absolue moyenne très faible. Les coefficients directeurs des droites de régression étant très similaires, cela montre qu'ils évoluent de manière quasi identique pour toutes les altitudes.

En examinant le cas $h = 0$ cm. Les ordonnées à l'origine des simulations : pour $\alpha = 19,95^\circ$, la valeur est de 0,4370 et pour $\alpha = 20,05^\circ$, elle est de 0,4285. La différence entre ces valeurs est $0,4370 - 0,4285 = 0,0085$.

Cette différence montre qu'à une distance de 1 m de l'écran, l'écart entre ces deux rayons idéaux atteint près de 9 mm, il y a un élargissement significatif du faisceau du fait de la divergence du faisceau.

La géométrie réelle du faisceau laser contribue effectivement à l'élargissement du spot sur l'écran. Parmi les facteurs étudiés, l'effet de la largeur initiale du faisceau s'avère significativement plus important que celui de sa divergence naturelle. Afin de réduire cet élargissement, nous avons décidé de diminuer le diamètre du faisceau à 1 mm. Bien que cette modification introduise un phénomène de diffraction, la principale limitation réside dans la perte de luminosité qui en résulte.

La taille de la tâche de diffraction peut être estimée à l'aide de la relation suivante :

$$\theta_{\text{trou}} = \frac{1,22 \lambda}{a}$$

Où λ est la longueur d'onde du laser (ici $\lambda = 532$ nm), et a est le diamètre de l'ouverture, fixé à 1,0 mm.

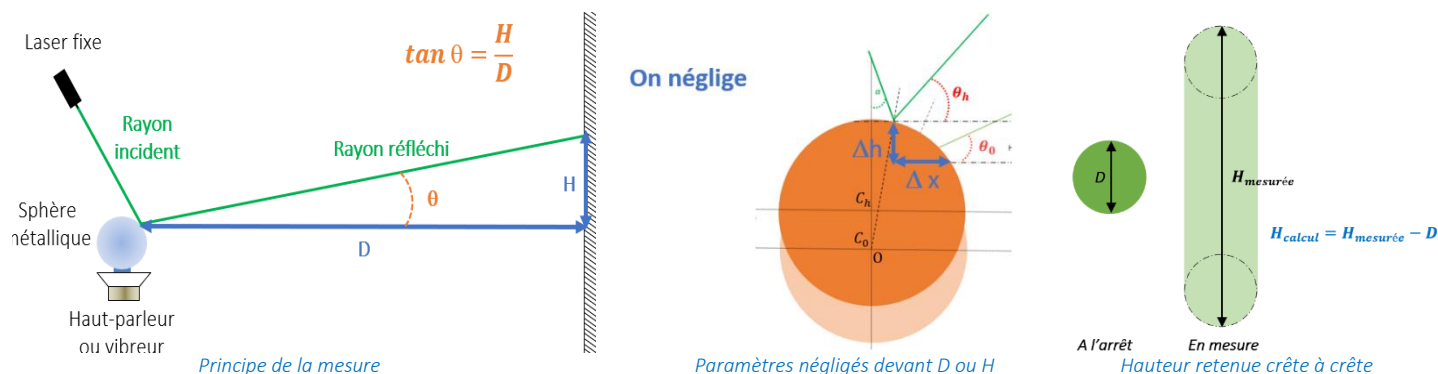
En effectuant le calcul :

$$\theta_{\text{trou}} = \frac{1,22 \times 532 \cdot 10^{-9}}{1,0 \cdot 10^{-3}} = 6,5 \cdot 10^{-5} \text{ rad} = 0,65 \text{ mrad}$$

Nous constatons ainsi que la diffraction ajoute une contribution angulaire équivalente à celle de la divergence initiale du faisceau. Cette contrainte est plus faible que l'effet de la largeur du faisceau.

