PARIS DIDEROT université PARIS 7

ONDES ET VIBRATIONS

TRAVAUX PRATIQUES 2019

NB : les éventuelles erreurs seront publiées sur Moodle, dans une rubrique dédiée ; pensez à la consulter régulièrement. **Il ne vous sera donné qu'un et un seul fascicule par personne, vous devez le conserver tout au long du semestre, et y consigner de façon concise et soignée vos notes et commentaires personnels relatifs aux séances de travaux pratiques.**

Ce fascicule appartient à

NOM :

PRÉNOM :

GROUPE :

Numéro d'id. :

université
PARIS
DIDEROT
PARIS 7

ONDES ET VIBRATIONS

TRAVAUX PRATIQUES N° 1 : OSCILLATEUR MÉCANIQUE

• Documents de référence
Outre cet énoncé, les documents suivants doivent tous être lus et assimilés avant la séance :

- Cours, chapitre I, paragraphes 2 et 3
- Documents d'accompagnement en techniques expérimentales : "Mémo sur les incertitudes et chiffres significatifs" et "Utiliser Matlab–Octave".

• Documents à remettre
Vous devrez avoir préparé la séance en ayant lu attentivement l'énoncé, puis répondu aux **questions de préparation** en utilisant la feuille prévue à cet effet : découpez-la soigneusement et remettez-la à votre enseignant. Sans préparation, vous ne pourrez pas accéder à la salle.

À la fin de la séance, à des fins d'analyse statistique et pédagogique, vous devrez **saisir certains de vos résultats expérimentaux** en complétant un questionnaire en ligne dont l'adresse vous sera donnée sur Moodle et en séance.

• Documents à conserver
Au cours de la séance, utilisez les pages du « cahier de TP » pour noter les résultats, méthodes et points importants. Vous conserverez ainsi une trace de votre travail expérimental, et pourrez mieux vous préparer à l'épreuve d'évaluation pratique.

• Interrogation de TP

Les séances de TP servent de préparation à l'évaluation pratique individuelle qui aura lieu la semaine du 15 avril 2019. Mettez-les à profit avec discernement !

À découper soigneusement et remettre à votre enseignant de TP avant le début de la séance.

FEUILLE DE PRÉPARATION INDIVIDUELLE - TP n° 1 **Nom et prénom :** **n° d'identification :** **Date :**
Question 1
Question 4 $A_i =$
Question 6 $f_r =$
Question 7 (i) cas $Q = 10$; $f = 0{,}5\,\text{Hz}$: (ii) cas $Q = 10$; $f = 5\,\text{Hz}$: (iii) cas $Q = 1000$; $f = 5\,\text{Hz}$:

Une masse aimantée $M = 83 \pm 1$ g est attachée à un ressort de raideur K dont l'autre extrémité est accrochée à un support (Fig.1). La masse est soumise à une force $\vec{F}_f$ de frottements par

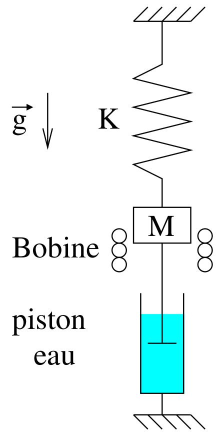


FIGURE 1 – *Vue en coupe d'un oscillateur mécanique constitué d'un ressort de raideur K et d'une masse aimantée M. Un piston plongé dans l'eau est accroché à la masse qui se déplace à l'intérieur d'une bobine.*

l'intermédiaire d'un piston plongé dans de l'eau : $\vec{F}_f = -\alpha_\mathrm{f}\,\vec{v}$ avec $\vec{v}$ la vitesse de la masse. Enfin, la masse aimantée se déplace à l'intérieur d'une bobine, ce qui y induit un courant. On mesure à l'oscilloscope la différence de potentiel $u_B(t)$ aux bornes de cette bobine. Dans les conditions de l'expérience, on admettra que $u_B(t)$ est proportionnelle à la vitesse de la masse ; on a donc $u_B(t) = \beta\, v(t)$ où β est une constante.

