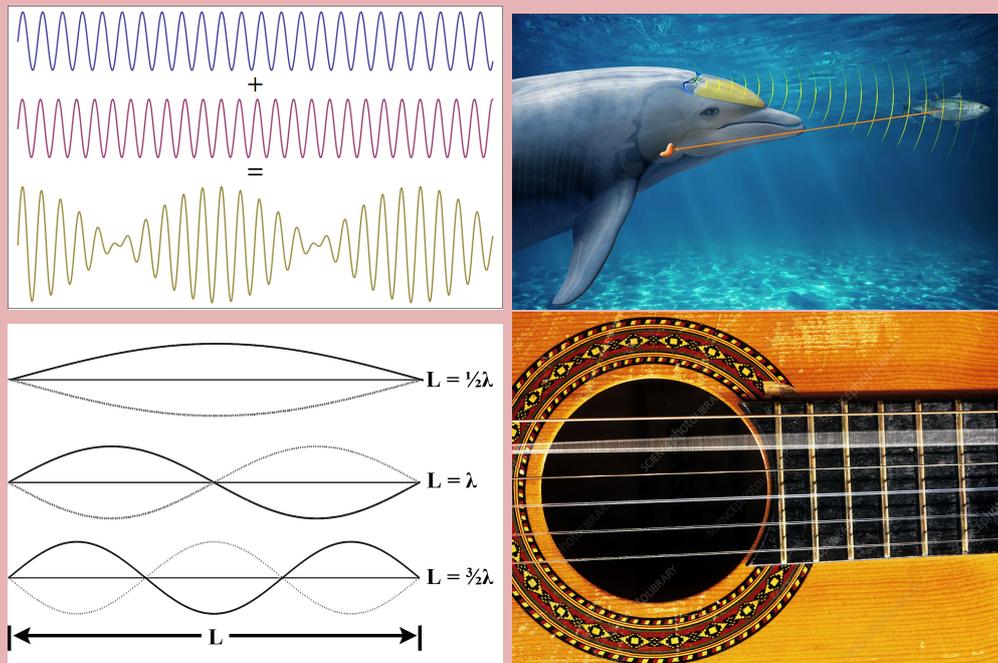


Année Universitaire 2021-2022

TRAVAUX PRATIQUES PHYSIQUE des ONDES



Enseignants :

Lise TAZAIRT : lise.tazairt@universite-paris-saclay.fr

Jean-Baptiste TOUCHAIS : jean-baptiste.touchais@universite-paris-saclay.fr

Julien BASSET : julien.basset@universite-paris-saclay.fr

Version du 1^{er} septembre 2021

A propos de la couverture

Figure en haut à gauche : La superposition de deux ondes de fréquences légèrement différentes donne lieu à des battements.

Figure en haut à droite : Les dauphins utilisent les ultrasons pour localiser les obstacles dans leur environnement.

Figure en bas à gauche : Visualisation des trois premiers modes propres de vibration d'une corde attachée en ses deux extrémités.

Figure en bas à droite : Vibration d'une corde de guitare.

Table des matières

1	Présentation et informations pratiques	5
2	Incertitude d'une mesure	7
2.1	Incertitude mesurée et incertitude calculée	7
2.2	Incertitude absolue et incertitude relative	9
2.3	Incertitude relative et dérivée logarithmique	9
3	TP 1 : Ultrasons (US)	11
3.1	Introduction	11
3.2	Rappels théoriques	12
3.2.1	Interférences	13
3.2.2	Battements	14
3.3	Dispositif expérimental	15
3.4	Manipulations	15
3.4.1	Signaux émis par un émetteur principal	15
3.4.2	Visualisation d'une onde progressive	16
3.4.3	Battements et interférences	16
3.4.4	Conservation de l'énergie	18
3.5	Manipulations facultatives	19
3.5.1	Réflexion d'une onde, application à l'échographie	19
3.5.2	Vitesse du son dans une mousse	20
3.6	Pour en savoir plus	20
4	TP 2 : Corde vibrante (CV)	23
4.1	Introduction	23
4.2	Rappels théoriques	24
4.3	Dispositif expérimental	25
4.4	Manipulations	26
4.4.1	Préliminaires	26
4.4.2	Mesure de la tension de la corde	27
4.4.3	Modes propres en oscillations libres	27
4.4.4	Modes propres en oscillations forcées	28
4.5	Annexes	29
4.5.1	Manipulations facultatives	29

4.5.2	Exemple d'estimation de l'incertitude sur la tension	30
4.5.3	Rappel sur les séries de Fourier	30
4.6	Quelques notions sur la gamme tempérée	32

Chapitre 1

Présentation et informations pratiques

Ces travaux pratiques font partis de l'enseignement de physique des ondes, deux séances sont au programme. Dans l'ordre :

- **TP 1 : Ultrasons (US)**
- **TP 2 : Corde vibrante (CV)**

Les salles de TP sont au **2ème étage du bâtiment 333**. Il s'agit des salles 214 (corde vibrante), et 201 (ultrasons). Les séances du matin ont lieu de **8h30 à 12h30** et celles de l'après-midi de **13h30 à 17h30**.

Les **enseignants** qui vous encadrent seront, sauf changement :

Jean-Baptiste TOUCHAIS (jean-baptiste.touchais@universite-paris-saclay.fr)

Lise TAZAIRT (lise.tazairt@universite-paris-saclay.fr)

Julien Basset (julien.basset@universite-paris-saclay.fr)

Le **technicien** qui gère les salles de travaux pratiques s'appelle Vincent Ezratti (vincent.ezratti@universite-paris-saclay.fr, 01 69 15 74 24, pièce 210).

Vous devez **absolument** rendre un **compte-rendu (CR)** de votre travail en fin de séance. Ce CR devra comporter les points suivants :

- Votre **nom**, votre **prénom** et le numéro du **groupe de TP**.
- Une **introduction** indiquant les objectifs du travail.
- Les **résultats expérimentaux avec les unités**.
- La prise en compte des **incertitudes de mesure**.
- L'**interprétation** de ces résultats. Ainsi que des **explications**.

Il faut **rédigé** le CR (c'est-à-dire faire des phrases, mettre en valeur les résultats en les encadrant, etc.). Votre CR doit être compréhensible par un étudiant de votre année qui n'aurait pas fait le TP.

Notation. La note tient compte du comportement en TP et du CR. A titre indicatif, le barème (sur 20) est :

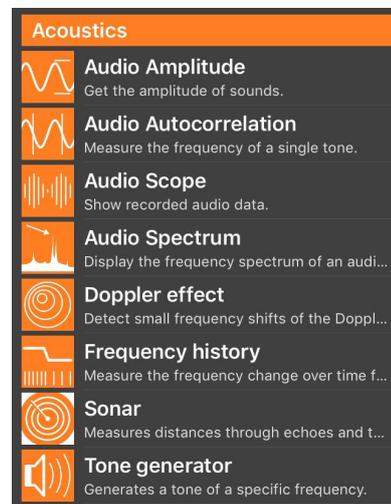
- 8 et moins : sanction (par exemple : un comportement inadmissible lors du TP), très mauvaise note.
- 10 : mauvais travail, insuffisant, mais sans le caractère d'une sanction.
- 12 : travail moyen. Pas plus que ce qui est demandé mais fait sérieusement.
- 14 : bon travail, soigné, une petite originalité par rapport à ce qui est demandé.
- 16 : très bon travail, des idées originales, une bonne compréhension de l'expérience et de la physique. Autonomie et initiatives.
- 18 : travail exceptionnel, l'enseignant apprend quelque chose de nouveau.

La note finale de TP est la moyenne de la note pour chacun des TPs. La note de TP représente un quart de la note finale de physique des ondes.



L'application « phyphox » téléchargeable sur votre smartphone a été développée par l'Institut de Physique de l'Université RWTH Aachen en Allemagne.

Un lien entre l'application et la physique des ondes est proposé au fil des exercices dans des encadrés dédiés.