Mesure de l'amplitude de notre haut-parleur

Nous avons mesuré le mouvement de la membrane d'un haut-parleur. Pour cela, nous avons utilisé un GBF et un haut-parleur provenant d'une dotation de 1992. Le montage consistait à fixer une boule réfléchissante sur la membrane, éclairée par un laser. Le faisceau était projeté sur un mur blanc au fond de la salle (à 10,62 m), où une bande de papier servait à noter les positions relevées.



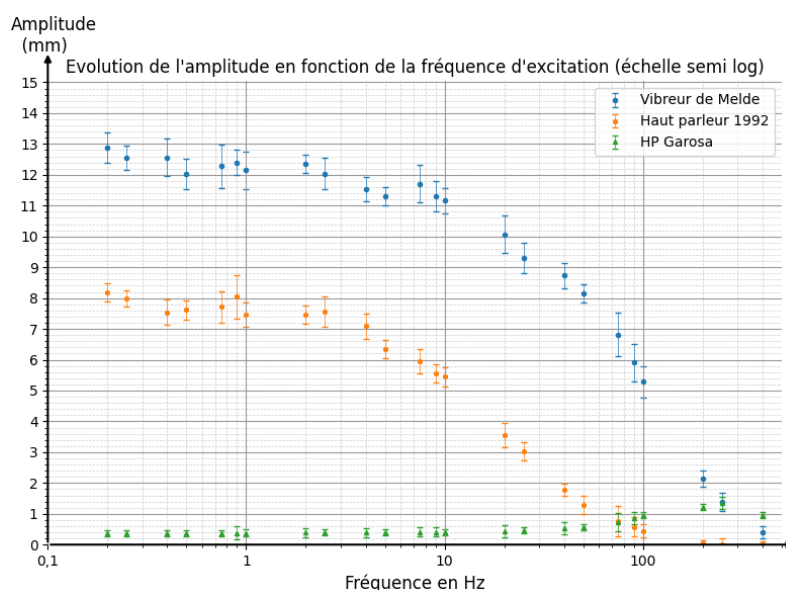
La tangente de l'angle de sortie étant liée à l'amplitude du mouvement, nous avons relevé deux points :

- **Le premier point** : À une fréquence de 200 mHz (cycle de 5 secondes), l'amplitude crête-à-crête du vibreur est de 13,28 mm, et le spot lumineux se déplace de 2,285 m sur l'écran.
- **Le second point** : Lorsque le vibreur est à l'arrêt, le spot reste fixe, indiquant aucun déplacement.

En négligeant :

- les variations de hauteur liées à l'altitude du point d'incidence,
 - et les variations de distance entre ce point et l'écran,
- on peut estimer que la position du spot sur l'écran est proportionnelle à l'amplitude du déplacement.

Nous avons mesuré l'amplitude en fonction de la fréquence, mais une difficulté est vite apparue : représenter des ordonnées en millimètres et mètres, ainsi que des abscisses allant de 0,2 Hz à 200 Hz. Pour mieux visualiser ces données, nous avons utilisé une échelle logarithmique, ce qui a facilité la comparaison sur une large plage. Les données ont été tracées sur un tableur, avec une amplitude du GBF fixée à 10 V, mesurée au multimètre³.



Premier constat : les résultats varient en fonction du haut-parleur utilisé. Pour le vibreur de Melde et le modèle de 1992, l'amplitude est élevée à basse fréquence, mais décroît rapidement pour devenir très faible. En revanche, le haut-parleur Garosa™ acheté sur Amazon semble avoir une conception différente, avec une amplitude atteignant un maximum à une fréquence différente des basses fréquences. Cela confirme l'appellation « Haut-parleur de Résonance 50 mm ».

Le second constat est que l'amplitude varie systématiquement avec la fréquence. Cependant, pour le modèle que nous avons acheté, la réponse reste d'un ordre de grandeur comparable pour des fréquences basses, inférieures à 20 Hz. Nous supposons qu'une différence de technologie est à l'origine de ce comportement distinct.

