



TP 7 | Physique des ondes

Célérité des ultrasons



Noms (binôme ou trinôme)

Paillasse élèves

Ondes

- ☐ émetteur ultrasonore 40 kHz (modes continu et salves)
- ☐ 2 récepteurs ultrasonores
- ☐ feuille blanche, réglet 30 cm

Électronique et informatique

- ☐ oscilloscope numérique bicourbe + câbles coaxiaux
- ☐ carte Arduino Uno + câble USB
- ☐ module HC-SR04 câblé (Trig → broche 9, Echo → broche 10)
- ☐ plaque réflectrice rigide, mètre ruban ou banc gradué
- ☐ ordinateur avec Python (numpy, matplotlib, pyserial)
- ☐ thermomètre électronique

Paillasse professeur

Paillasse professeur

idem élèves (poste de démonstration)

2 modules HC-SR04 et 1 carte Arduino de rechange

scripts Python et croquis Arduino (cahier-de-prépa / clé USB)

tableau de mise en commun des résultats de la classe

Objectifs de la séance

- 💡 Mesurer une longueur d'onde par repérage de coïncidences de phase.
- 💡 Mesurer un temps de vol avec un microcontrôleur.
- 💡 Distinguer et évaluer une incertitude-type de type A et de type B.
- 💡 Exploiter une régression linéaire avec incertitudes (résidus, Monte-Carlo).
- 💡 Propager des incertitudes : formule du produit, simulation Monte-Carlo.
- 💡 Comparer deux résultats à l'aide de l'écart normalisé.



I Un désaccord vieux de 130 ans

En 1687, Newton calcule la célérité du son en supposant que l'air se comprime et se détend à *température constante*. Il obtient

$$c_N = \sqrt{\frac{RT}{M_{\text{air}}}}.$$

Les mesures de l'époque donnent une valeur nettement plus grande, et Newton ne parvient pas à expliquer l'écart. Il faut attendre Laplace (1816) : les compressions sont trop rapides pour que l'air échange de la chaleur, elles sont *adiabatiques*, ce qui donne

$$c_L = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M_{\text{air}}}}.$$

Aujourd'hui, c'est vous qui tranchez. Mais une mesure ne départage deux modèles que si l'on sait ce qu'elle vaut : c'est tout le rôle des incertitudes.

Données :

- $\gamma = 7/5$ pour l'air, assimilé à un gaz parfait diatomique ;
- $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$;
- $M(\text{N}) = 14,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, $M(\text{O}) = 16,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, $M(\text{Ar}) = 39,9 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$;
- composition de l'air sec (en quantité de matière) : 78 % de N_2 , 21 % de O_2 , 1 % d'argon.

Questions

1 Avant toute mesure, calculer M_{air} , puis c_N et c_L à la température de la pièce $\simeq 20^\circ\text{C}$.

2 Les deux modèles diffèrent d'environ $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Estimer l'incertitude-type maximale que doit avoir votre mesure pour pouvoir écarter l'un des deux modèles.

II Méthode 1 : coïncidences de phase

La célérité d'une onde progressive sinusoïdale est reliée à sa fréquence et à sa longueur d'onde par $c = \lambda \nu$. On mesure séparément ν et λ .



II.A Mesure de la fréquence

Manipulation

1. Alimenter l'émetteur E en mode continu.
2. Placer un récepteur R_1 face à l'émetteur, à environ 20 cm, et le relier à la voie 1 de l'oscilloscope.
3. Relever la fréquence donnée par la mesure automatique de l'oscilloscope.
4. À l'aide des curseurs, mesurer la durée de n périodes, avec n aussi grand que possible, et en déduire ν .

$\nu_{\text{auto}} \approx 40,0 \text{ kHz}$; avec $n = 10$ périodes, $10 T \approx 250 \mu\text{s}$.

Questions

- 3 Pour chacune des deux méthodes, estimer une demi-largeur Δ et en déduire $u(\nu)$. Quelle valeur retenez-vous?

- 4 Pourquoi mesurer la durée de plusieurs périodes plutôt que d'une seule?

II.B Mesure de la longueur d'onde

Manipulation

1. Placer un second récepteur R_2 à la même distance de l'émetteur que R_1 , et le relier à la voie 2.
2. Glisser une feuille blanche sous les récepteurs.
3. Passer l'oscilloscope en mode XY (document 1) et déplacer R_2 jusqu'à ce que les deux signaux soient en phase. Marquer sa position : c'est la référence $i = 0$.