1. — Régime libre (DMR[1] : 1h45)

En régime libre, l'analyse théorique fondée sur le principe fondamental de la dynamique prédit que la vitesse de la masse au temps t est

$$v(t) = v_0 \exp\left(-\frac{\omega_0\, t}{2\,Q}\right) \cos\left(\omega_0\, t\,\sqrt{1-\left(\frac{1}{2\,Q}\right)^2} + \phi\right) \tag{1}$$

où v_0 et ϕ désignent l'amplitude de la vitesse et la phase à l'origine des temps ; ω_0 et Q sont respectivement la pulsation propre et le facteur de qualité du système :

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \sqrt{\frac{K}{M}} \qquad\qquad Q = \frac{\omega_0\, M}{\alpha_\mathrm{f}}$$

Question 1

En vous fondant sur l'équation 1, exprimez la pseudo-pulsation des oscillations de la vitesse en régime libre. Si le facteur de qualité est plus grand que ~ 5, montrez que l'on peut considérer que la pseudo-pulsation est presque égale à la pulsation propre ω_0. Pour $Q = 5$, quelle est la précision relative de cette approximation ?

1. DMR = durée maximale recommandée (à ne pas confondre avec MDR.)

Question 2

Pour étudier les oscillations libres, écartez verticalement, avec douceur, la masse de sa position d'équilibre puis lâchez-la sans vitesse initiale. Visualisez à l'oscilloscope la tension $u_B(t)$ aux bornes de la bobine en réglant correctement :

- la base de temps pour voir une vingtaine d'oscillations,
- le calibre de la tension pour utiliser au mieux l'écran.

Mesurez la pseudo-période T des oscillations en justifiant l'incertitude ΔT associée. Déduisez-en la valeur de la raideur du ressort K et l'incertitude associée.

Question 3

Une expérience indépendante fournit $K = 58{,}3 \pm 3{,}5\,\mathrm{N.m^{-1}}$. Cette mesure est-elle en accord avec celle de la question précédente ?

Question 4

On appelle A_i l'amplitude du i-ème maximum de $u_B(t)$ et t_i l'instant auquel ce maximum est observé. En vous fondant sur l'équation 1 et à l'aide d'une approximation, proposez une expression liant A_i à t_i. Quelle est l'approximation nécessaire ?

Question 5

Mesurez l'amplitude A_i de quatre extrema locaux ainsi que les instants t_i associés. Pour chaque valeur A_i et t_i, évaluez les incertitudes. Tracez A_i en fonction de t_i. Les mesures sont-elles en accord avec la relation proposée à la question précédente ? Estimez le facteur de qualité Q (on notera Q_1 cette première estimation), et l'incertitude associée. Pour ce faire, vous utiliserez `linfitxy` avec un changement de variable judicieux.

2. — Régime sinusoïdal forcé (DMR : 1h15)

Pour étudier le régime forcé, on fait vibrer sinusoïdalement le support auquel est accroché le ressort, avec une fréquence f et une amplitude a_0. L'analyse théorique prévoit alors que la vitesse de la masse à l'instant t s'écrit :

$$v(t) = V(f)\cos\big(2\pi f\, t + \varphi(f)\big) \qquad \text{avec} \qquad V(f) = \frac{2\pi\, a_0\, f}{\sqrt{\left(1-\left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{f}{Q f_0}\right)^2}}$$

Comme la tension $u_B(t)$ aux bornes de la bobine est supposée proportionnelle à la vitesse $v(t)$, son amplitude s'écrit :

$$U(f) = \beta V(f) = 2\pi\beta a_0 f_0 \frac{\frac{f}{f_0}}{\sqrt{\left(1-\left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{f}{Q f_0}\right)^2}} \tag{2}$$

avec β la constante de proportionnalité susmentionnée. On a avantage à poser $x = f/f_0$ (x est donc une variable sans dimension), et $U_0 = 2\pi\beta a_0 f_0$ (constante ayant les dimensions d'une tension), ce qui donne :

$$U(f) = U_0 \frac{Q}{\sqrt{1+Q^2\left(x-\dfrac{1}{x}\right)^2}} \tag{3}$$

Question 6

D'après l'équation 3, pour quelle fréquence (qu'on notera f_r) l'amplitude U de la tension aux bornes de la bobine sera-t-elle maximale ?