Dernier constat : l'amplitude, qui dépend de la force exercée sur la membrane du haut-parleur, est proportionnelle à l'intensité du courant. Si l'on assimile notre vibreur à une résistance, le courant qui le traverse est directement lié à la tension appliquée à ses bornes. Cela nous offre un moyen efficace de réguler l'amplitude en ajustant la tension.

³ Nous sommes conscients que nous mesurons la tension efficace, U_{eff} , et pas U_{max} et reconnaissons qu'il s'agit d'un abus de langage pour parler d'amplitude.

Influence de l'amplitude sur le seuil d'apparition des instabilités de Faraday

Nous avons étudié les conditions d'apparition des instabilités de Faraday.

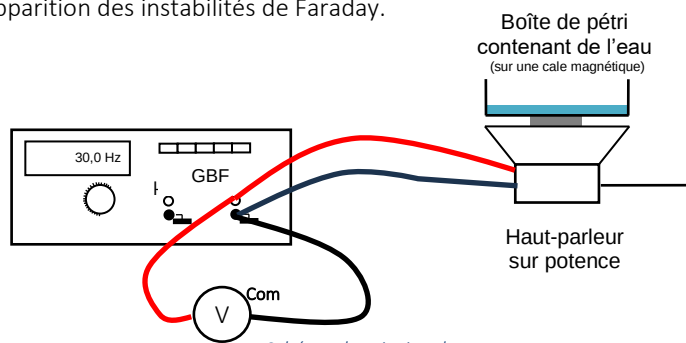
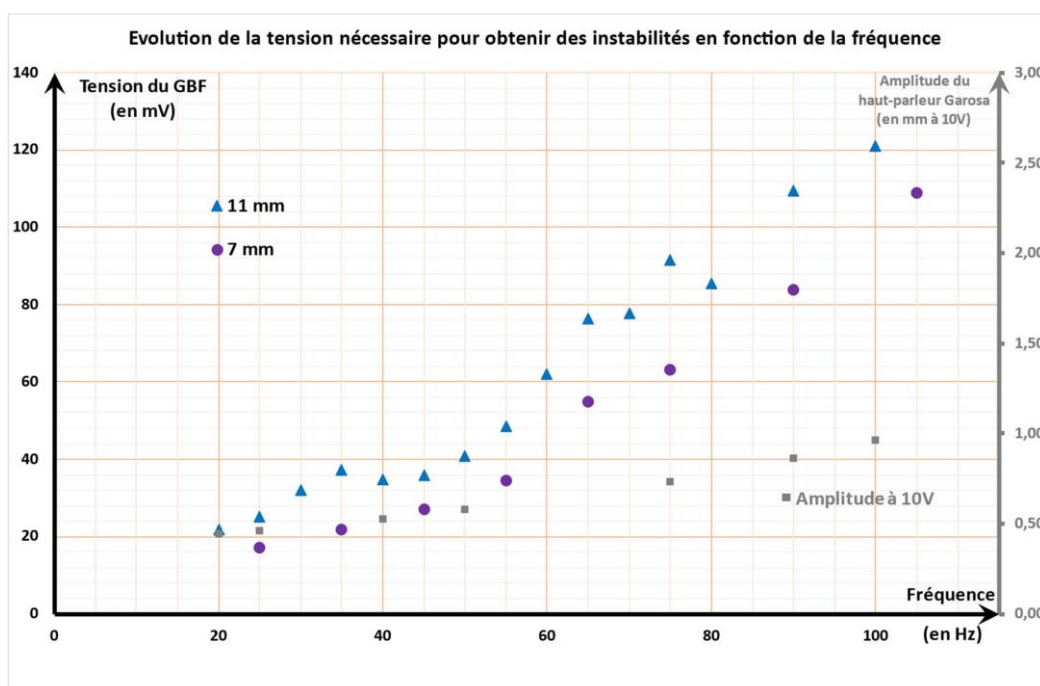


Schéma de principe de nos mesures

Nous avons repris notre montage classique en y apportant quelques améliorations. Nous avons ajouté de petits aimants plats, positionnés sous le récipient et sur la membrane du haut-parleur afin de faciliter le changement rapide de contenant ou de contenu. De plus, un voltmètre a été connecté aux bornes du générateur pour mesurer la tension à laquelle les instabilités apparaissent en fonction de la fréquence.

