

TP – n°9 Ondes

PCSI 2023 – 2024

I Présentation du matériel

1. Généralité sur les ultrasons

L'oreille humaine perçoit les ondes sonores dont les fréquences sont comprises entre 20 Hz et 15/20 kHz (suivant l'âge) environ, telles que celles produites par les vibrations des cordes vocales ou de la membrane d'un haut-parleur. Les ultrasons sont des ondes sonores de fréquence supérieure à 20 kHz, donc inaudibles pour l'oreille humaine (certains animaux peuvent par contre y être sensibles, comme les chiens ou les chauve-souris). Les ultrasons sont produits et détectés par des transducteurs piézo-électriques¹ :

- un émetteur d'ultrasons émet une onde ultrasonore de même fréquence que la tension électrique appliquée à ses bornes ;
- un détecteur d'ultrasons transforme l'onde ultrasonore, existant à l'endroit où il est situé, en une tension électrique de même fréquence que l'onde ultrasonore.

2. Types d'émetteurs

Au laboratoire, nous disposons de deux types d'émetteurs à ultrasons

2.a. Émetteur de type 1

Il se présente sous la forme d'un boîtier rectangulaire de grande taille et doit être alimenté par une tension continue (0 - 15 V). Un générateur interne permet de synthétiser le signal électrique qui excite le cristal piézo-électrique ; ce signal est un créneau, de fréquence réglable dans un domaine étroit, et il est émis soit de façon permanente, soit sous forme de salves périodiques de durée plus ou moins grande (salve courte ou salve longue).

Manipulation :

- Alimenter le boîtier avec une tension continue 0-15 V.
- Sélectionner sur le boîtier le mode de « salves de courte durée » à l'aide des deux interrupteurs.
- Le signal électrique appliqué au transducteur est disponible sur la prise BNC du boîtier ; visualiser ce signal à l'oscilloscope (voie 1).
- Représenter ce signal et mesurer ses grandeurs caractéristiques.

2.b. Émetteur de type 2

Il se présente sous la forme d'un boîtier rectangulaire de petite taille, à relier directement à un GBF délivrant le signal électrique qui doit exciter le cristal piézo-électrique. *Attention à ne pas confondre avec le boîtier détecteur (appelé récepteur par le fabricant), très ressemblant.*

1. La piézoélectricité est la propriété que possèdent certains corps de se polariser électriquement sous l'action d'une certaine contrainte mécanique et réciproquement de se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique

Manipulation :

- Régler le GBF pour obtenir un signal sinusoïdal, de fréquence 40 kHz, d'amplitude maximale (environ 10 V).
- Relier le boîtier émetteur au GBF et visualiser le signal délivré par le GBF à l'oscilloscope (voie 1).
- Prendre un boîtier détecteur et le relier à l'oscilloscope (voie 2) : on visualise ainsi le signal reçu par le détecteur.
- Placer le boîtier détecteur face au boîtier émetteur, à quelques centimètres et modifier la forme du signal délivré par le GBF. Conclure en comparant la forme et la fréquence du signal appliqué à l'émetteur avec la forme et la fréquence du signal reçu par le détecteur.
- Modifier la fréquence du signal délivré par le GBF et déterminer la fréquence rendant maximale l'amplitude du signal reçu par le détecteur. À quoi correspond cette fréquence ?

Dans la suite, on utilisera un signal d'excitation sinusoïdal, de fréquence correspond à ce maximum.

II Mesure de la célérité des ondes sonores

L'onde ultrasonore émise par un émetteur est une onde progressive sinusoïdale se déplaçant dans l'air de la salle de TP. La détermination de la célérité c de cette onde repose sur la mesure de la durée Δt nécessaire à l'onde pour parcourir une certaine distance d . Deux méthodes sont alors envisageables.

- Rappeler l'expression de c en fonction de d et Δt .