En utilisant les mesures de T et Q faites en régime libre, calculez la valeur attendue $f_{r,1}$.

Question 7

On alimente le pot vibrant, initialement éteint, avec un signal sinusoïdal de fréquence $f = 0{,}5\,\mathrm{Hz}$. Supposons que le facteur de qualité Q vaille 10. Combien de temps devrez vous attendre avant de pouvoir raisonnablement considérer que le régime permanent est établi ? Même question si $f = 5\,\mathrm{Hz}$. Même question si $Q = 1000$ et $f = 5\,\mathrm{Hz}$.

Question 8

Alimentez alors le pot vibrant avec un signal sinusoïdal de fréquence $f \simeq f_{r,1}$. Une fois que le régime permanent est établi, mesurez l'amplitude U ainsi que le déphasage ϕ entre le signal fourni par le GBF et la tension aux bornes de la bobine. Estimez les incertitude ΔU et $\Delta\phi$ pour cette fréquence uniquement.
Répétez la mesure pour plusieurs fréquences f. *Attention, soyez patients! Vous devez, à chaque changement de fréquence, attendre que le régime permanent soit établi.* Vous pourrez raisonnablement effectuer la mesure pour 8 à 10 fréquences : choisissez-les judicieusement. L'évaluation systématique des incertitudes n'est pas demandée.

Question 9

Tracez la courbe U en fonction de f. Utilisez l'outil `cftool` de `Matlab`® pour examiner si l'équation 3 rend correctement compte des résultats expérimentaux. Vous obtenez ainsi une seconde estimation de la fréquence de résonance, notée $f_{r,2}$, et du facteur de qualité, notée Q_2. Comparez $f_{r,2}$ à $f_{r,1}$, ainsi que Q_2 à Q_1 (valeur estimée en régime libre).

Cahier de TP — Première séance

Question 2
Procédure suivie pour l'évaluation des incertitudes :

$T =$ $\pm$ $\Rightarrow$ $K =$ $\pm$

Question 3
Comparaison des deux mesures de K :

Question 5

i	1	2	3	4
A_i ( )				
t_i ( )				

Procédure suivie pour l'évaluation des incertitudes :

Résultat de l'ajustement : $Q_1 =$ $\pm$

$f_{r,1} =$ $\pm$

Question 8
Procédure suivie pour l'évaluation des incertitudes sur U et ϕ :

$U =$ $\pm$; $\phi =$ $\pm$

Intervalle de fréquences étudié et nombre de points de mesure :

f ( )								
U ( )								
Φ ( )								

Question 9
Résultat de l'ajustement : $f_{r,2} =$ $\pm$ et $Q_2 =$ $\pm$

Comparaison de $f_{r,1}$ et de $f_{r,2}$:

Comparaison de Q_1 et de Q_2 :

N'oubliez pas la saisie en ligne de vos résultats.

Notes personnelles sur le TP1

ONDES ET VIBRATIONS

TRAVAUX PRATIQUES N^{O} 2 : RLC SÉRIE

• Documents de référence
Outre cet énoncé, les documents suivants doivent tous être lus et assimilés avant la séance :

- Cours, chapitre I, paragraphes 2 et 3
- TD n°1, exercices 2.4 et 2.5
- Documents d'accompagnement en techniques expérimentales : "Mémo sur les incertitudes et chiffres significatifs" et "Utiliser Matlab–Octave".