Nous avons choisi d'utiliser un haut-parleur Garosa, non seulement parce qu'il est plus récent et donc moins usé mais aussi en raison de sa réponse quasi identique aux basses fréquences.



Nous avons tracé l'évolution de la tension minimale du GBF nécessaire pour déclencher les instabilités de Faraday en fonction de la fréquence d'excitation. De plus, l'évolution de l'amplitude représentée en gris, a été ajoutée sur le même graphique à titre de rappel.

Nous observons que, quelle que soit la profondeur (7 mm ou 11 mm), la tension seuil augmente avec la fréquence. À 7 mm, le seuil passe de 15 mV à près de 110 mV, tandis qu'à 11 mm, il varie de 20 mV à 120 mV. En résumé, sur cette plage de fréquences, l'amplitude du signal excitateur est multipliée par un facteur de 6.

Parallèlement, la réponse du haut-parleur augmente de 0,45 mm à 0,97 mm pour une tension de 10 V. Bien qu'il soit difficile de trancher de manière définitive, on peut affirmer qu'à mesure que la fréquence augmente, le seuil semble également devoir être plus élevé. Il serait pertinent de réaliser ces mesures en fonction de l'amplitude du vibreur pour pouvoir confirmer cette tendance. Nous tenterons de le faire pour le concours national de Marseille.

Cependant, nous pouvons affirmer sans trop de risques que la tension seuil augmente avec la quantité d'eau présente dans le récipient.

Influence de la viscosité sur l'apparition des instabilités de Faraday

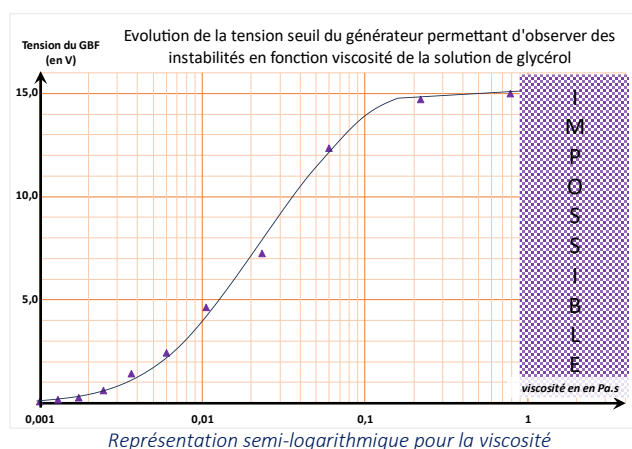
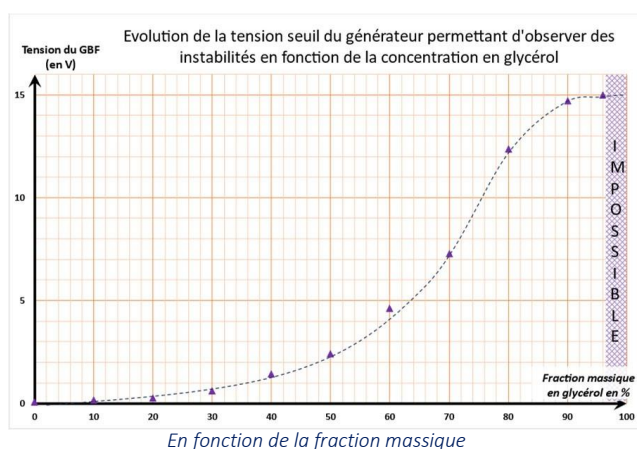
Lors de notre visioconférence avec M. FORT, il a mentionné l'impact de la viscosité sur le seuil d'apparition des instabilités de Faraday, en précisant que : « ... à viscosité nulle, il n'y a pas de seuil ». Il nous a encouragés à explorer cette influence en étudiant différentes solutions présentant des viscosités variées.

