

Table des matières

1	Objectifs et messages du montage	1
2	Grandeurs mesurées	1
3	Éléments théoriques de l'expérience	1
4	Schéma de l'expérience et protocole à mettre en œuvre	1
4.1	Matériel	1
4.2	Expériences	2
5	Analyse critique des résultats et interprétation	5
6	Subtilités de l'expérience et astuces	5

1 Objectifs et messages du montage

- ▷ Montrer que le couplage d'oscillateurs fait apparaître des fréquences de résonance, en l'occurrence les modes propres, solutions des équations du mouvement.
- ▷ Faire apparaître des notions remarquables, telles que le phénomène de battements et la notion de modes symétrique ou antisymétrique.
- ▷ Finalement, démontrer à nouveau que les oscillateurs sont particulièrement transversaux en Physique.

2 Grandeurs mesurées

- ▷ **Fréquences** (très majoritairement après des balayages ou des FFT)
- ▷ **Tensions** (image des grandeurs résonantes)

3 Éléments théoriques de l'expérience

- ▷ La chaîne d'oscillateurs couplés : obtention des modes propres.
- ▷ Oscillateurs de Helmholtz
- ▷ Résonances et co.

4 Schéma de l'expérience et protocole à mettre en œuvre

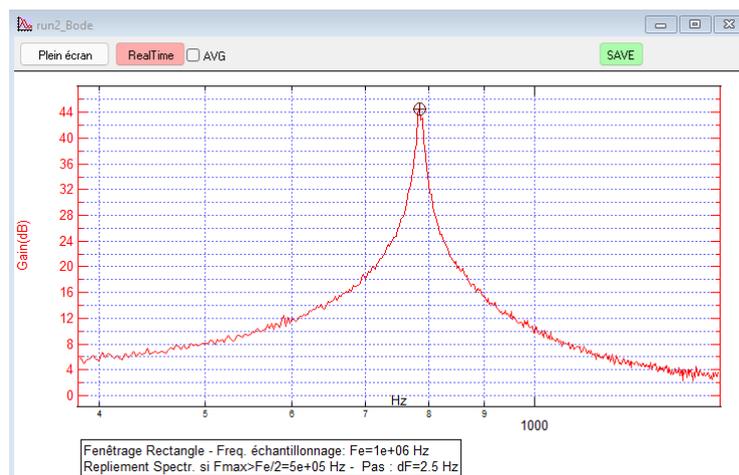
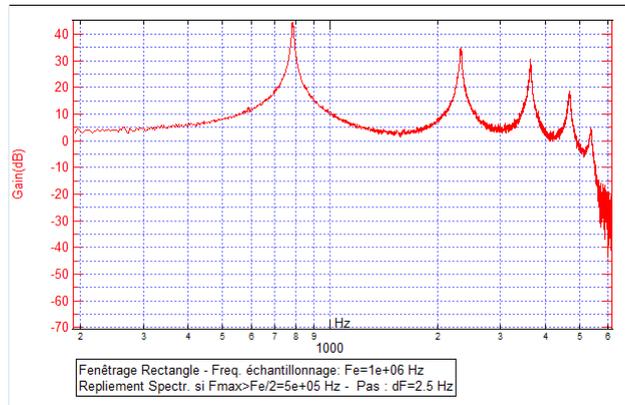
4.1 Matériel

- ▷ Chaîne linéaire d'oscillateurs avec miroir en coin et barette CCD.
- ▷ Trois amplificateurs de tension.
- ▷ Un vibreur.
- ▷ Un laser.
- ▷ Deux hauts-parleurs.
- ▷ Résonateurs de Helmholtz (cavités et tuyaux de différentes longueurs).
- ▷ Un petit micro et son adaptateur BNC.
- ▷ Oscillos et GBF.
- ▷ Montage ligne à retard.