Chapitre 2

Incertitude d'une mesure

Dans ce chapitre, on introduit la notion d'incertitude d'une mesure. Ce chapitre est utile pour toutes les séances de travaux pratiques puisqu'on vous demande systématiquement de donner le résultat d'une mesure sous la forme :

grandeur physique = valeur centrale (ou moyenne) \pm incertitude [unités]

Sommaire

2.1	Incertitude mesurée et incertitude calculée	7
2.2	Incertitude absolue et incertitude relative	9
2.3	Incertitude relative et dérivée logarithmique	9

2.1 Incertitude mesurée et incertitude calculée

On va considérer un exemple concret. On cherche à obtenir la vitesse v d'une particule. Pour cela on mesure la distance d parcourue par cette particule durant un temps t qui est lui aussi mesuré. On mesure la distance à l'aide d'une règle et comme la mesure n'est pas infiniment précise, on obtient un résultat sous la forme :

$$d = \bar{d} \pm \Delta d \text{ mm} \tag{2.1}$$

où on indique les unités (ici on a choisi les millimètres). La valeur \bar{d} est la distance qu'on pense être la plus juste : on parle de valeur centrale. Mais comme on a utilisé une règle, il est illusoire de penser que cette distance est exacte. Par exemple, il est certain qu'elle n'est pas connue au nanomètre près (10^{-9} m). Il faut donc estimer l'incertitude Δd . Sans doute qu'avec une règle d'écolier, on ne peut mesurer plus précisément qu'au millimètre ou au demi millimètre près (rien qu'en raison de la graduation de la règle). On va donc choisir $\Delta d = 1$ mm. Avec un pied à coulisse, on pourrait certainement obtenir une incertitude beaucoup plus petite. L'incertitude de mesure dépend de l'appareil de mesure et de la manière dont la mesure a été faite.

De même, on va mesurer le temps t avec une montre. On obtient un résultat de la forme :

$$t = \bar{t} \pm \Delta t \text{ s} \quad (2.2)$$

où \bar{t} est la valeur centrale, l'incertitude mesurée Δt est à estimer et on a choisi les secondes comme unité.

De ces deux mesures, on veut en déduire la vitesse de la particule :

$$v = \bar{v} \pm \Delta v \text{ mm/s} \quad (2.3)$$

La vitesse v n'est pas mesurée directement mais va être obtenue à partir des mesures de d et t . La vitesse v est donc calculée. On va utiliser la formule :

$$v = \frac{d}{t} = \text{fonction}(d, t) = f(d, t) \quad (2.4)$$

qui montre que mathématiquement, la vitesse est une fonction de deux variables (c'est pourquoi va intervenir la notion de dérivée partielle). La question est maintenant : comment obtenir la vitesse centrale \bar{v} et l'incertitude sur la vitesse Δv par le calcul à partir des quantités mesurées \bar{d} , Δd , \bar{t} et Δt ? On va utiliser un développement limité de la fonction $f(d, t)$ en supposant que les incertitudes mesurées sont petites :

$$v = f(\bar{d} \pm \Delta d, \bar{t} \pm \Delta t) \approx f(\bar{d}, \bar{t}) \pm \frac{\partial f}{\partial d}(\bar{d}, \bar{t})\Delta d \pm \frac{\partial f}{\partial t}(\bar{d}, \bar{t})\Delta t \quad (2.5)$$

On en déduit que la vitesse centrale est

$$\bar{v} = f(\bar{d}, \bar{t}) = \frac{\bar{d}}{\bar{t}} \quad (2.6)$$

et que l'incertitude calculée Δv est bornée supérieurement par

$$(\Delta v)_{\max} \equiv \left| \frac{\partial f}{\partial d}(\bar{d}, \bar{t}) \right| \Delta d + \left| \frac{\partial f}{\partial t}(\bar{d}, \bar{t}) \right| \Delta t \quad (2.7)$$

Dans la suite, on fera l'hypothèse de la pire situation (celle de corrélation maximale, où les erreurs s'ajoutent systématiquement) : on estime donc l'incertitude calculée en disant qu'elle est égale à sa borne supérieure¹ $\Delta v \approx (\Delta v)_{\max}$. Dans notre exemple, la fonction $f(d, t)$ est très simple et on peut facilement calculer les deux dérivées partielles :

$$\frac{\partial f}{\partial d} = \frac{1}{t} \text{ et } \frac{\partial f}{\partial t} = -\frac{d}{t^2} \quad (2.8)$$

d'où

$$\Delta v = \frac{1}{\bar{t}} \Delta d + \frac{\bar{d}}{\bar{t}^2} \Delta t \quad (2.9)$$

A retenir :

1. Une autre possibilité consisterait à supposer que les incertitudes sur d et t ne sont pas corrélées et distribuées de manière gaussienne. Dans ce cas, on peut montrer que $\Delta v = \sqrt{(\left| \frac{\partial f}{\partial d}(\bar{d}, \bar{t}) \right| \Delta d)^2 + (\left| \frac{\partial f}{\partial t}(\bar{d}, \bar{t}) \right| \Delta t)^2} \leq (\Delta v)_{\max}$.

- différence entre une incertitude mesurée et une incertitude calculée
- un résultat (qu'il s'agisse d'une quantité directement mesurée ou bien calculée à partir de quantités mesurées) = valeur centrale \pm incertitude [unités]

2.2 Incertitude absolue et incertitude relative

Une incertitude absolue a la même dimension que la quantité mesurée. Par exemple, la distance d est la quantité mesurée et Δd est l'incertitude absolue (qui a la dimension d'une longueur et se donne donc avec des unités). Dans le paragraphe précédent, toutes les incertitudes étaient des incertitudes absolues. Imaginons que $d = 45 \pm 1$ mm. Alors $\bar{d} = 45$ mm est la valeur centrale (ce qu'on pense être la véritable distance) et $\Delta d = 1$ mm est l'incertitude absolue sur la distance.

On préfère parfois utiliser les incertitudes relatives. Une incertitude relative n'a pas de dimension, c'est un nombre, elle n'a pas d'unités et on l'exprime souvent en pourcentage. L'incertitude relative mesure l'incertitude absolue relativement à la valeur centrale. Par exemple :

$$\frac{\Delta d}{\bar{d}} = \frac{1}{45} = 0.022\dots \approx 2\% \quad (2.10)$$

A retenir :

- une incertitude absolue est une quantité dimensionnée (unités) : Δv
- une incertitude relative est un nombre sans dimension (un %) : $\Delta v/\bar{v}$

2.3 Incertitude relative et dérivée logarithmique

Quand l'incertitude à calculer est donnée par une formule ne faisant intervenir que des multiplications ou des divisions (par exemple $v = f(d, t) = d/t$), il y a une astuce technique qui permet d'obtenir facilement l'incertitude relative : c'est la dérivée logarithmique. Imaginons que $v = f(d, t) = d^\alpha \times t^\beta$ (dans notre exemple $\alpha = 1$ et $\beta = -1$). Alors, en utilisant les deux propriétés suivantes des logarithmes

$$\ln v = \ln(d^\alpha \times t^\beta) = \alpha \ln d + \beta \ln t \text{ et } d(\ln v) = \frac{dv}{v} \quad (2.11)$$

on peut montrer que :

$$\frac{dv}{v} = \alpha \frac{dd}{d} + \beta \frac{dt}{t} \quad (2.12)$$

On en déduit que l'incertitude relative (calculée) est :

$$\frac{\Delta v}{\bar{v}} = |\alpha| \frac{\Delta d}{\bar{d}} + |\beta| \frac{\Delta t}{\bar{t}} = \frac{\Delta d}{\bar{d}} + \frac{\Delta t}{\bar{t}} \quad (2.13)$$

On peut vérifier qu'on retrouve bien l'incertitude absolue (2.9) en faisant le produit de l'incertitude relative et de la valeur centrale :

$$\Delta v = \bar{v} \times \frac{\Delta v}{\bar{v}} = \frac{1}{\bar{t}} \Delta d + \frac{\bar{d}}{\bar{t}^2} \Delta t \quad (2.14)$$

Références : sur le web, les documents en anglais suivant sont utiles (Error propagation) :

http://physicslabs.cwru.edu/MECH/Manual/Appendix_V_Error_Prop.pdf

<http://www.physics.umd.edu/courses/Phys261/F06/ErrorPropagation.pdf>

Chapitre 3

TP 1 : Ultrasons (US)

Sommaire

3.1	Introduction	11
3.2	Rappels théoriques	12
3.2.1	Interférences	13
3.2.2	Battements	14
3.3	Dispositif expérimental	15
3.4	Manipulations	15
3.4.1	Signaux émis par un émetteur principal	15
3.4.2	Visualisation d'une onde progressive	16
3.4.3	Battements et interférences	16
3.4.4	Conservation de l'énergie	18
3.5	Manipulations facultatives	19
3.5.1	Réflexion d'une onde, application à l'échographie	19
3.5.2	Vitesse du son dans une mousse	20
3.6	Pour en savoir plus	20

3.1 Introduction

Les ondes acoustiques sont des ondes longitudinales de surpression qui se propagent dans un fluide (de l'air, par exemple). Les ondes acoustiques audibles (le son) correspondent à des fréquences comprises entre 20 Hz et 20 kHz. Pour des fréquences inférieures à 20 Hz, on parle d'infra-son et pour des fréquences supérieures à 20 kHz, on parle d'ultrason. Les chauve-souris, par exemple, émettent et détectent les ultrasons (phénomène d'écholocation) ; mais également les dauphins et les souris. Les infra-sons sont utilisés par les éléphants et les vaches. Les ondes acoustiques sont en général non-dispersives, c'est-à-dire que la relation de dispersion entre la pulsation ω et le vecteur d'onde \mathbf{k} est de la forme $\omega = c|\mathbf{k}|$, où c est la vitesse de l'onde (elle est indépendante de la pulsation).