L'an dernier, dans le cadre de notre projet « Le turbulent et Zadig »(1), nous avons précisément étudié la viscosité de solutions de glycérol dont nous disposons encore en stock. Par curiosité, nous avons décidé d'examiner l'influence de ce paramètre sur le seuil d'apparition des instabilités de Faraday.

Voici les valeurs de viscosité établies grâce à M. Lefebvre de l'IFREMER de Boulogne-sur-Mer, que nous avons eu le plaisir de rencontrer à nouveau lors de la Fête de la Science.

Solution	η , en Pa.s		Valeur Handbook (en Pa.s)	Erreur relative en %
	Moyenne sur 10 mesures	Écart type		
Eau	$0,968 \times 10^{-3}$	$0,071 \times 10^{-3}$	$1,01 \times 10^{-3}$	-4,12
Glycérol 10%	$1,19 \times 10^{-3}$	$0,076 \times 10^{-3}$	$1,26 \times 10^{-3}$	-4,77
Glycérol 20%	$1,65 \times 10^{-3}$	$0,116 \times 10^{-3}$	$1,74 \times 10^{-3}$	-5,17
Glycérol 30%	$2,28 \times 10^{-3}$	$0,161 \times 10^{-3}$	$2,46 \times 10^{-3}$	-7,03
Glycérol 40%	$3,35 \times 10^{-3}$	$0,173 \times 10^{-3}$	$3,65 \times 10^{-3}$	-5,50
Glycérol 50%	$5,70 \times 10^{-3}$	$0,300 \times 10^{-3}$	$6,04 \times 10^{-3}$	-5,24
Glycérol 60%	$10,1 \times 10^{-3}$	$0,593 \times 10^{-3}$	$10,6 \times 10^{-3}$	-4,57
Glycérol 70%	$22,1 \times 10^{-3}$	$1,32 \times 10^{-3}$	$23,2 \times 10^{-3}$	-4,71
Glycérol 80%	$55,4 \times 10^{-3}$	$3,07 \times 10^{-3}$	$59,9 \times 10^{-3}$	-7,40
Glycérol 90%	0,207	$13,1 \times 10^{-3}$	0,219	-5,28
Glycérol 100 %	1,39	$73,9 \times 10^{-3}$	1,41	-6,15

Voici nos résultats obtenus pour un volume de 10 mL mesuré à l'aide d'une éprouvette graduée. Cette courbe présente les tensions seuil en fonction de la fraction massique Φ de glycérol et en fonction de la viscosité pour une fréquence de 50 Hz.



La représentation sur un repère classique révèle que, pour des fractions massiques comprises entre 0 et 15-20 %, la tension seuil varie peu. Cependant, entre 20 % et 85-90 %, la tension seuil est Fortement influencée. Au-delà de 90 %, elle semble atteindre un plateau. Enfin, à des fractions supérieures à 96 % de glycérol, nous n'avons jamais réussi à observer des instabilités de Faraday. La courbe en pointillé a une allure sigmoïde, caractérisée par deux zones de concavité distinctes et un point d'inflexion apparent. Elle a été tracée à la main comme une interprétation artistique, sans s'appuyer sur un modèle mathématique précis.

Nous avons opté pour une représentation semi-logarithmique, qui nous semble plus adaptée qu'une échelle linéaire pour mettre en évidence l'effet de la viscosité. La courbe tracée manuellement ne correspond à aucun modèle établi, mais reflète une tendance générale que nous ne sommes pas encore en mesure d'interpréter. Elle suggère cependant une possible corrélation entre le seuil d'apparition des instabilités de FARADAY et le logarithme de la viscosité. L'augmentation de la viscosité tend à amortir les ondes de surface, rendant ainsi l'apparition des instabilités de Faraday plus difficile.