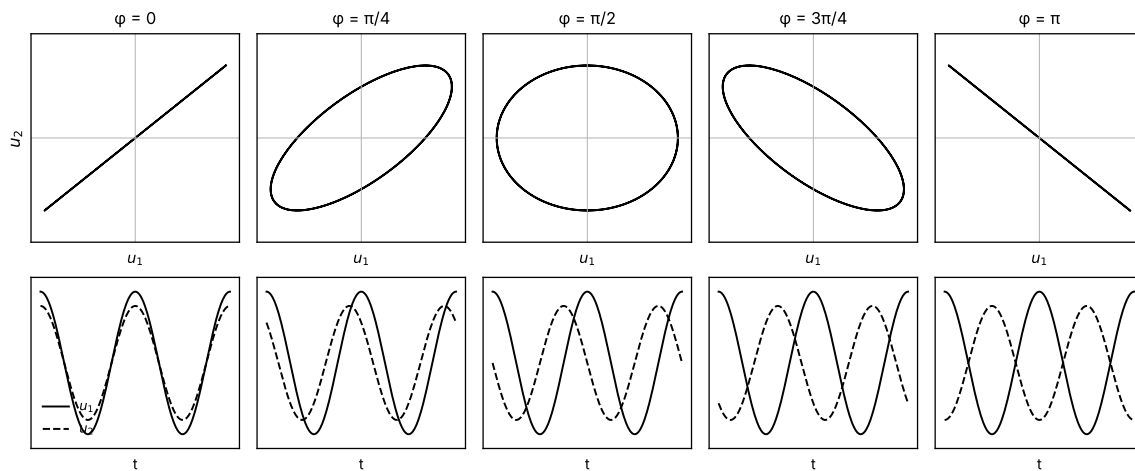
4. Éloigner lentement R_2 de l'émetteur jusqu'à la coïncidence de phase suivante. Marquer la position $i = 1$.
5. Recommencer jusqu'à $i = 10$ (*attention : ne sauter aucune coïncidence*).
6. Mesurer au réglet la distance d_i entre chaque marque et la référence, et estimer $u(d_i)$.

$d_{10} \approx 86 \text{ mm}$; $u(d_i)$ de l'ordre de 0,5 mm (lecture des deux extrémités, largeur du trait).

Document

Document 1 : repérer une coïncidence de phase en mode XY

En mode XY, l'oscilloscope trace la tension $u_2(t)$ de la voie 2 en fonction de la tension $u_1(t)$ de la voie 1. Pour $u_1 = U_1 \cos(\omega t)$ et $u_2 = U_2 \cos(\omega t + \varphi)$, la courbe obtenue (courbe de Lissajous) dépend du déphasage φ :



Les deux signaux sont en phase lorsque l'ellipse s'aplatit en un segment de pente positive. Ce repérage est bien plus précis que la superposition de deux sinusoides en mode temporel.

Questions



- 5 Pourquoi repérer une dizaine de coïncidences plutôt que de mesurer directement la distance entre deux coïncidences successives? [Maîtrise]

- 6 Saisir i , d_i et $u(d_i)$ dans le script `regression_mc.py` (PARTIE = "lambda"). Le modèle $d_i = \lambda i + d_0$ est-il validé? Justifier à l'aide des résidus normalisés. En déduire λ et $u(\lambda)$.

- 7 Quelle valeur attend-on pour l'ordonnée à l'origine d_0 ? La valeur obtenue est-elle compatible?

II.C Célérité c_1

Questions

- 8 Calculer $c_1 = \lambda \nu$. Pour un produit, les incertitudes relatives se composent :

$$\frac{u(c_1)}{c_1} = \sqrt{\left(\frac{u(\lambda)}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{u(\nu)}{\nu}\right)^2}.$$





En déduire $u(c_1)$. Quelle est la source d'incertitude dominante ?

9 Vérifier ce résultat avec la partie 3 du script `monte_carlo_cair.py`.

III Méthode 2 : temps de vol avec un module Arduino

Document

Document 2 : le module HC-SR04

Le module HC-SR04 contient un émetteur et un récepteur ultrasonores qui fonctionnent eux aussi à 40 kHz.