Pour émettre des ultrasons, on utilise ici des quartz piézoélectriques. Un cristal piézoélectrique transforme une tension électrique en un déplacement mécanique. Du point de vue électrique, un piézoélectrique est équivalent à un circuit RLC de grand facteur de qualité $Q \sim 200$: il y a donc une résonance étroite autour d'une fréquence caractéristique.

Dans ce TP, on se propose d'étudier les phénomènes d'interférences et de battements à l'aide d'ultrasons. On commence par un bref rappel théorique.

3.2 Rappels théoriques

Considérons une onde $u(x, t)$ d'amplitude (réelle) A . On a essentiellement en tête le cas d'une onde périodique de période T . L'intensité I de cette onde est donnée par la moyenne temporelle du carré de la vibration $I \propto \langle u(x, t)^2 \rangle_T$ et est donc proportionnelle à l'amplitude au carré : $I \propto A^2$. Le phénomène d'interférences consiste en ce qu'une onde u_r résultant de la superposition de deux ondes ($u_r = u_1 + u_2$) a une intensité $I \propto \langle u_r^2 \rangle_T$ qui n'est pas simplement la somme des intensités des deux ondes $I_1 + I_2$. Si l'intensité de l'onde résultante est plus grande que la somme on parle d'interférences constructives. Si elle est plus petite, on parle d'interférences destructives. Pour mettre en évidence des interférences, on modifie un paramètre pour faire varier l'intensité I_r – et donc l'amplitude A_r – de l'onde résultante.

Si les deux ondes initiales ont exactement la même fréquence et que le paramètre qu'on fait varier est la position du détecteur de l'onde résultante, on parle d'interférences dans l'espace ou plus simplement d'interférences tout court. Par contre si les deux ondes initiales n'ont pas exactement la même fréquence et qu'on ne change pas la position du détecteur, le paramètre qui modifie l'intensité I_r est le temps et on parle alors d'interférences dans le temps ou plus simplement de battements.

Pour formaliser un peu ces concepts, considérons deux émetteurs et un récepteur. Pour simplifier, on suppose que les émetteurs envoient des ondes sinusoïdales de même amplitude $A_1 = A_2 = A$. Au niveau du récepteur, l'onde reçue est la superposition des ondes provenant des deux émetteurs $u_r = u_1 + u_2$ où $u_1 = A \cos(\phi_1) = A \cos(\omega_1 t - k_1 l_1)$ et $u_2 = A \cos(\phi_2) = A \cos(\omega_2 t - k_2 l_2)$, où $k_j = 2\pi/\lambda_j = \omega_j/c$ est la norme du vecteur d'onde ($j = 1$ ou 2) et l_1 et l_2 sont les distances parcourues par les deux ondes pour aller de l'émetteur au récepteur.

Au niveau du récepteur, on peut réécrire l'onde reçue de la manière suivante

$$u_r = A[\cos(\phi_1) + \cos(\phi_2)] = 2A \cos(\delta\phi/2) \cos(\bar{\phi}) = A_r \cos(\bar{\phi})$$

où $\bar{\phi} = (\phi_1 + \phi_2)/2$ est la phase moyenne, $\delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ est la différence de phase entre les deux ondes et l'amplitude de l'onde résultante est $A_r = 2A \cos(\delta\phi/2)$.

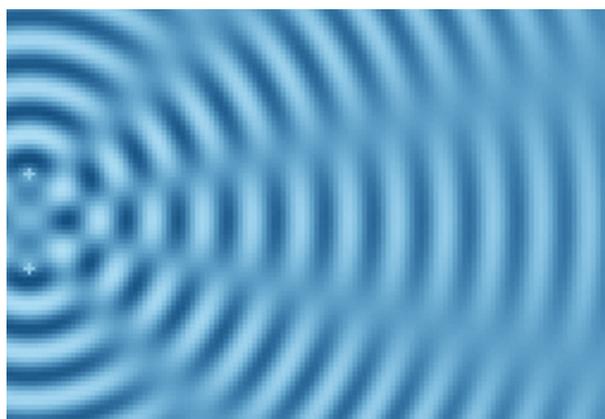


FIGURE 3.1 – Interférences (spatiales) pour des ondes à la surface de l'eau. Deux sources ponctuelles (à gauche de l'image, repérée par des croix) émettent des ondes circulaires à la même fréquence. On observe alors des interférences. Identifier les zones d'interférences constructives, les zones d'interférences destructives, la longueur d'onde, la distance entre les deux sources, etc.

3.2.1 Interférences

Pour observer des interférences (dans l'espace), les émetteurs doivent envoyer des ondes d'exactly la même fréquence¹ $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ donc $k_1 = k_2 = k$. Alors $\bar{\phi} = \omega t - k(l_1 + l_2)/2$ et $\delta\phi = k(l_2 - l_1)$. L'onde résultante est :

$$u_r = 2A \cos(k(l_2 - l_1)/2) \times \cos(\omega t - k(l_1 + l_2)/2) = A_r \cos(\omega t - k(l_1 + l_2)/2)$$

Comme l'intensité de l'onde est donnée par la moyenne temporelle (sur la période $T = 2\pi/\omega$) de u_r^2 , on trouve que²

$$I = \langle u_r^2 \rangle_T = \frac{1}{2} A_r^2 = A^2 [1 + \cos(k(l_2 - l_1))]$$

et donc

$$I = 2I_0 [1 + \cos(\delta\phi)] \text{ avec } \delta\phi = k(l_2 - l_1)$$

où $I_0 \equiv \langle u_1^2 \rangle_T = \langle u_2^2 \rangle_T = A^2/2$. En déplaçant le détecteur, on modifie la phase relative $\delta\phi = k(l_2 - l_1)$ et on fait donc varier l'amplitude A_r de l'onde résultante. La distance caractéristique sur laquelle il faut déplacer le détecteur pour modifier sensiblement l'amplitude A_r est donnée par la longueur d'onde λ car $\delta\phi = k(l_2 - l_1) = 2\pi(l_2 - l_1)/\lambda$.

Référence : Pour une animation qui permet de comprendre les interférences spatiales voir <http://www.ngsir.netfirms.com/englishhtm/Interference2.htm>

1. On utilisera indifféremment les termes fréquence et pulsation en se souvenant que $\omega = 2\pi\nu$ si ν désigne la fréquence et ω la pulsation.

2. On rappelle que la moyenne sur une période d'un cosinus carré ou d'un sinus carré est $1/2$: $\frac{1}{T} \int_0^T dt \cos^2(2\pi t/T + \text{constante}) = \frac{1}{T} \int_0^T dt \sin^2(2\pi t/T + \text{constante}) = 1/2$.

3.2.2 Battements

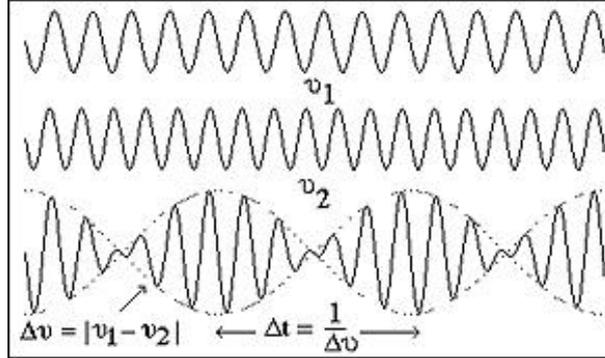


FIGURE 3.2 – Battements entre deux ondes de fréquence ν_1 et ν_2 . L'onde résultante u_r est représentée en bas et on a indiqué son enveloppe avec des lignes en pointillés.