L'expérience de Monsieur FORT

Nous n'avons jamais observé d'instabilité de Faraday avec nos systèmes actuels au lycée pour une fraction massique supérieure à 96 %. Après en avoir discuté avec M. FORT, il nous a expliqué que cela était lié à une question d'amplitude. Il nous a recommandé d'utiliser des dispositifs plus puissants pour agiter la cuve. Suite à ses conseils, nous avons décidé d'employer un haut-parleur de 300 W ainsi que l'amplificateur de sonorisation de la Maison des Lycéens, habituellement utilisés pour les concerts dans notre établissement.

Après avoir résolu les problèmes de connectique et réalisé quelques essais préliminaires, nous avons rencontré de nouveaux défis : la fixation de la cuve et la génération d'un signal audio. Pour la fixation, nous avons opté pour une solution provisoire avec un pistolet à colle, une méthode efficace qui permet de remplacer ou d'expérimenter différents contenants facilement. Concernant la génération du signal, nous avons choisi de créer un son par voie informatique en utilisant le logiciel Audacity, un outil que nous maîtrisons bien grâce à son usage fréquent en cours de langue.

Dès le premier essai avec ce nouvel équipement, nous avons observé des instabilités de Faraday à une fréquence de 50 Hz, puis à 100 Hz, en utilisant du glycérol pur. Suivre les conseils avisés d'un spécialiste a été déterminant dans cette réussite. Au-delà de l'intérêt scientifique, cette exploration découle également d'un défi lancé par M. FORT lors de sa visioconférence.

À son invitation, nous explorons également un autre phénomène fascinant : le comportement de bulles d'air dans le glycérol soumis à des vibrations. Cette étude, que nous avons nommée l'"expérience de M. FORT", constitue un défi scientifique captivant. Si nos résultats

s'avèrent concluants, nous sommes invités à lui transmettre des photos ou des vidéos pour partager nos observations. Nous espérons également avoir l'opportunité de présenter ces travaux lors du concours national.

Retour sur la brumisation

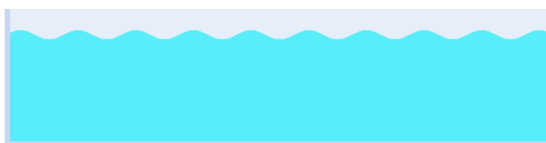
Revenons à notre sujet initial : la brumisation. Selon M. FORT le phénomène est analogue, à la différence que le vibreur est directement dans la cuve ; ce qui rend une transmission beaucoup plus efficace à la colonne d'eau qui est située au-dessus. D'autant plus que l'eau a une très faible viscosité.

Lorsqu'on fait vibrer de l'eau dans un récipient et que l'on augmente progressivement l'amplitude des oscillations, une série de phénomènes se succède.

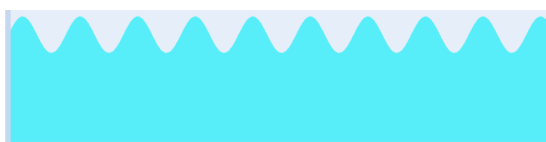
À partir d'une certaine amplitude, pour une fréquence donnée, des ondes stationnaires apparaissent clairement à la surface de la cuve. Elles montrent un équilibre entre la fréquence de vibration et les propriétés physiques du fluide.



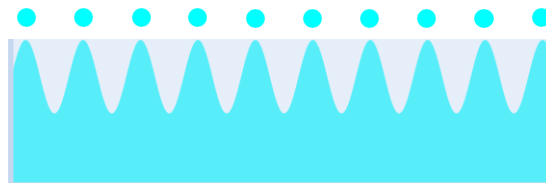
Lorsque l'amplitude du signal excitateur (assurée par la membrane du haut-parleur) augmente, l'amplitude des ondes générées à la surface du fluide augmente également, traduisant une intensification de l'énergie transmise au milieu.



En augmentant davantage l'amplitude du vibreur, l'amplitude des ondes continue de croître. Le système tend à devenir instable.