• Documents à remettre
Vous devrez avoir préparé la séance en ayant lu attentivement l'énoncé, puis répondu aux **questions de préparation** en utilisant la feuille prévue à cet effet : découpez-la soigneusement et remettez-la à votre enseignant. Sans préparation, vous ne pourrez pas accéder à la salle.

À la fin de la séance, à des fins d'analyse statistique et pédagogique, vous devrez **saisir certains de vos résultats expérimentaux** en complétant un questionnaire en ligne dont l'adresse vous sera donnée sur Moodle et en séance.

• Documents à conserver
Au cours de la séance, utilisez les pages du « cahier de TP » pour noter les résultats, méthodes et points importants. Vous conserverez ainsi une trace de votre travail expérimental, et pourrez mieux vous préparer à l'épreuve d'évaluation pratique.

• Interrogation de TP

Les séances de TP servent de préparation à l'évaluation pratique individuelle qui aura lieu la semaine du 15 avril 2019. Mettez-les à profit avec discernement !

À découper soigneusement et remettre à votre enseignant de TP avant le début de la séance.

FEUILLE DE PRÉPARATION INDIVIDUELLE - TP n° 2

Nom et prénom :

n° d'identification :

Date :

Question 1

R =

Question 2

$u_C\left(\frac{T_{\text{Gene}}}{2}^-\right) =$; B =

$u_C\left(T_{\text{Gene}}^-\right) =$; B =

Question 3

$L = 1\,\text{mH}$: $T_{\text{Gene}} =$

$L = 10\,\text{mH}$: $T_{\text{Gene}} =$

Question 6

$f_r =$

Question 7

f	0	f_0	∞
$\phi(f)$			

Le circuit étudié est constitué d'un générateur et de trois composants passifs montés en série : un résistor de résistance r, une bobine d'inductance L et un condensateur de capacité C. Un générateur basse fréquence (GBF) fournit une tension $e(t)$ dont l'amplitude et la forme sont réglables par l'utilisateur (Fig. 2) : $e(t)$ constitue le *signal d'entrée* du système étudié. Le GBF sera assimilé à un générateur de Thévenin de résistance interne $r_G = 50\ \Omega$.

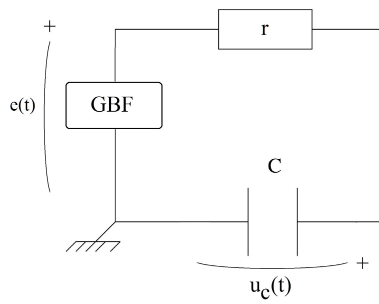


FIGURE 2 – *Circuit RLC série.*

Dans tout le TP, on étudie les variations de la tension $u_C(t)$ aux bornes du condensateur : $u_C(t)$ est le *signal de sortie* du système étudié. Sous certaines conditions (voir cours), le circuit se comporte comme un oscillateur de fréquence propre f_0 et de facteur de qualité Q tels que

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \qquad\qquad Q = 2\pi\frac{L}{R}f_0 \tag{4}$$

Question 1

Les équations 4 font référence à une grandeur notée R. Exprimez R en fonction des paramètres constitutifs du circuit.

1. — Régime transitoire de la réponse à un échelon (DMR : 1h30)

Dans un premier temps, on étudie le régime transitoire du signal de sortie $u_C(t)$ lorsque le signal d'entrée $e(t)$ est un échelon de tension, montant ou descendant. Pour cela, le GBF est réglé pour délivrer un signal carré périodique de période T_{Gene}, c'est-à-dire une succession d'échelons alternativement montants et descendants, dont la valeur oscille entre +E et -E. Le signe de $e(t)$ change donc à chaque demi-période $T_{\text{Gene}}/2$ (figure 3).