Pour obtenir des battements, on prend deux ondes de fréquences différentes $\omega_1 \neq \omega_2$ (mais proches $\omega_1 \approx \omega_2 \approx \omega$) et on ne déplace pas le détecteur. Pour simplifier, on choisit de fixer le détecteur à égale distance des deux émetteurs ($l_1 = l_2 = l$) et on cherche à savoir ce qui se passe quand le temps t défile. Alors $\bar{\phi} = (\omega_1 + \omega_2)t/2 - (k_1 + k_2)l/2 = \bar{\omega}t - \bar{k}l$ et $\delta\phi = (\omega_1 - \omega_2)t - (k_1 - k_2)l = \delta\omega t - \delta k l$ (remarque : $\bar{k} = \bar{\omega}/c$, $\delta k = \delta\omega/c$ et $\bar{\omega} \approx \omega \gg \delta\omega$). L'onde résultante est :

$$u_r = 2A \cos(\delta\omega t/2 - \delta k l/2) \times \cos(\bar{\omega}t - \bar{k}l) = A_r \cos(\bar{\omega}t - \bar{k}l)$$

L'amplitude $A_r \equiv 2A \cos(\delta\omega t/2 - \delta k l/2)$ de l'onde résultante (on dit aussi l'enveloppe) oscille lentement au cours du temps à une fréquence qui est la moitié de la différence de fréquence entre les deux ondes³. Ce sont ces oscillations lentes de l'enveloppe qu'on appelle des battements. Les oscillations rapides correspondent à la fréquence $\bar{\omega} \approx \omega$. En résumé, il y a deux oscillations temporelles importantes : une rapide de pulsation $\bar{\omega}$, sur laquelle le détecteur va moyenner $I = \langle u_r^2 \rangle_{2\pi/\bar{\omega}}$, et une lente de pulsation $\delta\omega$ qui va donner lieu aux battements.

L'intensité de l'onde résultante est

$$I = \langle u_r^2 \rangle_{2\pi/\bar{\omega}} = \frac{1}{2} A_r^2 = A^2 [1 + \cos(\delta\omega t - \delta k l)]$$

et donc

$$I = 2I_0 [1 + \cos(\delta\phi)] \text{ avec } \delta\phi = \delta\omega t + \text{constante}$$

où $I_0 \equiv A^2/2$. On voit que la période des battements est $T_{batt} = 2\pi/|\delta\omega|$.

3. On en déduit que deux maxima successifs en intensité I_r sont séparés d'un temps $2\pi/|\delta\omega|$. Alors que leurs maxima successifs en amplitude A_r sont séparés d'un temps $4\pi/|\delta\omega|$. Comme c'est l'intensité qui est détectée, la fréquence des battements est $\nu_{batt} = |\delta\omega|/2\pi = 1/T_{batt}$.

Exemple de battements : Lorsqu'on veut accorder une guitare avec un diapason (qui émet, par exemple, un La à 440 Hz), on crée des battements entre la note produite par l'instrument de musique et celle produite par le diapason. Lorsque les battements disparaissent, c'est que la guitare a la même fréquence que le diapason.

3.3 Dispositif expérimental



FIGURE 3.3 – Photographie du dispositif expérimental.

Le dispositif est composé de :

- Deux émetteurs principaux (quartz piézoélectriques) d'ondes ultrasonores alimentés par une tension continue (+15 V). Ces émetteurs peuvent émettre soit un signal périodique dont on peut faire varier légèrement la fréquence, soit des salves courtes ou longues.
- Des émetteurs secondaires qui lorsqu'ils sont branchés sur les émetteurs principaux vont émettre exactement à la même fréquence que les émetteurs principaux (condition indispensable pour les interférences dans l'espace).
- Deux récepteurs dont le signal reçu peut être visualisé directement sur un oscilloscope.
- Des rails qui permettent un déplacement linéaire des détecteurs.
- Un support gradué angulairement (2 arcs de cercle de rayon $R_1 = 15$ cm et $R_2 = 30$ cm) qui permet un déplacement circulaire des détecteurs.
- Un oscilloscope vous permet soit de visualiser simultanément le signal émis par l'émetteur et le signal reçu par le récepteur, ou bien les signaux reçus par les deux détecteurs.
- Des blocs de mousse.

3.4 Manipulations

3.4.1 Signaux émis par un émetteur principal

A utiliser : 1 émetteur, 1 détecteur, alimentation continue 15 V.

Les émetteurs dont on dispose peuvent émettre soit des signaux sinusoïdaux soit des salves. Choisir un signal sinusoïdal.

- Visualiser sur l'oscilloscope la forme du signal électrique de l'émetteur et du récepteur. Les dessiner. Commenter sur les différences et similitudes entre ces 2 signaux.
- Faire varier la fréquence et observer l'amplitude du signal reçu par le détecteur. Expliquer ce phénomène en lien avec l'origine physique de la génération et détection des ultrasons.
- Choisir la fréquence qui correspond au maximum d'amplitude. On mesurera la période du signal grâce à l'outil curseur de l'oscilloscope et on en déduira la fréquence. On prendra soin de minimiser l'erreur en mesurant une dizaine de périodes. Présenter le résultat sous la forme :

$$\nu = \dots \pm \dots \text{ Hz}$$

3.4.2 Visualisation d'une onde progressive

A utiliser : 1 émetteur, 2 détecteurs, le rail linéaire.

La phase d'une onde progressive sinusoïdale dépend de la position du détecteur. Si on déplace le détecteur, la phase du signal change sauf si on se déplace d'un multiple entier de la longueur d'onde. C'est ce phénomène que vous allez utiliser pour mesurer la longueur d'onde d'une onde ultrasonore et en déduire sa vitesse de propagation.

- Placer deux détecteurs côte à côte sur le rail puis déplacer l'un des deux détecteurs le long du rail linéaire. Comparer les signaux reçus par les deux détecteurs, notamment leur phase respective.
- Repérer et relever les positions où le second détecteur a la même phase que le premier. On pourra utiliser le mode X-Y de l'oscilloscope.
- En déduire la longueur d'onde du signal en considérant plusieurs périodes :

$$\lambda = \dots \pm \dots \text{ m}$$

- En déduire la vitesse de propagation des ultrasons dans l'air :

$$c = \dots \pm \dots \text{ m/s}$$

- Comparer cette valeur à la vitesse du son dans l'air à la température de la salle (voir TD + cours pour la formule). Estimer le pourcentage d'erreur et commenter.

3.4.3 Battements et interférences

Battements (= interférences dans le temps)

A utiliser : 2 émetteurs indépendants, 1 récepteur.

Quand on additionne deux signaux de fréquences ν_1 et ν_2 très voisines, on obtient un signal sinusoïdal de fréquence moyenne entre les deux fréquences mais modulé en amplitude, les minimas d'intensité étant séparés d'un temps $1/|\nu_2 - \nu_1|$ (voir les rappels théoriques).

Ce sont des battements entre les deux fréquences. Pour obtenir un signal strictement à la même fréquence, il est essentiel de dédoubler physiquement le signal initial. L'objectif de cette expérience est de visualiser les battements de deux sources non strictement à la même fréquence.⁴

- Utiliser deux émetteurs indépendants (donc de fréquences ν_1 et ν_2 différentes) de façon à ce que leurs directions principales d'émission convergent sur un détecteur. On pourra pour se guider, utiliser la transformée de Fourier du signal détecteur (touche "math menu" puis choisir "FFT CH2", si ce signal est par exemple en voie 2) donnant accès à ν_1 et ν_2 . On ajustera les émetteurs de façon à avoir deux pics bien séparés et d'amplitudes équivalentes. Mesurer alors ν_1 et ν_2 .
- Revenir en mode oscilloscope classique et observer le signal transmis par le détecteur. Jouer sur la base de temps de l'oscilloscope et mettre en évidence deux périodes temporelles : l'une correspondant à une moyenne des signaux émis $\nu_+ = (\nu_1 + \nu_2)/2$, l'autre beaucoup plus grande associée à la différence de fréquence $\nu_- = (\nu_1 - \nu_2)/2$ entre les signaux (c'est ce que l'on appelle des battements, voir les rappels théoriques).
- Représenter sur un schéma ce que vous observez sur l'oscilloscope.
- Mesurer la fréquence principale ν_+ , la fréquence des battements ν_- et vérifier si cela colle avec les fréquences ν_1 et ν_2 mesurées avec la FFT.
- Que représente le rapport $T_-/T_+ = \nu_+/\nu_-$?
- Faire varier la fréquence d'un des émetteurs et observer l'effet sur la période des battements. On remarquera que augmenter la fréquence d'un des émetteurs n'est pas équivalent à augmenter la différence de fréquence entre émetteurs.