Au-delà d'une amplitude critique, le système devient instable. Les crêtes des ondes commencent à émettre de petites gouttelettes de manière quasi synchrone et régulièrement espacées. Ces gouttelettes sont projetées dans l'air avant de retomber à la surface, qu'elles déstabilisent.



Nous observons que les gouttelettes émises ont une taille approximative correspondant à un quart de la longueur d'onde des ondes générées. Il semble y avoir une corrélation entre leur dimension et les caractéristiques de la vibration du système.

À des fréquences élevées, comme $f=15\text{MHz}$, la tension superficielle γ domine le comportement des ondes. La relation de dispersion devient :

$$\omega_0^2 = \frac{\gamma k^3}{\rho} \quad (7)$$

où $\omega = 2\pi f$, γ la tension superficielle de l'eau ($0,0728 \text{ N.m}^{-1}$) (14), ρ sa masse volumique (1000 kg.m^{-3}) et $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ le nombre d'onde.

Pour $f=15\text{MHz}$, la résolution de cette équation donne une longueur d'onde $\lambda = 1,27\mu\text{m}$. Cela correspond à des gouttelettes d'un diamètre typique de $0,40\mu\text{m}$, caractéristiques d'un brouillard dense.

Des ondes de cette dimension ne peuvent pas être directement observées à la surface de l'eau en raison de limitations physiques et expérimentales. Par conséquent, il ne s'agit pas d'une instabilité de Faraday au sens strict, mais plutôt d'un phénomène analogue qui partage certaines caractéristiques fondamentales, comme la dépendance aux forces capillaires et la fréquence d'excitation.

Conclusion

Comment fonctionne un brumisateur à ultrasons ?

Peut-on établir une analogie avec des phénomènes que nous connaissons déjà ?

Notre participation aux Olympiades de Physique, inspirée par le voyage de Zadig(1), nous a offert de nombreuses rencontres marquantes, notamment celle avec M. Aubry. Une discussion avec lui nous a orienté vers une première étude consacrée à la brumisation. En utilisant un brumisateur fonctionnant à très haute fréquence, nous avons observé que les vibrations qu'il génère

produisent des ondes mécaniques à l'interface eau/air, formant un brouillard de fines gouttelettes d'eau liquide sans atteindre le point d'ébullition.

Cependant, nos premiers résultats étaient limités, et la compréhension des phénomènes restait imprécise. Pour approfondir notre étude, nous nous sommes intéressés au comportement de l'eau soumise à des vibrations dans des récipients simples, comme des béciers. Lors de ces expériences, nous avons observé que des vibrations verticales appliquées à un récipient contenant de l'eau induisaient des motifs réguliers à sa surface. Dans un récipient plat, une coupe transversale révèle un phénomène semblable à celui observé sur une corde de Melde, avec la formation d'ondes stationnaires.

Pour valider nos hypothèses, nous avons sollicité M. Emmanuel Fort, spécialiste des interactions entre ondes et matière. Il a confirmé notre première hypothèse et identifié le phénomène observé comme une instabilité de Faraday. Il nous a également encouragé à établir une analogie avec un oscillateur paramétrique bien connu : le botafumeiro. Cet oscillateur, tout comme le mouvement d'une queue de cheval lors d'un exercice physique, oscille à une fréquence correspondant à la moitié de la fréquence d'excitation. En utilisant la stroboscopie, nous avons observé un comportement similaire dans les ondes de surface, confirmant ainsi la nature paramétrique du phénomène.

Afin de mesurer la magnitude des oscillations, nous avons testé divers dispositifs et conçu une méthode originale reposant sur une boule de Noël, une idée absente de la littérature scientifique. Initialement, cette approche s'appuyait sur une simple simulation réalisée avec un logiciel de géométrie. Malgré des difficultés, nous avons persévéré et développé une solution analytique, intégrée par la suite dans une simulation logicielle. Les résultats obtenus ont non seulement validé notre simulation initiale, mais également permis d'expliquer les problèmes expérimentaux rencontrés.