1. Méthode 1, avec l'émetteur de type 1

1.a. Principe

L'utilisation de l'émetteur de type 1 en mode « salves » permet *a priori* de connaître l'instant d'émission de l'onde et donc de déterminer la durée Δt de propagation. Pour cela, il est nécessaire de visualiser simultanément sur l'oscilloscope le signal issu de l'émetteur et le signal issu du détecteur.

1.b. Mesures

- Placer l'émetteur et le détecteur sur le banc l'un en face de l'autre ; régler l'émetteur en mode « salves courtes ».
- Visualiser le signal appliqué au transducteur (prise BNC du boîtier émetteur) à l'oscilloscope en voie 1 et le signal reçu par le détecteur en voie 2. Quel signal à t-on intérêt d'utiliser pour le déclenchement ?
- Représenter sur un même graphe l'allure du signal issu de l'émetteur et celui issu du détecteur. Faire figurer la durée de propagation Δt .
- Mesurer la distance émetteur/détecteur d et la durée de propagation Δt pour plusieurs positions du détecteur ; synthétiser les résultats dans deux listes Python.

1.c. Exploitations

- Quelle est la demi-largeur, Δ_d , de la plage de variabilité des mesures de d ?
- Quelle est la demi-largeur, Δ_t , de la plage de variabilité des mesures de Δt ?
- Justifier que la relation liant d et Δt s'écrit : $d = c\Delta t + d_0$.
- Nous disposons de mesures pour Δt et pour d , ainsi en traçant en fonction de Δt on espère obtenir une droite de pente c . Cependant, comme les mesures effectuées possèdent une variabilité, la pente c sera connue avec une certitude incertitude qu'il faut évaluer. Pour cela, on va utiliser une méthode dite de Monte-Carlo :

- Pour chaque point de mesure $(d_i, \Delta t_i)$, on tire aléatoirement un nouveau point $(d'_i, \Delta t'_i)$ avec $d'_i \in [d_i - \Delta_d, d_i + \Delta_d]$ et $\Delta t'_i \in [\Delta t_i - \Delta_t, \Delta t_i + \Delta_t]$.
- On effectue une régression linéaire sur les points $(d'_i, \Delta t'_i)$ et on stocke la pente c_i .
- On itère ce processus un très grand nombre de fois (typiquement, 10 000 ou 100 000 fois) pour calculer la moyenne, \bar{c} des c_i et leur écart-type $u(\bar{c})$. On trouve alors la vitesse des ondes et l'incertitude $\Delta_c = \frac{u(\bar{c})}{\sqrt{3}}$ associée à sa mesure.
- Compléter le script Python pour obtenir c et Δ_c à partir de vos mesures.

2. Mesure directe de la longueur d'onde

En reprenant le dispositif expérimental vu en I2.b., on observe à l'oscilloscope une variation du déphasage entre le signal reçu par l'émetteur et le signal fourni par le détecteur lorsque la distance émetteur-détecteur varie. Plus précisément, lorsque le déphasage varie de 2π , de quelle longueur varie distance émetteur/récepteur ?

- L'émetteur (de type 2) étant fixé, déplacer le détecteur sur le banc et noter les positions successives x_n du détecteur telles que les deux courbes soient en phase.
- Utiliser le logiciel RÉGRESSI pour représenter le graphe $x_n = f(n)$.
- Modéliser la fonction f et vérifier que les points en concordance de phase sont distants de $n\lambda$.
- En déduire une valeur de la longueur d'onde λ et retrouver c .

III Interférences

1. Principe

En utilisant deux émetteurs synchrones E_1 et E_2 , des interférences se forment dans la zone atteinte par les deux signaux. Plus précisément, quand on déplace le détecteur sur un arc de cercle centré sur les émetteurs, on observe des maxima et des minima ultrasonores; la position du maximum d'ordre n est donné par la relation $\sin \theta_n = n \frac{\lambda}{a}$, où a est la distance entre les deux émetteurs.