Interférences (= interférences dans l'espace)

A utiliser : 1 émetteur indépendant, 1 émetteur secondaire, 1 récepteur, le plateau circulaire.

Faire interférer deux ondes de même fréquence revient à ajouter leurs amplitudes : si les deux ondes sont en phase, leurs amplitudes réelles s'ajoutent, si elles sont en opposition de phase, elles se retranchent. Si le déphasage entre les deux ondes dépend de la position d'observation, l'amplitude réelle – et donc l'intensité résultante – varie dans l'espace. C'est ce phénomène que vous allez maintenant mettre en évidence.

Pour réaliser des interférences entre deux ondes cohérentes, nous allons utiliser un émetteur secondaire relié à un émetteur principal (même fréquence). Placer les deux émetteurs (principal et secondaire) au niveau du centre du support angulaire et parallèlement l'un à l'autre. L'émetteur secondaire peut être placé sur un support incliné à 45° de façon à pouvoir le rapprocher de l'émetteur principal. La somme des ondes émises par l'émetteur

4. Il existe une autre source d'incohérence que vous ne verrez pas dans ce TP : une source d'onde reste cohérente avec elle-même c'est-à-dire qu'elle a une phase bien déterminée seulement sur un intervalle de temps plus ou moins long. Pour les ondes ultrasonores, ce laps de temps est très long et dépend de la durée d'alimentation. Ce n'est pas le cas des ondes lumineuses car les sources lumineuses (mis à part les lasers) n'émettent que des trains d'onde sans relation de phase entre eux. On parle de temps de cohérence et donc de longueur de cohérence si on regarde la dépendance spatiale.

principal et l'émetteur secondaire va se produire naturellement et vous allez observer le résultat de cette interférence grâce à un détecteur mobile sur le plateau circulaire dont le centre correspond au milieu des deux sources.

- Mettre les deux émetteurs en place sur le support angulaire, les écarter de 2 cm environ et les placer symétriquement par rapport au centre du plateau, placer le récepteur sur la médiatrice à l'angle 0. Cacher l'émetteur secondaire puis cacher l'émetteur principal afin de régler (à l'aide du potentiomètre) l'amplitude d'émission de la source secondaire la plus proche possible de celle de l'émetteur principal.
- Etudier l'amplitude du signal en fonction de la position angulaire du détecteur en traçant une courbe de l'amplitude du signal reçu en fonction de l'angle en repérant notamment les positions des minima et des maxima locaux d'amplitude (attention éventuellement au commutateur de phase au pied des émetteurs). Effectuer ces mesures pour les deux rayons du plateau circulaire. Que constatez-vous ?
- Si d est la distance entre les deux sources, on s'attend à observer des maxima d'intensité pour les angles θ tels que $d \sin \theta_p = p\lambda$ avec p un entier et les minima pour $d \sin \theta_p = (p + 1/2)\lambda$. Faites la démonstration de ce résultat. Calculer les angles théoriques auxquels sont attendues les interférences constructives et destructives et les comparer avec l'expérience.
- Pour l'une des positions du détecteur et en déplaçant le détecteur sur un seul des rayons, modifier l'amplitude du signal de l'émetteur secondaire. Reprendre qualitativement l'étude précédente. Quelles grandeurs sont modifiées : la position des maxima et minima ? Leurs amplitudes ?
- Placer maintenant l'émetteur secondaire à 4 cm de l'émetteur principal, le milieu des deux émetteurs coïncidant le plus possible avec le centre du cercle. Reprendre qualitativement l'étude précédente. Quelles grandeurs sont modifiées : la position des maxima et minima ? Leurs amplitudes ? Commenter.

3.4.4 Conservation de l'énergie

Etudier la variation d'amplitude A du signal reçu par le détecteur en fonction de la distance r à l'émetteur. Représentez ces résultats dans un tableau de valeurs. Tracer $1/A$ en fonction de r sur du papier millimétré. On prendra soin de reporter en chaque points l'incertitude Δr sur la distance r et l'incertitude $\Delta(1/A)$ sur la mesure de $1/A$.

Obtenez-vous une droite ? Si oui, que cela signifie t'il ?

Tracer 3 droites : La droite de plus grande pente, la droite de plus petite pente et la droite moyenne en choisissant comme point fixe le point à $r = 0$ mm. Calculer la pente de chacune de ces trois droites et proposer un encadrement de la pente moyenne. Quelles sont les unités de ces coefficients directeurs ? Conclure.



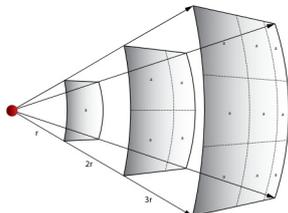
phyphox

physical phone experiments

Dans la catégorie acoustique de l'application phyphox se trouve un onglet « Audio Amplitude ».

Au cours de cette expérience votre smartphone mesure le niveau sonore en décibels.

Serait-ce possible de vérifier la loi de décroissance de l'intensité d'une onde sonore avec l'éloignement à la source?



Acoustics

-  **Audio Amplitude**
Get the amplitude of sounds.
-  **Audio Autocorrelation**
Measure the frequency of a single tone.
-  **Audio Scope**
Show recorded audio data.
-  **Audio Spectrum**
Display the frequency spectrum of an audi...
-  **Doppler effect**
Detect small frequency shifts of the Doppl...
-  **Frequency history**
Measure the frequency change over time f...
-  **Sonar**
Measures distances through echoes and t...
-  **Tone generator**
Generates a tone of a specific frequency.

3.5 Manipulations facultatives

... S'il vous reste du temps !

3.5.1 Réflexion d'une onde, application à l'échographie

- Visualiser le signal en forme de salves longues et courtes. Dessiner le signal et en déterminer toutes les caractéristiques : durée des salves, périodicité, etc.
- Placer un bloc métallique en face d'un des émetteurs. Placer le détecteur à côté de l'émetteur pour recueillir l'onde réfléchi. Envoyer un signal sous forme de salves courtes.
- Mesurer le décalage entre le signal émis par l'émetteur et celui reçu par le récepteur en fonction de la position du bloc métallique. En déduire par cette méthode la vitesse de propagation des ondes ultrasonores. La comparer aux valeurs obtenues précédemment.
- Remplacer le bloc métallique par une boîte en carton fermée par une feuille de papier très mince ou de mousse très fine et dans laquelle on aura placé un objet. Garder les conditions expérimentales précédentes. Détecter la position de l'objet dans la boîte en étudiant les "échos" reçus par le détecteur.



Dans la catégorie acoustique de l'application phyphox se trouve un onglet « Sonar ».

Au cours de cette expérience votre smartphone émet une onde sonore qui se réfléchit sur les obstacles environnants. L'onde réfléchie est mesurée puis analysée afin de donner la distance entre le téléphone et l'objet réfléchissant.



3.5.2 Vitesse du son dans une mousse

- Placer en face de l'émetteur dans la zone d'émission les deux détecteurs proches de manière à ce que les deux signaux soient en phase. Placer devant l'un des récepteurs un bloc de mousse dont on mesurera l'épaisseur e .
- Mesurer le déphasage entre les deux signaux, estimer la vitesse c' de propagation du son dans la mousse sachant que le décalage en temps introduit par la mousse est $e(1/c - 1/c')$, soit un déphasage de $\omega e(1/c - 1/c')$, où ω est la pulsation du signal.
- En prenant un bloc de mousse d'épaisseur différente, montrer que le décalage en temps ainsi que le déphasage sont bien proportionnels à l'épaisseur.
- En fait, pour voir effectivement que la vitesse du son est plus faible dans la mousse, la méthode la plus sûre est d'envoyer des salves, mais c'est un peu délicat ; ne le faites que si vous avez du temps.

3.6 Pour en savoir plus

Les applications des ultrasons sont nombreuses :

Le sonar : Les premières applications étaient celles de détection des obstacles sous-marins : navires enfouis sous les sédiments, bancs de poissons, balises, reliefs sous-marins (cartes sous-marines). Une impulsion de courte durée est envoyée par la source dans le milieu, elle est réfléchiée par l'obstacle puis recueillie par un détecteur. Le temps parcouru

mesuré permet de calculer la distance séparant l'obstacle de la source. Petite histoire de l'acoustique sous-marine : <http://www.sciences-ouest.org/reseau/f0152021.htm>.