En parallèle, nous avons mesuré l'amplitude de notre vibreur et analysé son effet sur les ondes de surface. M. Fort nous a ensuite suggéré d'examiner l'impact de la viscosité sur l'apparition des instabilités de Faraday. Nos expériences ont révélé que l'augmentation de la viscosité retarde significativement l'apparition des perturbations, ce qui ouvre des perspectives intéressantes pour le contrôle de ces instabilités.

Dans un esprit d'innovation, M. Fort nous a proposé une dernière expérience spectaculaire : étudier le comportement des bulles d'air dans du glycérol vibré. Cette expérience, illustrée sur la couverture de notre dossier, sera présentée en direct lors du concours national. Par sa nature visuellement captivante, elle promet de susciter l'intérêt du public tout en illustrant élégamment les phénomènes physiques que nous avons étudié.

Tout comme Édouard BRANLY, qui découvrit le détecteur d'ondes en étudiant la conductivité des limailles de fer(15), notre exploration du brouillard généré par la brumisation nous a conduits à mettre en évidence des propriétés fondamentales des ondes à la surface de l'eau que nous ignorions. Ce parcours, jalonné de découvertes et de collaborations, témoigne de l'importance de l'expérimentation et de l'échange scientifique dans la compréhension des phénomènes complexes.

Bibliographie

1. Lissarre I, Vaast J, Thorez L, Lacroix L, Delepouve J, Pauchet T. *Le turbulent et Zadig*. Paris, Université Paris Campus des Grands Moulins: Olympiades de physique; 2024 févr. 20 p. (Concours National des Olympiades de Physique France).
2. Hecht E. *Optique*. Pearson Education. 2005. 736 p.
3. Melde F. *Ueber die Erregung stehender Wellen eines fadenförmigen Körpers*. Ann Phys (Berlin). 1860;109(2):193-215.
4. Buridant O, Ducrocq F, Gomez G, Magartit M, Magarit A, Maurin JL, et al. *Travaux pratiques de physique chimie, de la seconde à la terminale*. Bordas. Paris; 2003. 224 p.
5. École Polytechnique, ESPCI. *Physique A (XE) – Concours d'admission 2022, filière PC*. 2022.
6. Apffel B, Novkoski F, Eddi A, Fort E. *Floating under a levitating liquid*. Nature. sept 2020;585(7823):48-52.
7. Apffel B. *Du contrôle spatio-temporel d'ondes de surface à la stabilisation dynamique d'interfaces* Thèse. Université Paris sciences et lettres; 2022.
8. Sanmartín JR. *O Botafumeiro: Parametric pumping in the Middle Ages*. American Journal of Physics. 1 oct 1984;52(10):937-45.
9. Tomasino A, Fauris M, Parent C, Patrigeon C, Simon C. *Physique Terminale S, enseignement obligatoire*. Nathan. Paris; 1995.
10. Duboc C, Dulac Y, Fromont JC, Garay B, Nordmann J. *Physique Terminale S*. Didier. Paris; 1995. 448 p. (Secrétan D. D. Secrétan).
11. Durandeau JP, Bramand P, Faye M, Thomassier G, Martegoutes R, Sahun R. *Physique: Term. S*. Hachette; 1995. 352 p.
12. Plaut RH, Virgin LN. *Pendulum models of ponytail motion during walking and running*. Journal of Sound and Vibration. 5 août 2013;332(16):3768-80.
13. Keller JB. *Ponytail Motion*. SIAM J Appl Math. janv 2010;70(7):2667-72.
14. Haynes WM. *Handbook of chemistry and physics*. CRC Press. Vol. 95. Boca Raton, Florida; 2014. 2704 p.
15. Patin C, Lacheré G, Sanssoucy E. *2011, sur les pas d'Édouard BRANLY 1911*. Palais de la Découverte, Paris: Olympiades de physique; 2012 janv 32 p. (Concours National des Olympiades de Physique France).
16. Taillet R. *Python pour la physique Calcul, graphisme, simulation*. De Boeck Supérieur. Paris; 2020. 320 p.