- L'Arduino envoie une impulsion de $10\text{ }\mu\text{s}$ sur la broche *Trig*.
- Le module émet alors une salve de 8 périodes ultrasonores.
- La broche *Echo* passe à l'état haut à l'émission de la salve et revient à l'état bas à la réception de l'écho.

La durée t de l'état haut est donc la durée de l'aller-retour de l'onde entre le capteur et l'obstacle. L'instruction `pulseIn()` la mesure en microsecondes; le programme `acquisition_hcsr04.ino` l'envoie à l'ordinateur par la liaison série, une valeur par ligne.

III.A Mesures répétées : incertitude de type A

Manipulation

1. Téléverser `acquisition_hcsr04.ino` dans la carte, puis vérifier dans le moniteur série que des valeurs s'affichent. Fermer ensuite le moniteur série.
2. Placer la plaque réflectrice à environ 30 cm du capteur, perpendiculairement à l'axe du capteur.
3. Renseigner le port série dans `mesures_repetees.py` et lancer l'acquisition de $N = 100$ mesures.

À $d \approx 30\text{ cm}$: $t \approx 1,75\text{ ms}$; s de quelques μs .



Questions

10 Décrire l'histogramme obtenu. Proposer deux causes aux fluctuations observées. Relever $\bar{t}$, s et $u(\bar{t})$.

11 En déduire une première valeur de la célérité $c = 2d/\bar{t}$. Où se trouve l'origine des distances sur le capteur? Estimer $u(d)$ et conclure sur la source d'incertitude dominante.

III.B S'affranchir de l'origine

Questions

12 Proposer un protocole permettant de déterminer c sans connaître la position exacte de l'origine des distances, ni un éventuel retard électronique du module.

Manipulation





Après validation par le professeur, mettre en œuvre le protocole avec 6 à 9 distances comprises entre 10 cm et 50 cm ($N = 20$ mesures par distance). Exploiter les mesures avec `regression_mc.py` (PARTIE = "vol").

Pente $a \approx 58,3 \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$; ordonnée à l'origine b de quelques dizaines de microsecondes.

Questions

13 Exprimer la pente a en fonction de c . En déduire c_2 et $u(c_2)$.

14 Interpréter l'ordonnée à l'origine b et la convertir en une distance. Était-il raisonnable de la négliger dans la sous-partie précédente?

IV Confrontation des résultats

IV.A Les deux méthodes sont-elles compatibles?

Questions



15 Calculer l'écart normalisé entre c_1 et c_2 . Commenter.

IV.B Newton ou Laplace ?

On ne dispose pas de formule de composition pour une racine carrée. La simulation Monte-Carlo permet de propager les incertitudes à travers n'importe quelle relation.

Document

Document : principe de la méthode de Monte-Carlo

On cherche l'incertitude sur une grandeur $y = f(x_1, x_2, \dots)$ calculée à partir de grandeurs mesurées.

1. Pour chaque grandeur x_k , on tire au hasard une valeur possible, compatible avec son incertitude (par exemple uniformément dans $[x_k - \Delta_k; x_k + \Delta_k]$ pour une incertitude de type B).
2. On calcule la valeur de y correspondante.
3. On répète un grand nombre de fois (100 000 tirages par exemple).
4. La moyenne des valeurs de y donne la valeur retenue, leur écart-type donne $u(y)$.

La partie 1 du script `monte_carlo_cair.py` applique cette méthode à un exemple simple : la diagonale $D = \sqrt{\ell^2 + h^2}$ d'un rectangle avec $\ell = (3,0 \pm 0,1)$ cm et $h = (2,2 \pm 0,2)$ cm.

Manipulation

Mesurer la température de la salle. Compléter puis exécuter la partie 2 du script `monte_carlo_cair.py`.

$T \approx 21^\circ\text{C}$, ΔT donné par la notice du thermomètre (typiquement $0,5^\circ\text{C}$).

Questions



- 16 Parmi les grandeurs qui interviennent dans c_L , lesquelles sont entachées d'une incertitude? Lesquelles sont exactes, et pourquoi?

- 17 Calculer les écarts normalisés de c_1 et c_2 avec c_N et c_L . Quel modèle retenez-vous? Votre mesure était-elle assez précise au sens de la question 2?

IV.C Mise en commun

Questions

- 18 Reporter c_1 et c_2 dans le tableau de la classe. Comparer la dispersion des résultats de la classe à vos propres incertitudes. Interpréter.