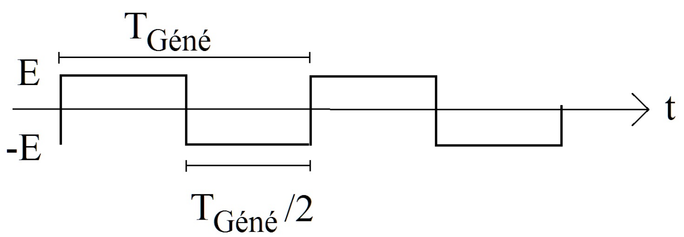


FIGURE 3 – *Signal d'entrée $e(t)$.*

À chaque changement de signe de $e(t)$, l'état d'équilibre de l'oscillateur est modifié et la tension $u_C(t)$ présente des oscillations amorties, de pseudo-période T, autour du nouvel état d'équilibre. Le modèle théorique, fondé sur les lois de Kirchhoff appliquées à des composants idéaux, prévoit l'expression suivante pour la tension u_C en régime transitoire :

$$u_C(t) = A \exp\left(-\frac{\pi f_0 t}{Q}\right) \cos\left(2\pi t f_0 \sqrt{1-\left(\frac{1}{2Q}\right)^2} + \phi\right) + B, \tag{5}$$

avec A, B et ϕ des valeurs réelles, constantes tant que la tension fournie par le GBF demeure constante (elles sont donc susceptibles de changer de valeur à chaque nouvelle demi-période du signal d'entrée, voir figure 3).

Pour observer les oscillations du régime transitoire et leur atténuation progressive, il est donc indispensable de choisir T_{Gene} de telle sorte que $T_{\text{Gene}}/2$ soit suffisamment grand devant la pseudo-période T et aussi devant le temps caractéristique d'atténuation du régime transitoire.

Question 2

En supposant qu'entre $t = 0$ et $t = T_{\text{Gene}}/2$ la tension fournie par le GBF est $e(t) = +E$, et que $T_{\text{Gene}}/2$ est très grande devant le temps caractéristique d'atténuation du régime transitoire, vers quelle valeur tend $u_C(t)$ juste avant le prochain basculement du signal d'entrée ? Que vaut B ? Que vaudra B juste après le basculement ?

Question 3

Pour une capacité de 1 nF une inductance de 1 mH et une résistance $r = 100\,\Omega$ quelle période T_{Gene} vous paraît-il raisonnable de choisir, si l'on veut observer les oscillations amorties du régime transitoire ? Même question avec une inductance de 10 mH.

Réalisez le circuit de la Fig.2 en utilisant $r = 100\,\Omega$, $C = 1\,\text{nF}$ et une bobine d'inductance inconnue. Visualisez le signal carré envoyé par le GBF sur la voie 1 de l'oscilloscope et déclenchez ce dernier sur ce signal. Sur la voie 2, visualisez la tension $u_C(t)$ aux bornes du condensateur.

Question 4

Mesurez la pseudo-période T du signal en justifiant l'incertitude ΔT associée. Déduisez-en une première mesure (qu'on notera f_{01}) de la fréquence propre, ainsi que de la valeur de l'inductance L. Indiquez les incertitudes associées.

Question 5

Mesurez l'amplitude A_i de cinq extrema locaux ainsi que les instants t_i associés. Pour chaque valeur A_i et t_i, évaluez les incertitudes. Tracez A_i en fonction de t_i. Utilisez vos mesures pour estimer le facteur de qualité Q (on notera Q_1 cette première estimation) et l'incertitude associée, ΔQ_1. Pour ce faire, utilisez `linfitxy` avec un changement de variable judicieux (attention, la situation n'est pas exactement la même qu'au TP1...). À partir de Q_1, déduire une mesure R_1 de la résistance R du circuit. Cette valeur est-elle en accord avec la valeur annoncée à la question 1 ? Commentez.