L'échographie médicale : En utilisant des ondes acoustiques de très hautes fréquences et des techniques de reconstitution d'images initialement conçues pour les radars et les sonars, il est possible d'explorer les structures du corps humain sans douleurs, sans risques et à des coûts très faibles. Quelle fréquence ? Quand la fréquence augmente, l'absorption croît ce qui limite l'amplitude des signaux reçus. Le coefficient d'absorption pour les tissus mous est en moyenne de 0.9 dB/cm/MHz. Ainsi pour explorer des régions profondes telles que l'abdomen, il est nécessaire d'utiliser des fréquences basses (3.5 MHz). <http://www-ulpmed.u-strasbg.fr/ipb/edu/pcem2/echo2/index.htm>

<http://www.ese-metz.fr/metz/elevés/themes/imagerie/Echographie.htm>

Dans l'industrie agroalimentaire : on utilise les ultrasons pour détruire les bactéries et stériliser le lait, ainsi que pour fabriquer des émulsions telles que la mayonnaise, mélange de phase aqueuse et d'huile sous forme de fines gouttelettes. La vitesse de propagation des ultrasons étant très sensible à la composition du milieu tel que du jus d'orange, il est possible de doser finement de tels mélanges (concentré + eau). Dans le domaine médical, les ultrasons peuvent produire des aérosols très fins qui pénètrent plus profondément dans les bronches.

La cavitation ultrasonore (formation de bulles de gaz au sein d'un liquide) sert au nettoyage des lunettes, des bijoux, au détartrage des dents. Elle sert également au lavage industriel des textiles après leur tissage.

Dans l'industrie mécanique On peut aussi usiner des pièces industrielles par ultrasons de fréquences à peu près égales à 20 kHz et d'amplitude de quelques centièmes de millimètres. Les ultrasons sont aussi utilisés pour la détection de microfissures dans toutes les pièces mécaniques sensibles de voiture ou d'avion.

Chapitre 4

TP 2 : Corde vibrante (CV)

Sommaire

4.1	Introduction	23
4.2	Rappels théoriques	24
4.3	Dispositif expérimental	25
4.4	Manipulations	26
4.4.1	Préliminaires	26
4.4.2	Mesure de la tension de la corde	27
4.4.3	Modes propres en oscillations libres	27
4.4.4	Modes propres en oscillations forcées	28
4.5	Annexes	29
4.5.1	Manipulations facultatives	29
4.5.2	Exemple d'estimation de l'incertitude sur la tension	30
4.5.3	Rappel sur les séries de Fourier	30
4.6	Quelques notions sur la gamme tempérée	32

4.1 Introduction

Il s'agit ici d'étudier des ondes stationnaires transverses d'une corde vibrante. Une corde tendue attachée à ses deux extrémités possède des fréquences naturelles de vibration : elle résonne si on l'excite à ces fréquences particulières. Si la déformation de la corde est petite, ces fréquences sont des multiples entiers d'une fréquence de résonance (fréquence fondamentale), on les appelle les harmoniques. Les paramètres qui fixent cette fréquence de résonance sont la longueur de la corde et la vitesse de propagation des ondes transverses sur cette corde qui dépend de la tension de la corde et de sa masse linéique. Le déplacement de la corde entraîne le déplacement de l'air à son voisinage et génère une onde sonore qui peut être audible. C'est le principe des instruments à corde.

4.2 Rappels théoriques

On considère une corde de longueur L et de masse linéique μ_0 . Au repos elle est horizontale (axe x) et tendue avec une tension T_0 . Lorsqu'elle vibre on suppose que son mouvement a lieu uniquement dans la direction transverse y . Ainsi les ondes se propageant sur la corde vibrante seront des ondes transverses.

On imagine que la corde n'est plus au repos et on écrit l'équation du mouvement d'une portion infinitésimale de la corde. On appelle $u(x, t)$ le déplacement transverse de la corde (qui se trouve en $x, y = 0$ au repos) et $\mathbf{T}(x, t) = (T_x, T_y)$ la force (tension) exercée par la portion de corde à gauche de x sur la portion de corde à droite de x . La relation fondamentale de la dynamique (masse \times accélération = somme des forces) projetée sur l'axe y s'écrit :

$$\mu_0 dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \mathbf{T}(x, t) \cdot \mathbf{e}_y - \mathbf{T}(x + dx, t) \cdot \mathbf{e}_y \approx -\frac{\partial T_y}{\partial x}(x, t) dx \quad (4.1)$$

en négligeant la force de pesanteur. Comme le mouvement de la corde se fait uniquement selon y , l'équation fondamentale de la dynamique projetée selon x montre que $T_x \approx \text{constante} = -T_0$. De plus, comme la tension est tangente à la corde en chaque point, on a :

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \text{pente de la tangente} = \frac{T_y}{T_x} \approx -\frac{T_y}{T_0} \text{ donc } T_y \approx -T_0 \frac{\partial u}{\partial x} \quad (4.2)$$

En injectant la relation précédente dans l'équation fondamentale de la dynamique (4.1), on obtient l'équation d'onde de la corde vibrante :

$$\mu_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = T_0 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (4.3)$$

On reconnaît l'équation d'onde de d'Alembert

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (4.4)$$

ce qui permet d'identifier la vitesse de l'onde (ou célérité) :

$$c = \sqrt{\frac{T_0}{\mu_0}} \quad (4.5)$$

On rappelle que la relation de dispersion correspondant à cette équation d'onde est $f = c/\lambda$ où f est la fréquence et λ la longueur d'onde.

Les ondes stationnaires (ou modes propres) sont les ondes dont le mouvement temporel est harmonique, i.e. qui vibrent à une fréquence bien définie. Elles ont la forme suivante : $u(x, t) = A \sin(kx) \cos(\omega t + \varphi)$ où $k = 2\pi/\lambda$ et $\omega = 2\pi f$. Comme la corde est maintenue aux deux extrémités, on doit avoir $u(x = 0, t) = u(x = L, t) = 0$ à chaque instant. Ceci

impose que $\sin(kL) = 0$ et donc que la longueur d'onde ne peut prendre que certaines valeurs $\lambda_n = 2L/n$ où n est un entier strictement positif. On en déduit que les fréquences des modes propres sont :

$$f_n = n \times \frac{c}{2L} \quad (4.6)$$

On appelle $f_1 = c/2L$ la fréquence fondamentale et $f_n = nf_1$ (avec $n \geq 2$) les harmoniques.

4.3 Dispositif expérimental

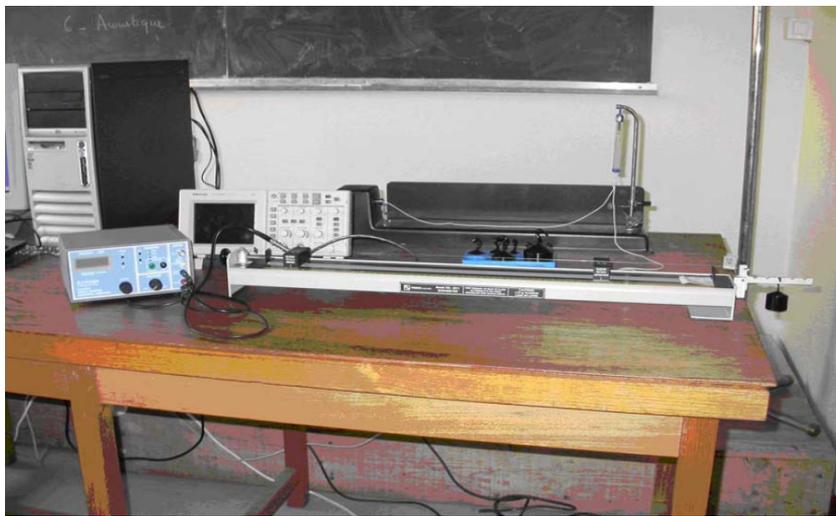


FIGURE 4.1 – Photographie du dispositif expérimental.

Le dispositif est composé de :

- Un sonomètre Pasco : support servant à fixer la corde, comprenant une vis permettant d'ajuster la position de la corde, un mètre et un levier porte-masses.
- Un jeu de masses permettant de régler la tension de la corde.
- Deux ponts (ou cavaliers) noirs amovibles permettant de régler la longueur de la corde.
- Une corde de guitare en acier de diamètre d environ compris entre 0.25 et 0.6 mm (à mesurer précisément au pied à coulisse).
- Un excitateur et un détecteur à bobines (i.e. des électro-aimants).
- Un G. B. F. (générateur à basses fréquences).
- Un oscilloscope numérique à mémoire (avec la possibilité de calculer la transformée de Fourier par la fonction FFT).

