



PSL 



SORBONNE
UNIVERSITÉ

université
PARIS-SACLAY

Centre interuniversitaire de préparation à l'agrégation de Montrouge

PHYSIQUE POUR LES CHIMISTES - OSCILLATEURS

2022-2023

Bibliographie :

- Quaranta, "Dictionnaire de physique expérimentale, tome 1 : la mécanique"

Table des matières

1	Oscillations libres du pendule simple	3
2	Étude qualitative des oscillations forcées	3
3	Résonance d'un diapason	4
4	Résonance paramétrique [facultatif]	5

Lorsque certains systèmes sont perturbés, ils reviennent à l'équilibre non pas de façon monotone, mais via des oscillations généralement amorties : on parle d'oscillateurs. Un oscillateur est caractérisé par sa (ou ses) fréquence(s) de résonance f_0 , ainsi que par le facteur de qualité associé Q , la durée caractéristique des oscillations lors du retour à l'équilibre étant $\tau = Q/(\pi f_0)$. Une seconde caractéristique des oscillateurs est qu'en les forçant avec un signal harmonique à une fréquence proche de f_0 , ils sont le siège d'oscillations de grande amplitude, on parle alors de résonance. Cette fois-ci, le (même) facteur de qualité quantifie la bande passante de la résonance $\Delta f = f_0/Q$.

On se cantonne dans ce TP à des systèmes mécaniques, les oscillateurs électroniques étant étudiés dans le polycopié *Dipôles et filtrage*.

1 Oscillations libres du pendule simple

Si vous ne l'avez pas fait quantitativement lors du précédent TP de *Mécanique*, utiliser le pendule simple muni d'un capteur d'angle relié à la carte SYSAM-SP5 pour :

- Vérifier quantitativement que la période des oscillations dépend de leur amplitude, sauf dans la limite des petits angles (isochronisme des petites oscillations).
- Estimer le facteur de qualité de cet oscillateur.

2 Étude qualitative des oscillations forcées

Référence : Quaranta, "tome 1 : la mécanique", page 240.

Protocole : On utilise l'appareil schématisé sur la figure ci-dessous : une masse est fixée par l'intermédiaire d'un ressort à un fil dont la hauteur varie périodiquement avec le temps. La variation périodique de hauteur du fil est réalisée grâce à un moteur. La masse est plongée dans une éprouvette remplie d'eau pour induire des frottements plus importants que ceux de l'air et éviter ainsi d'obtenir une résonance trop aiguë qui ferait complètement diverger le système.

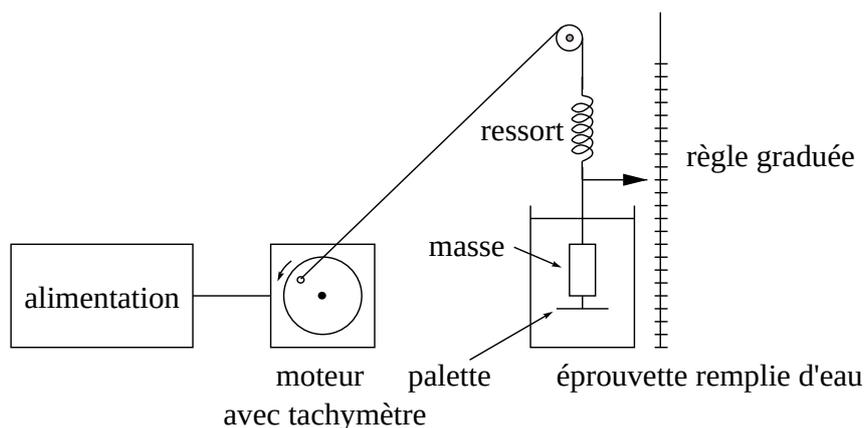


FIGURE 1 – Appareil d'étude de la résonance mécanique

Le tachymètre permet de mesurer la vitesse de rotation du moteur, donc la fréquence d'excitation du système oscillant formé par la masse et le ressort. La règle graduée permet de mesurer l'amplitude des oscillations. Mettre en place les éléments de telle sorte qu'au repos la masse soit approximativement au milieu de l'éprouvette, pour qu'elle ne tapse pas le fond ni ne sorte de l'eau à la résonance.