4.2 Expériences

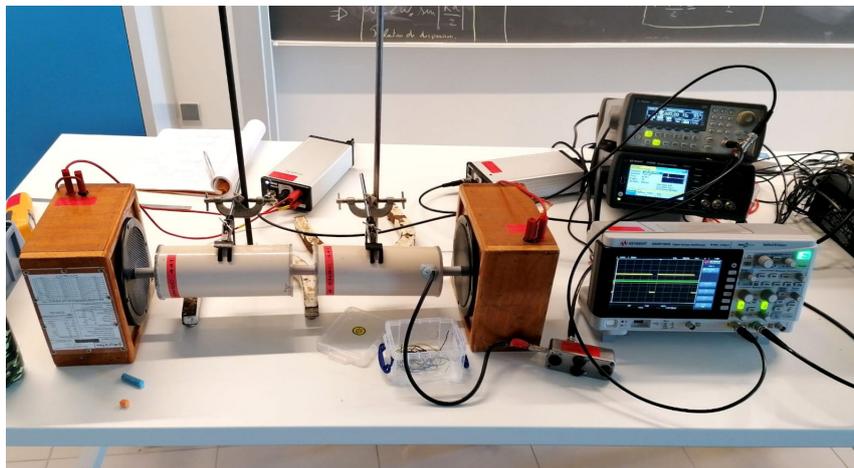
► Ligne à retard

On utilise la ligne à retard : on lui applique en entrée une entrée sinusoïdale, on récupère la sortie à l'autre bout. Attention, le montage ne comprend que sept cellules, il y a une bobine surnuméraire qu'il ne faut pas utiliser. Prenez en fréquence par fréquence en faisant le rapport U_s/U_e à l'oscillo, ou avec une impulsion à l'aide d'une macro IGOR. Il sort plusieurs résonances, dont la valeur n'est pas la même que la théorie, et n'est pas la même suivant la méthode que vous avez utilisée. Peut-être une question d'impédance terminale ?



Bref, franchement, cette manip... Qualitative, surtout. Ou alors vous résolvez le paradoxe, et je serai intéressé de connaître la réponse.

► Résonateurs couplés de Helmholtz



▷ Travail préliminaire : détermination de longueur efficace :

On commence par déterminer la longueur efficace l_{eff} qui rentre en compte dans le calcul de la pulsation propre au résonateur.

Pour déterminer la fréquence de résonance du résonateur, on fixe l'une des extrémités d'une des cavités avec de la pâte adhésive. On place le signal du micro et la voie "sync" du GBF sur l'oscilloscope. On active le mode graphique (touche à l'extrême-gauche de l'oscillo), on envoie un sinus avec un balayage ("Sweep") et on paramètre fréquences d'entrée et de sortie pour bien voir les deux résonances (environ de 20 à 150 Hz). On utilise alors le marqueur fréquentiel (cinquième option du menu) : en le sélectionnant, le signal descendant de la voie "Sync" se déplace et fait correspondre position sur l'écran de l'oscillo et fréquence à cet instant du balayage. La plus grande des oscillations correspond à f_0 ; l'incertitude est l'écart entre deux pics se suivant.

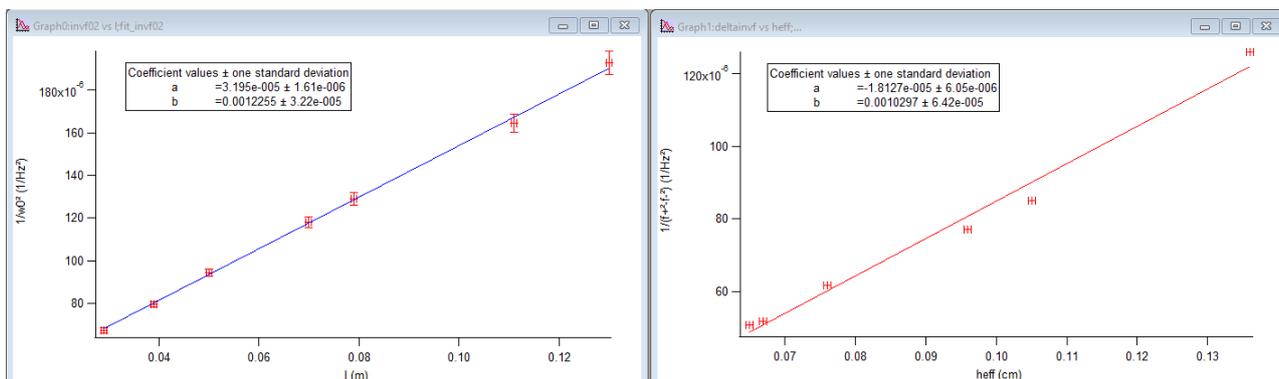
On trace $\frac{1}{f_0^2}$ en fonction de l , la longueur du tuyau qu'on insère dans la cavité, et on obtient une ordonnée à l'origine : l_0 , qui sera donc à prendre en compte lors des calculs. Cette longueur à vide, représentant la longueur d'air qui vibre en plus de celle du tuyau, est de l'ordre de 1 à 2 centimètres.