4.4 Manipulations

4.4.1 Préliminaires

Réglage de la tension de la corde

- Fixer la corde aux deux bouts.
- Choisir une masse, et l'accrocher au levier.
- Placer les deux ponts sous la corde de manière à ce que la longueur disponible soit la plus grande possible.
- Utiliser la vis pour ajuster la position du levier de telle sorte que le bras portant la masse soit horizontal.

Ecouter la corde vibrer

Pincer la corde (par exemple en son centre). Ecouter le son qu'elle produit. Changer la tension de la corde, et recommencer. Comment est modifié le son ? Par la suite, ne plus modifier la tension.

Principe de l'excitation et de la détection

Les dispositifs d'excitation et de détection des vibrations de la corde sont deux bobines. On génère une tension sinusoïdale à l'aide du GBF, que l'on amplifie avant de l'appliquer aux bornes de la bobine excitatrice. Quant à la bobine détectrice, la tension à ses bornes est directement mesurée par l'oscilloscope numérique. La bobine excitatrice crée un champ magnétique oscillant $B(t)$. Un courant apparaît dans la corde, proportionnel à $\frac{dB}{dt}$ (loi de Lenz). La force que crée alors le champ magnétique oscillant est donc proportionnelle à $B(t) \cdot \frac{dB}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dB^2}{dt}$ (force de Laplace proportionnelle au produit du courant par le champ magnétique). Si $B(t)$ varie comme $\cos(\omega t)$, alors la force varie comme $\sin(2\omega t)$ et crée un déplacement de la corde à la fréquence double de celle de l'excitation. Ce déplacement induit alors une variation du flux magnétique reçu par la bobine réceptrice et donc un courant induit à la fréquence double. C'est le signal mesuré à l'oscilloscope. La corde vibre donc à une fréquence double de celle affichée sur le GBF.

4.4.2 Mesure de la tension de la corde

- Quelle est l'unité de la tension de la corde T_0 ?
- On rappelle qu'il est important d'avoir placé le levier porte-masses à l'horizontale. La tension T_0 dépend non seulement de la masse mais aussi de la distance à laquelle on la place par rapport à l'axe.
- Donner la valeur de tension trouvée en précisant l'unité, présenter le résultat sous forme :

$$T_0 = (\bar{T}_0 \pm \Delta T_0) \text{ N}$$

et renseigner l'incertitude relative $\Delta T_0/\bar{T}_0$ en %.

- Commentaire sur cette valeur ?
- On donne la masse volumique $\rho = 7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ de l'acier. Mesurer le diamètre d de la corde (avec le pied à coulisse et en plusieurs points de la corde) et en déduire la masse linéique (i.e. par unité de longueur) μ_0 de la corde : $\mu_0 = (\bar{\mu}_0 \pm \Delta\mu_0) \text{ kg/m}$ et renseigner l'incertitude relative $\Delta\mu_0/\bar{\mu}_0$ en %.
- Mesurer la longueur L de la corde : $L = (\bar{L} \pm \Delta L) \text{ m}$ et renseigner l'incertitude relative $\Delta L/\bar{L}$ en %.
- Calculer la valeur théorique (à partir des valeurs obtenues pour T_0 et μ_0) attendue de la célérité $c_{th} = \sqrt{T_0/\mu_0}$: $c_{th} = (\bar{c}_{th} \pm \Delta c_{th}) \text{ m/s}$ et renseigner l'incertitude relative $\Delta c_{th}/\bar{c}_{th}$ en %.
- De quelle quantité mesurée vient la plus grande source d'erreur sur c_{th} ?

4.4.3 Modes propres en oscillations libres

- Eteindre le GBF.
- Pincer la corde et visualiser (à l'aide de l'oscilloscope) la transformée de Fourier du signal détecté (touche "math menu" puis choisir "FFT CH2", si ce signal est par exemple en voie 2). Qu'observez-vous ?
- Mesurer la fréquence des pics à l'aide des curseurs (touche "cursors" puis "source" math et "type" fréquence). Commenter. On rappelle que la fréquence des différents modes s'écrit : $f_n = n \times c/2L$ où n est un entier strictement positif et c est la vitesse de l'onde transverse.
- A partir des mesures des fréquences observées, déduire la valeur expérimentale de c (en précisant l'unité) :

$$c = (\bar{c} \pm \Delta c) \text{ m/s}$$

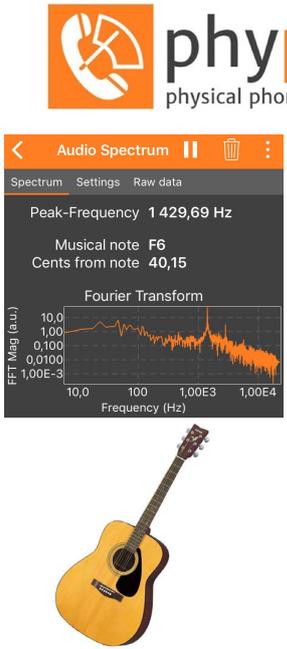
et la comparer à c_{th} .

- Varier la position du point où l'on excite la corde. Interpréter ce que l'on observe.
- Comparer ce que l'on observe quand on pince la corde (guitare) ou quand on la frappe avec un petit marteau (piano).
- Faire varier la tension de la corde et vérifier que les fréquences des modes propres varient comme on l'attend. On effectuera en tout la mesure pour 4 tensions différentes et on

présentera les résultats sous la forme d'un tableau :

T_0 (N)				
Fréquence fondamentale attendue (Hz)				
Fréquence fondamentale déduite des mesures (Hz)				

- A partir des fréquences mesurées, en déduire les vitesses de propagation de l'onde dans la corde c_{exp} et tracer sur papier millimétré la courbe $c_{exp}^2 = f(T_0)$. Obtenez-vous bien une droite ? Si oui, tracer la droite moyenne et calculer sa pente. A quelle quantité déjà mesurée cette pente est-elle reliée ? Retombez-vous sur la même valeur ?



phyphox
physical phone experiments

Audio Spectrum

Peak-Frequency 1 429,69 Hz

Musical note F6
Cents from note 40,15

Fourier Transform

FFT Mag (a.u.)

Frequency (Hz)

Dans la catégorie acoustique de l'application phyphox se trouve un onglet « Audio Spectrum ».

Au cours de cette expérience votre smartphone capte le son environnant et réalise la transformée de Fourier du signal tout comme l'oscilloscope du TP.

En excitant la corde comme vous venez de le faire pour votre TP observez en un clin d'œil les effets de la tension et la longueur de la corde sur le spectre de Fourier délivré par votre smartphone.



Acoustics

- Audio Amplitude: Get the amplitude of sounds.
- Audio Autocorrelation: Measure the frequency of a single tone.
- Audio Scope: Show recorded audio data.
- Audio Spectrum**: Display the frequency spectrum of an audi...
- Doppler effect: Detect small frequency shifts of the Doppl...
- Frequency history: Measure the frequency change over time f...
- Sonar: Measures distances through echoes and t...
- Tone generator: Generates a tone of a specific frequency.

4.4.4 Modes propres en oscillations forcées

- Exciter la corde à l'aide d'un signal sinusoïdal.
- Faire varier la fréquence de ce signal et montrer que la corde ne vibre que pour certaines fréquences dites "de résonance" telles que $f_n = n f_1$, n étant un nombre entier.
- Quelle est l'incertitude sur la mesure de ces fréquences ?

Fréquences mesurées (Hz)							
--------------------------	--	--	--	--	--	--	--

- En déduire la fréquence du mode fondamental et comparer à la fréquence attendue suivant les valeurs de la tension T_0 , de la longueur L et de la masse linéique μ_0 . Vérifier que la fréquence du mode fondamental est conforme à ce que l'on attend :

f_1 attendue (Hz)	
f_1 mesurée (Hz)	

- Vérifier que les différents modes ont l'allure attendue (position des noeuds et des ventres) en déplaçant la détection et /ou l'excitation.
- Vérifier notamment que le signal observé se déphase de π à la traversée d'un noeud. Les noeuds correspondent-ils toujours à des minima nuls de l'amplitude du signal détecté ? Si non pourquoi ?
- Changer la longueur de la corde en déplaçant les cavaliers et observer l'influence de la longueur sur la valeur de la fréquence fondamentale

4.5 Annexes

4.5.1 Manipulations facultatives

Comparer cette expérience avec celle où l'on observe l'unique fréquence de résonance d'un oscillateur harmonique. Combien y a-t-il de fréquences de résonance (modes propres) ici ? Interpréter qualitativement ce qui se passe ici.