Vérifications préliminaires : Il est nécessaire de vérifier les points ci-dessous pour s'assurer que la fréquence de résonance se situe bien dans la plage de fréquences d'excitation :



- Déterminer la fréquence maximale accessible pour le forçage. Pour cela, mesurer la vitesse de rotation maximale du moteur en tenant compte du réducteur de vitesse angulaire.
- Éteindre le moteur et mesurer la fréquence du mouvement libre du système masse-ressort à l'aide d'un chronomètre. Il faut que cette fréquence soit inférieure à la fréquence maximale du forçage. Si ce n'est pas le cas, adapter les paramètres k et m . Il peut être utile de se rappeler la formule

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Profitez-en pour estimer le facteur de qualité Q du système : il correspond à peu près au nombre d'oscillations avant que le système, étiré sans vitesse initiale, ne s'immobilise.

- Choisir un volant d'entraînement adapté pour observer la résonance sans détruire le montage : les roues à votre disposition permettent de choisir l'amplitude du forçage la plus adaptée à vos conditions expérimentales.

Expérience : Arrêter le mouvement de la masse. Mettre le moteur en marche à basse vitesse et l'augmenter lentement en observant l'évolution de l'amplitude des oscillations. Comparer la fréquence où cette amplitude est maximale et celle du mouvement libre. Comparer à la formule théorique donnant la fréquence de résonance

$$f_{\text{res}} = f_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}. \quad (1)$$

Observer la différence de phase entre le mouvement de la masse et l'excitation, pour des fréquences de part et d'autre de la résonance.

L'interprétation de la courbe de résonance (amplitude des oscillations en fonction de la fréquence d'excitation) est rendue délicate par la nature des frottements, proportionnels au carré de la vitesse dans ce régime turbulent. Son tracé n'est pas conseillé.

3 Résonance d'un diapason

Les diapasons sont des systèmes physiques conçus pour "donner le LA" et doivent donc répondre à une fréquence connue avec une grande précision. Leur invention est due à l'anglais John Shore en 1711. En vertu de la relation $\Delta f = f_0/Q$ il doivent pour cela avoir un facteur de qualité très grand devant 1. Cela leur confère aussi un régime transitoire très long ce qui est facilement observable. Nous étudions dans un la suite un diapason qui donne *littéralement* le La, de fréquence 440 Hz.

Noter que d'autres oscillateurs avec de grands facteurs de qualité sont couramment utilisés pour avoir une base de temps fiable, c'est par exemple le cas du cristal de quartz présent dans les montres.

Référence : BUP n°801, p. 283, "Résonance aiguë et auto-oscillation d'un diapason"

Expérience : On peut commencer par estimer qualitativement l'ordre de grandeur du facteur de qualité de ce diapason. Il s'agit (comme précédemment) du nombre d'oscillations effectuées par le système excité initialement avant de revenir à son état d'équilibre. On peut les compter en divisant le temps d'amortissement des oscillations libres par leur période.

Le facteur de qualité Q étant très élevé, la bande passante est très serrée (de l'ordre de 0.1 – 0.3 Hz), il est nécessaire d'utiliser un générateur ayant une bonne stabilité et une très bonne précision en fréquence. Les Metrix GX320 (bleus) conviennent tout à fait. Une autre conséquence du très bon facteur de qualité, dont on s'est servi à l'instant, est la durée assez longue des régimes transitoires (de l'ordre de 1 à 10 s). Le tracé du diagramme de Bode point par point à *la main* doit donc se faire en veillant à attendre que le régime permanent soit établi.

Le montage de la figure suivante permet l'étude de la courbe de résonance d'un diapason acoustique avec sa caisse de résonance.

La force magnétique excitatrice est de la forme $\nabla(B.M) \sim \nabla(B^2)$, la fréquence d'excitation du diapason est le double de la fréquence affichée sur le GBF (un électroaimant attire toujours une masse en fer, le sens du courant circulant dans la bobine est donc sans importance ; en conséquence, à la force moyenne exercée se superpose



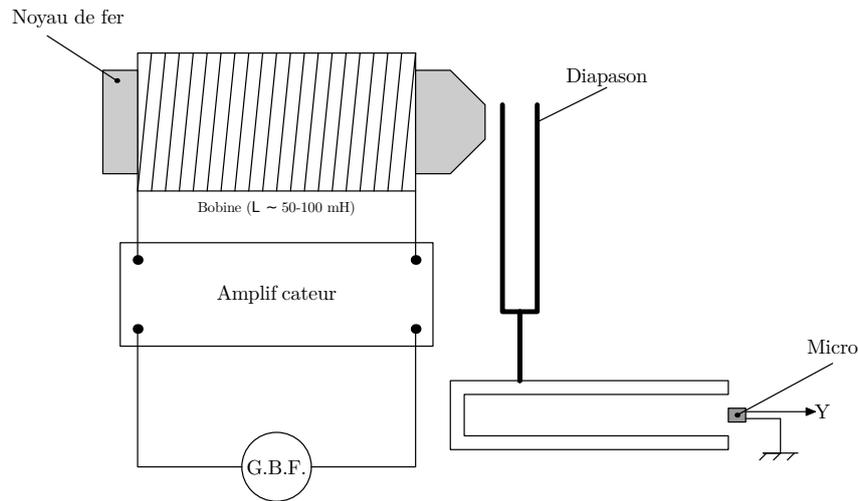


FIGURE 2 – Montage pour l'étude de la résonance d'un diapason.

une composante alternative qui a la fréquence double de celle du GBF). Pour obtenir la résonance mécanique du diapason il faut donc se placer à une fréquence électrique correspondant à la moitié de la fréquence de résonance du diapason.