Pour plus de détails, se référer au MFI 104.

▷ Visualisation des modes symétriques et antisymétriques :

On couple deux cavités en plaçant entre elles un tuyau de longueur h et en mettant à chacune des autres extrémités un tuyau de longueur l . En réalisant un balayage de fréquences au haut-parleur, on verra deux résonances principales. La première est le mode antisymétrique : sa fréquence ne bouge pas quelque soit la longueur h du tube entre les deux résonateurs, et vaut la fréquence propre de l'un des résonateurs pris à part. La seconde est la fréquence symétrique, valant $\omega_+ = \sqrt{\omega_0^2 + \Omega^2}$, avec Ω variant en $1/\sqrt{h_{eff}}$. D'autres résonances secondaires apparaissent ensuite, probablement dues aux imperfections du couplage et des cavités.

On peut se convaincre du fait qu'il s'agit bien des modes antisymétrique et symétrique en alimentant les hauts-parleurs de part et d'autre de la cavité avec le même signal : on excite le mode symétrique et on éteint l'autre. On fait de même avec des signaux opposés en inversant les bornes sur le haut-parleur : on excite uniquement le mode antisymétrique.



▷ Tracé des modes du couplage des deux résonateurs :

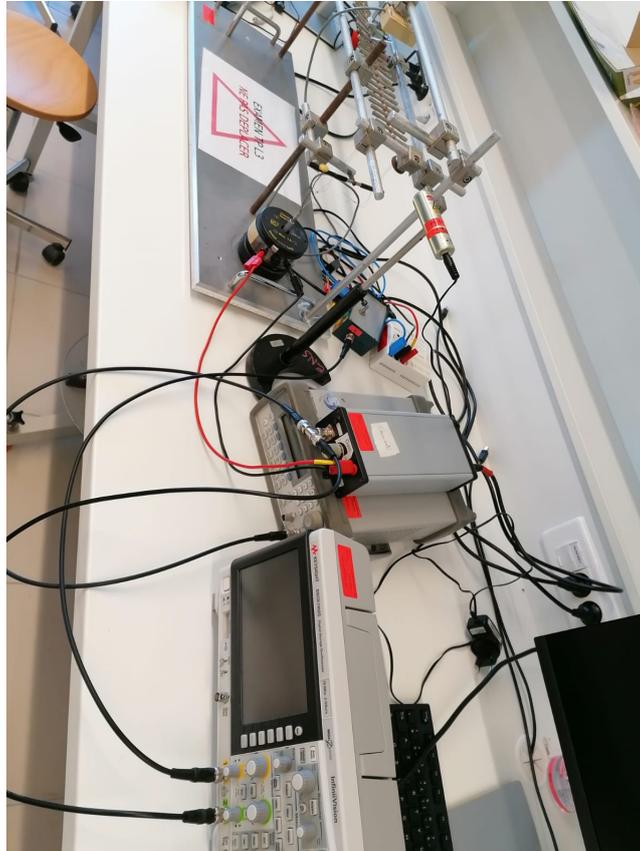
On fait varier la longueur du tuyau entre les deux résonateurs h , et on trace $\frac{1}{f_+^2 - f_-^2}$ en fonction de $h_{eff} = h + h_0$. On a alors une droite. Le coefficient directeur peut se comparer avec la pente théorique, valant $c \times \frac{s}{V}$, dont on peut comparer avec une valeur théorique (assez efficacement).

Du fait de l'écart entre fréquences au carré, l'incertitude sur les points risque d'être démentielle.

Attention, pour des tuyaux un peu trop grands, supérieurs à une dizaine de centimètres, on s'écarte des courbes attendues.

Pour plus de détails, consultez le BUP se trouvant sur le montage MFI 104 et déposé par Cillian (ou se trouvant dans votre polycopié de TP de L3 pour les physiciens normaliens).

► Chaîne d'oscillateurs couplés



- ▷ Calcul des fréquences propres; visualisation de la première zone de Brillouin; vitesses de phase et de groupe.