2. — Régime sinusoïdal permanent (DMR : 1h30)

À présent, le signal d'entrée est sinusoïdal de fréquence f et d'amplitude $e_0(f)$ telle que $e(t) = e_0(f)\cos(2\pi f\, t)$. Il est établi depuis un temps suffisamment long pour que le régime transitoire ait disparu. Dans ce cas, le modèle théorique (voir cours) prévoit que la tension aux bornes de la capacité s'écrit $u_c(t) = U(f)\cos\big(2\pi f\, t + \phi(f)\big)$, où l'amplitude U et la phase ϕ sont telles que :

$$U(f) = e_0(f)\frac{Q}{\sqrt{x^2 + Q^2\left(1-x^2\right)^2}}; \qquad \phi(f) = -\frac{\pi}{2} - \arctan\left(Q\left(x - \frac{1}{x}\right)\right) \tag{6}$$

Comme au TP précédent, on a introduit la variable adimensionnée $x = f/f_0$. On appellera *gain* du système le rapport des amplitudes des sinusoïdes d'entrée et de sortie : $G(f) = U(f)/e_0(f)$.

Question 6

D'après les résultats du modèle théorique (éq. 6), pour quelle fréquence (qu'on notera f_r) le gain G est-il maximal ?

Question 7

D'après les résultats du modèle théorique (éq. 6), quel est le déphasage ϕ pour $f = 0$, $f = f_0$ et $f \to \infty$? Esquissez le graphe de $\phi(f)$; indiquez sa pente en $f = 0$.

Question 8

En utilisant les mesures faites en régime libre, calculez une première estimation de la fréquence de résonance (notée $f_{r,1}$). Alimentez le circuit avec un signal sinusoïdal de fréquence $f_{r,1}$. Mesurez e_0 et U, ajustez la fréquence de façon à maximiser le gain G : vous obtenez ainsi une deuxième estimation de la fréquence de résonance, qu'on notera $f_{r,2}$. Estimez l'incertitude sur cette mesure. Les mesures $f_{r,1}$ et $f_{r,2}$ sont-elles en accord ?

Question 9

Mesurez le déphasage ϕ_r à la fréquence de résonance $f_{r,2}$, et évaluez l'incertitude associée.

Question 10

Mesurez le gain G et le déphasage ϕ pour plusieurs fréquences f. Compte tenu du temps disponible, vous pourrez raisonnablement effectuer les mesures pour 8 à 10 fréquences : choisissez-les judicieusement. Les incertitudes ne sont pas demandées. Tracez les courbes G et ϕ en fonction de f. Utilisez l'outil `cftool` de `Matlab`® pour réaliser un ajustement de vos résultats expérimentaux par le modèle théorique (équations 6) : chacun des deux ajustements (gain $G(f)$ et déphasage $\phi(f)$) donne une nouvelle estimation du facteur de qualité (notez-les respectivement Q_2 et Q_3) et de la fréquence propre (f_{02} et f_{03}). Comparez ces valeurs entre elles, ainsi qu'aux valeurs Q_1 et f_{01} estimées en régime libre.

Cahier de TP — Deuxième séance

Question 4

Procédure suivie pour l'évaluation des incertitudes :

$T =$ $\pm$ $\Rightarrow$ $f_{01} =$ $\pm$

$\Rightarrow L =$ $\pm$

Question 5

i	1	2	3	4	5
A_i ( )					
t_i ( )					

Procédure suivie pour l'évaluation des incertitudes :

Résultat de l'ajustement : $Q_1 =$ $\pm$

Résistance estimée : $R_1 =$ $\pm$

Comparaison avec la résistance R du circuit :

Questions 8 et 9

$f_{r,1} =$ $\pm$

$f_{r,2} =$ $\pm$

Procédure suivie pour l'évaluation des incertitudes :

Comparaison de $f_{r,1}$ et $f_{r,2}$:

$\phi_r =$ $\pm$

Question 10

f ( )									
U ( )									
G ( )									
Φ ( )									

Résultat de l'ajustement de $G(f)$: $f_{02} =$ $\pm$ et $Q_2 =$ $\pm$

Résultat de l'ajustement de $\phi(f)$: $f_{03} =$ $\pm$ et $Q_3 =$ $\pm$

Compatibilité des trois mesures de f_0 :

Compatibilité des trois mesures de Q :

N'oubliez pas la saisie en ligne de vos résultats.