Afin d'obtenir une force magnétique d'intensité suffisante, il faut, pour une alimentation fixée, optimiser l'intensité du courant électrique et le nombre de spires de la bobine. Mais l'impédance d'une bobine, comportant un noyau de fer, est importante à ces fréquences, ce qui limite fortement l'intensité. Pour compenser cet effet, on peut, si cela s'avère nécessaire, utiliser en série avec la bobine un condensateur de capacité C judicieusement choisie afin de rechercher la résonance d'intensité du circuit RLC ainsi formé pour la fréquence du GBF. On utilisera alors une capacité variable dont on ajustera la valeur à l'aide d'un ampèremètre pour obtenir une intensité maximale (le montage de la figure étant dans ce cas à modifier en conséquence --- vous pouvez consulter le BUP si vous avez des doutes).

Pour le tracé de la courbe de résonance, on mesure la tension aux bornes d'un microphone et on la reporte en fonction de la fréquence d'excitation. Après avoir mesuré la réponse pour une vingtaine de fréquences du GBF autour de $f_0/2$, on peut ajuster la courbe de résonance par :

$$U(f) = \frac{U_0}{\sqrt{\left(1 - \frac{f^2}{f_0^2}\right)^2 + \frac{1}{Q^2} \frac{f^2}{f_0^2}}} \quad (2)$$

En déduire la fréquence propre et le facteur de qualité de ce diapason, avec les incertitudes associées.

Manipulations facultatives : On peut reprendre l'étude de la résonance du diapason avec une surcharge sur l'une de ses branches et observer le décalage de la fréquence de résonance en fonction de la position de la surcharge. On peut également étudier l'influence de la dissipation sur la courbe de résonance en retournant l'ensemble diapason/caisse de résonance au dessus d'une cuve remplie d'eau et en immergeant de quelques millimètres les extrémités du diapason. Consulter le BUP sur la résonance du diapason : section 1.3.4 pour l'influence de la charge et section 2.1 pour l'augmentation de l'amortissement.

4 Résonance paramétrique [facultatif]

Cette expérience n'est pas directement utile pour les leçons mais est proposée pour la culture. Ne l'abordez que si vous avez eu le temps de faire correctement le reste de ce TP. Si vous n'avez pas plus de trois minutes, taper *Botafumeiro* sur Youtube !



Une résonance peut aussi être observée si, au lieu d'exciter directement un degré de liberté du système, on en varie un paramètre. On peut, par exemple, observer une résonance paramétrique en faisant varier la longueur d'un pendule simple. Un exemple courant est celui de la balançoire. Une balançoire peut être vue comme un pendule dont la longueur va du point d'accroche au centre de gravité de l'ensemble balançoire + passager. La position de ce centre de gravité varie selon la position du passager et peut être basse s'il déplie les jambes ou plus haute si celui-ci les regroupe proche de son corps. Lorsque le passager plie et déplie successivement les jambes, il fait varier en même temps la longueur du pendule. Généralement cela n'a aucun effet sur l'amplitude des oscillations, sauf si la longueur est diminuée précisément à chaque passage par la verticale et augmentée aux instants où l'angle avec la verticale est maximum. Dans ce cas l'amplitude des oscillations augmente progressivement. La fréquence de cette excitation est alors le double de la fréquence propre du pendule. Ce constat que l'excitation est plus efficace lorsqu'elle est effectuée à une fréquence double de la fréquence propre du système est une propriété générale de la résonance paramétrique.

Vous pouvez réaliser l'expérience en suspendant une masse à un fil sur lequel vous pouvez tirer pour modifier périodiquement la longueur du pendule et c'est exactement le mécanisme à l'œuvre dans le Botafumeiro.

Notez pour finir qu'un autre moyen d'exciter un pendule simple de manière paramétrique est de faire varier g ce qui peut être fait, au moins de manière effective, en oscillant verticalement le point d'accroche du pendule. Là encore cette excitation est favorable lorsqu'elle est effectuée à deux fois la fréquence propre du système.