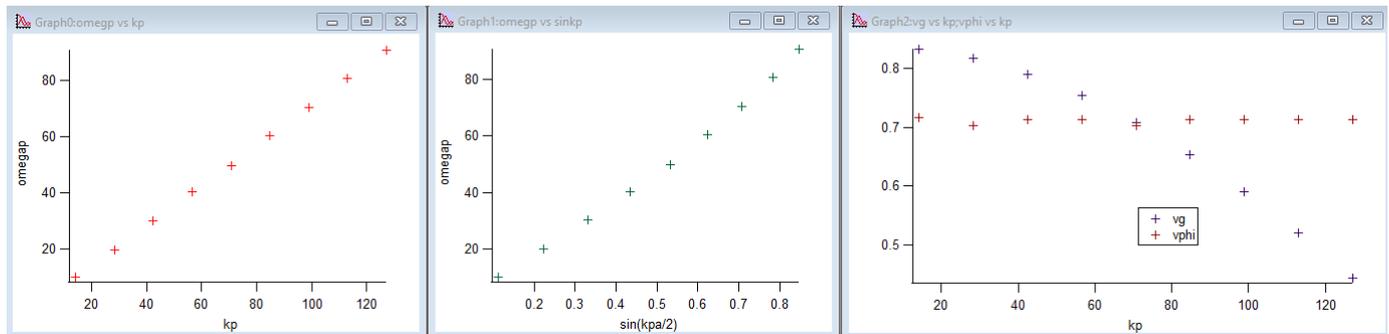
Pour avoir une image de l'angle d'un des barreaux, on dirige un faisceau laser sur un miroir triangle, puis sur le barreau, puis sur un capteur CCD. Ce réglage, préalable à toute l'étude, sera un excellent moyen de tester votre sérénité, votre dextérité et votre patience (qui plus est dans le stress d'un concours). On ne prend que N éléments, avec $N = 15$ idéalement.

On acquiert alors le mouvement sur une base de temps suffisante (environ deux secondes par carreau). On sauvegarde ou l'on stoppe l'acquisition, et on réalise la FFT du signal [à l'ordi ou à l'oscillo pour gagner du temps]. On note alors la position des pics. Après calculs sur logiciel, on trace ω_p en fonction de $\sin(\frac{k_p a}{2})$, avec $k_p = \frac{\pi p}{a(N+1)}$ et p un entier variant de 1 à N . On trouve d'ailleurs un ordre de grandeur de ω_0 , l'ordonnée maximale de la courbe. A partir de cette pulsation, on n'observe plus de propagation dans la chaîne : on peut le vérifier de visu.

La vitesse de phase vaut $v_\phi = \frac{\omega}{k}$, la vitesse de groupe $v_g = \frac{d\omega}{dk}$. On peut calculer la première, puis la seconde avec une dérivée numérique, même si cela est très discutable pour cette dernière grandeur vu l'espacement entre les pulsations que l'on a mesuré. Bien entendu, pas vraiment de comparaison tout à fait quantitative, juste un ordre de grandeur plus ou moins rationnel au vu de l'expérience.

- ▷ Facteur de qualité d'un mode.

On se place sur un des modes préalablement trouvés, ce qui devrait être visible directement sur la chaîne (ventres et nœuds). On peut d'ailleurs vérifier ensuite que ce mode contient majoritairement un



harmonique (et ses multiples). On coupe alors brutalement l'excitation : le signal augmente l'espace d'un instant, probablement à cause du relâchement des contraintes mécaniques, puis connaît une réduction exponentielle. Avec le taux de décroissance $\tau = \frac{2Q}{\omega}$, on peut remonter au facteur de qualité. Celui-ci dépend du mode considéré, *a priori*, quoique l'on puisse arguer que la largeur à mi-hauteur des pics semble à peu près identique dans la FFT de de la première manipulation. "Tout dépend de la définition que l'on donne au facteur de qualité", a décrété le correcteur.

Bref. On travaillera prochainement à débogger la manip avec monsieur Moulin.