Dissipation

- Alimenter la bobine excitatrice par un signal sinusoïdal, se placer autour de la fréquence du mode fondamental.
- Pour une valeur de fréquence donnée, mesurer l'amplitude A du signal sinusoïdal sur la bobine détectrice.
- Tracer, sur papier millimétré ou sur ordinateur, la courbe de résonance du mode fondamental de la corde.
- En déduire le facteur de qualité du mode fondamental, défini comme :

$$Q = f_1 / \Delta f \quad (4.7)$$

avec :

$$\Delta f = f_{1max} - f_{1min}$$

f_{1max} et f_{1min} sont les deux fréquences telles que l'amplitude $A = A_{max}/\sqrt{2}$ où $A_{max} = A(f_1)$.

- Couper le GBF, pincer la corde en son milieu et mesurer le temps mis par le signal détecté pour disparaître. En déduire une autre mesure du facteur de qualité du mode fondamental.

- Comparer les deux mesures que vous venez de faire, et réfléchir sur le sens physique du facteur de qualité.
- Quels sont à votre avis les mécanismes possibles de dissipation dans cette expérience ?
- Enfin, vérifier que le nombre de modes que l'on peut détecter correspond à peu près à la valeur du facteur de qualité.

4.5.2 Exemple d'estimation de l'incertitude sur la tension

Vous avez placé une masse de 500 g. A la balance, on pèse : $m = 500.73$ g soit $m = 500 \pm 1$ g = 0.500 ± 0.001 kg

La tension dépend de la distance à laquelle on place la masse, puisque ce sont les couples (ou moments des forces) qui s'équilibrent (c'est la loi du bras de levier). Soit L_1 , la distance de la corde à l'axe de rotation et L_2 la distance du point d'accrochage de la masse à l'axe de rotation :

$$T = mg \frac{L_2}{L_1} \quad (\text{si le support de la masse est horizontal})$$

On en déduit :

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta g}{g} + \frac{\Delta L_1}{L_1} + \frac{\Delta L_2}{L_2}$$

On va négliger l'incertitude sur m (voir ci-dessus) et g (à condition de prendre $g = 9.81$ m/s²).

$L_1 = 19$ mm ΔL_1 est estimé à 0.5 mm

$L_2 = 57.5$ mm ΔL_2 est estimé à 0.5 mm

$$\text{d'où } \frac{\Delta T}{T} \approx \frac{\Delta L_1}{L_1} + \frac{\Delta L_2}{L_2}$$

$$\text{soit } \frac{\Delta T}{T} \approx 0.026 + 0.009 \approx 0.035$$

$$\text{d'où } T = 14.7 \pm 0.5 \text{ N}$$

4.5.3 Rappel sur les séries de Fourier

Les séries de Fourier jouent un rôle considérable en électronique, et d'une manière générale dans l'étude des systèmes dynamiques. Son intérêt provient de l'interprétation physique que l'on peut avoir du théorème de Fourier qui conduit à la notion fondamentale de spectre. Le spectre est la représentation graphique d'un signal non plus dans le domaine temporel mais dans le domaine fréquentiel. L'équivalence entre ces deux types de représentation est essentielle pour l'étude du traitement du signal. Obtenir l'ensemble des amplitudes et des fréquences d'une fonction quelconque $v(t)$ revient à effectuer son analyse spectrale.

Soit $v(t)$ une fonction réelle de la variable t , périodique de période T (pulsation $\omega = 2\pi/T$). D'après le théorème de Fourier, cette fonction peut se mettre sous la forme

d'une série de fonctions trigonométriques (sinus ou cosinus) appelée série de Fourier. Son développement est :

$$v(t) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)$$

où les coefficients a_0 , a_n , b_n sont calculés par les intégrales :

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt,$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T v(t) \cos(n\omega t) dt \quad , \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T v(t) \sin(n\omega t) dt.$$

Le terme a_0 représente la composante continue autrement dit la valeur moyenne de la fonction $v(t)$ sur une période. Les termes a_1 et b_1 représentent le premier harmonique dit fondamental. Les termes a_n et b_n représentent le n-ième harmonique. Ce développement en série de Fourier montre qu'un signal périodique quelconque $v(t)$ peut-être considéré comme résultant de l'addition d'une composante continue (valeur moyenne) et d'une infinité (cas général) de signaux sinusoïdaux de pulsation $n\omega$ où ω est la pulsation correspondant à la période de $v(t)$.

Il est intéressant de représenter la fonction $v(t)$ en portant le long d'un axe gradué en ω (ou f) les raies traduisant les modules des amplitudes du signal à chaque pulsation (ou fréquence) : c'est le spectre de raies en amplitude (voir figure ci-dessous). La représentation des carrés des amplitudes en fonction de la pulsation permet d'obtenir le spectre en puissance que l'on observe aisément sur un oscilloscope électronique réalisant une transformée de Fourier rapide (mode FFT).

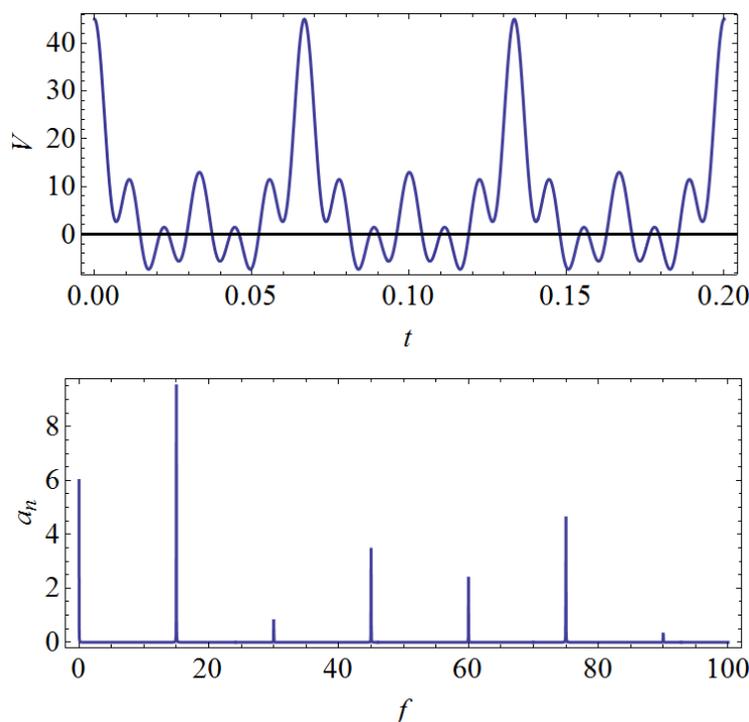


FIGURE 4.2 – Fonction périodique dans le temps et son spectre de Fourier en amplitude associé.

4.6 Quelques notions sur la gamme tempérée

L'un des La correspond à une vibration de fréquence 440 Hz. Le La de l'octave du dessus correspond à une fréquence double soit 880 Hz. Changer d'octave revient ainsi à multiplier toutes les fréquences par 2.

Une octave est construite à partir de 12 demi-tons. Quand on change d'un demi-ton la fréquence est multiplié par $\sqrt[12]{2}$. Quand on change de 12 demi-tons, la fréquence est ainsi multipliée par 2.

Pourquoi 12 demi-tons dans une octave ? En fait on aimerait bien pouvoir disposer non seulement de la fréquence double mais aussi de la fréquence triple. Soit une fréquence f donnée, on aimerait bien disposer de deux entiers n et m et d'un coefficient α tels que : $\alpha^n \times f = 2f$ et $\alpha^m \times f = 3f$. Ce rapport correspond au rapport entre les fréquences associées à deux notes consécutives, n (respectivement m) correspond au nombre de notes qui séparent une fréquence de sa fréquence double (respectivement triple). En prenant le logarithme des deux expressions ci-dessus, on arrive à : $\frac{m}{n} = \frac{\log 3}{\log 2}$. Ce qui est manifestement impossible puisque la première fraction est rationnelle alors que la deuxième est irrationnelle. Il s'agit alors de trouver un rationnel proche. Le choix de la gamme tempérée est $\frac{\log 3}{\log 2} \approx 1.58 \approx \frac{19}{12}$, i.e. $n = 12$ et $m = 19$. En prenant $\alpha = 2^{1/12} \approx 3^{1/19} \approx 1.06$, on a bien la fréquence double

après 12 demi-tons et presque la fréquence triple après 19 demi-tons.

Ce qui donne environ :

Note	do	ré	mi	fa	sol	la	si	do
Fréquence	f_1	$9f_1/8$	$5f_1/4$	$4f_1/3$	$3f_1/2$	$5f_1/3$	$15f_1/8$	$2f_1$
en Hz	264	297	330	352	392	440	495	528