2. Mesures

- Accoler deux émetteurs de type 2 au centre du rapporteur et les alimenter par le même signal issu du GBF; évaluer la distance a en E_1 et E_2 .
- Fixer le détecteur au moyen de Patafix sur le bras servant de rayon; le relier à l'oscilloscope.
- Noter les valeurs de θ correspondant aux minima et aux maxima d'amplitude quand on déplace le détecteur sur l'arc de cercle.
- Placer les résultats sur un graphe $\sin \theta_{max}$ en fonction de n ; en déduire une estimation de $\frac{\lambda}{a}$ puis λ .

IV Corde de Melde

La corde de Melde a été présentée en cours. On se propose ici de vérifier que la modélisation vue en cours est correcte.

1. Rappeler l'expression de la longueur d'onde du mode n .
2. En déduire la fréquence du mode n .
3. La vitesse des ondes transversales sur la corde dépend de sa tension T et de sa masse linéique μ . Retrouver par une analyse dimensionnelle cette vitesse et obtenir une nouvelle expression de la fréquence des modes propres.
4. On souhaite vérifier l'exactitude de cette relation. Pour cela on dispose du matériel suivant :
 - Un vibreur
 - Une balance
 - Un mètre ruban
 - Un jeu de cordes
 - Un jeu de masses calibrées
 - Un GBF et un oscilloscope

Proposer un protocole expérimental qui permet de vérifier le lien entre la fréquence de résonance de la corde et :

- * le rang n ,
 - * la tension de la corde
 - * la longueur de la corde
 - * la masse linéique de la corde.
5. Faites valider ce protocole par votre professeur et mettez le en œuvre.
 6. Présentez **clairement** et **succinctement** vos conclusions dans votre cahier de TP.

V Diapason

1. Description

Un diapason est constitué de deux lames (branches) épaisses parallèles, soudées en forme de U et prolongées par une tige. Les branches en métal élastique (usuellement l'acier) en vibrant émettent un son à la fréquence étalonnée. Son invention est attribuée au trompettiste et luthiste anglais John Shore (1662-1752) en 1711. La principale raison de la forme du diapason est qu'il produit une note pratiquement pure. La majeure partie de l'énergie de vibration se retrouve dans la fréquence fondamentale, et très peu dans les harmoniques, contrairement aux autres résonateurs (comme la corde de Melde). La fréquence propre du diapason peut être calculée dans le cadre de la mécanique des milieux continus (programme de L3 de physique) et celle-ci vaut $f = \frac{AE}{\rho l^3}$, avec A la section des branches, E le module d'Young du matériau, ρ sa masse volumique et l la longueur des lames.

Les diapasons sont actuellement utilisés en musique afin d'accorder les instruments, mais également en recherche. En effet, la fréquence de résonance du diapason dépend des propriétés physiques des branches. Ainsi en perturbant l'une des branches (par exemple si celle-ci est en contact avec un substrat) la fréquence de résonance change. Ce phénomène est alors mis à profit dans des microscope à force atomique (AFM). (Giessibl, Franz J., *Atomic resolution on Si(111)-(7x7) by noncontact atomic force microscopy with a force sensor based on a quartz tuning fork*, Applied Physics Letter, **76** (2000)).

2. Manipulations

On souhaite mesurer la fréquence produite par le diapason seul d'une part et le diapason dont l'une des branches a été alourdi par un aimant d'autre part.

1. Mettez en œuvre un protocole expérimental permettant de mesurer ces fréquences. Faites-le valider par votre professeur.
2. La différence de fréquence entre les deux situations est faible. Une *astuce* pour mesurer de faibles écarts de fréquences entre deux signaux consiste à les additionner. En effet, dans ce cas on observe un phénomène de battement dont la période T est directement liée à l'écart de fréquences Δf des deux signaux : $T = \frac{1}{\Delta f}$. On se propose donc d'utiliser deux diapasons côte à côte et dont l'un est muni d'un aimant sur l'une de ces branches. Frapper les deux diapasons. Qu'entendez-vous ?
3. Enregistrez le signal produit par ces deux diapasons et déduisez-en une nouvelle mesure de l'écart en fréquence entre ceux-ci.