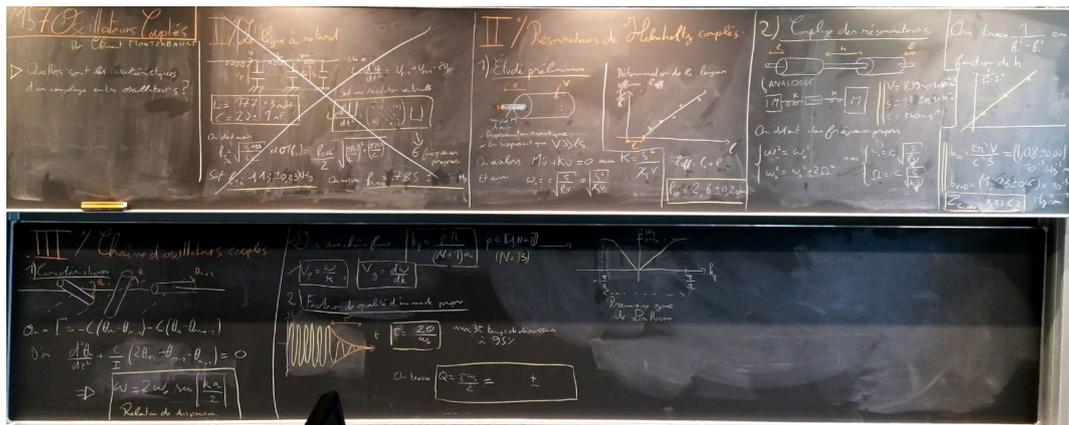
5 Analyse critique des résultats et interprétation

- ▷ La ligne à retard pose plus de problèmes qu'elle n'en résout, à proscrire donc en première manip, à garder potentiellement comme manip tiroir. Concrètement, cela a la vertu de faire de l'électronique, mais a le souci de ne rien présenter de neuf qui ne soit abordé dans la chaîne d'oscillateurs couplés plus loin. Chacun voit midi à sa porte, mais personnellement je déconseille.
- ▷ Les mesures des résonateurs de Helmholtz couplés sont propres et se font plutôt bien, ce qui est rassurant. Idem pour la seconde partie de l'expérience, qui donne un bon Zscore de la pente théorique. Attention toutefois à l'étude des incertitudes lorsque l'on calcule $\frac{1}{f_+^2 - f_-^2}$: elles explosent souvent au vu de la petitesse du terme considéré ! Le cas échéant, ne pas les présenter ? A vous de voir quel terme vous favorisez dans la compétition énergie passée - entropie générée par vos barres d'incertitudes.
- ▷ La ligne d'oscillateurs couplés, est, à n'en point douter, très difficile à mettre en œuvre. La réflexion du laser sur la CCD, digne d'un coup à trois bandes au billard, est particulièrement ardue. On est pas encore arrivé à voir les extrémités de la zone de Brillouin, ce qui fait qu'à ce jour la présentation de l'expérience est encore un peu déloyale, mais les données obtenues en L3 laissent penser que c'est possible. M'est avis que cette expérience permet d'apporter beaucoup plus de matière à discuter que les autres choses qui pourraient être faites dans cette gamme. En plus, le fait que vous soyez arrivé à parfaitement la monter prouvera indubitablement que vous êtes un expérimentateur hors-pair, sans même parler de tout ce qu'il y a à discuter après.
- ▷ Pour le correcteur, il manque une manipulation simple et visuelle en premier : le choix des oscillateurs mécaniques couplés, où l'on visualise modes symétrique et antisymétrique, puis battements, paraît s'imposer de lui-même.

6 Subtilités de l'expérience et astuces

- ▷ Arriver à régler la chaîne d'oscillateurs couplés... Bon courage ! L'emplacement exact de la réflexion du laser sur le barreau est particulièrement important, et cela déterminera l'amplitude du signal, sa stabilité, ainsi que la répétabilité du montage.
- ▷ Attention, certaines tubulures des tubes des résonateurs de Helmholtz ne sont pas bien nettes. Nos mesures prouvent que cela peut influencer quelque peu sur l'accord de vos points ou la visualisation des modes symétrique et antisymétrique. Faire attention à bien les encastrier également dans les cylindres, et

toujours de la même manière... Ou vous devrez vous y reprendre à deux fois pour faire coller vos points (comme votre serviteur durant ses 4, ou plutôt 7 heures de préparation).



-QUELQUES BALAYAGES ET UN PEU DE POUSSIÈRE SOUS LE TAPIS, ET VOUS OBTENEZ UN MONTAGE ASSEZ PROPRE.-