Notes personnelles sur le TP2

ONDES ET VIBRATIONS

TRAVAUX PRATIQUES N° 3 : CORDE DE MELDE

• Documents de référence
Outre cet énoncé, les documents suivants doivent tous être lus et assimilés avant la séance :

- "Super manuel de Physique", paragraphe 6.3 page 117
- TD n°3 exercices **2.2** et **2.3**
- Documents d'accompagnement en techniques expérimentales : "Comment mesurer à l'aide d'un instrument gradué", "Mémo sur les incertitudes et chiffres significatifs" et "Utiliser Matlab–Octave".

• Documents à remettre
Vous devrez avoir préparé la séance en ayant lu attentivement l'énoncé, puis répondu aux **questions de préparation** en utilisant la feuille prévue à cet effet : découpez-la soigneusement et remettez-la à votre enseignant. Sans préparation, vous ne pourrez pas accéder à la salle.

À la fin de la séance, à des fins d'analyse statistique et pédagogique, vous devrez **saisir certains de vos résultats expérimentaux** en complétant un questionnaire en ligne dont l'adresse vous sera donnée sur Moodle et en séance.

• Documents à conserver
Au cours de la séance, utilisez les pages du « cahier de TP » pour noter les résultats, méthodes et points importants. Vous conserverez ainsi une trace de votre travail expérimental, et pourrez mieux vous préparer à l'épreuve d'évaluation pratique.

• Interrogation de TP

Les séances de TP servent de préparation à l'évaluation pratique individuelle qui aura lieu la semaine du 15 avril 2019. Mettez-les à profit avec discernement !

À découper soigneusement et remettre à votre enseignant de TP avant le début de la séance.

FEUILLE DE PRÉPARATION INDIVIDUELLE - TP n° 3

Nom et prénom :

n° d'identification :

Date :

Question 1

$c =$

nœuds :

ventres :

Question 5 Analyse dimensionnelle des expressions proposées :

Question 9

Graphe (abscisses x, ordonnées y) avec ici x= et y=

Un pot vibrant, alimenté sinusoïdalement par un générateur de basses fréquences ($f = 0$ à 300 Hz), fait vibrer transversalement l'extrémité d'une cordelette. Elle est tendue par une masse M accrochée à son autre extrémité (Fig.4).

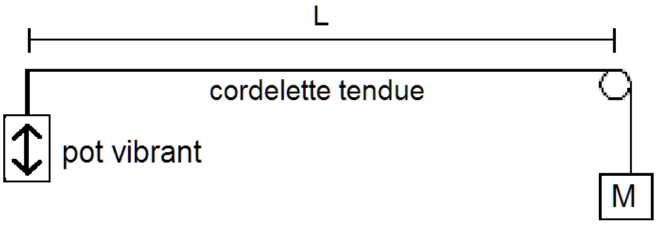


FIGURE 4 – *Expérience de Melde.*

Le modèle théorique prédit que les fréquences de résonance f_n des ondes transversales qui se propagent le long de cette cordelette s'écrivent

$$f_n = n f_1 \tag{7}$$
$$f_n = n \frac{c}{2L} \tag{8}$$

avec n le numéro du mode, f_1 la fréquence du mode fondamental, L la distance représentée sur la figure et c la vitesse de propagation des ondes mises en jeu.

Question 1

Que vaut la vitesse de propagation des ondes transversales sur une corde telle que L= 1,5 m et dont le mode fondamental est à 10 Hz ? On fait vibrer cette corde à la fréquence 20 Hz : combien de nœuds et de ventres y a-t-il et où sont ils ?

1. — Modes de résonance (DMR : 1 heure)

Question 2

Prenez une masse $M \simeq 40$ g et une longueur $L \simeq 1{,}50$ m. Faites varier la fréquence du pot vibrant et identifiez les 5 premiers modes de résonance en vérifiant à chaque fois le nombre de nœuds et en mesurant la fréquence de résonance f_n correspondante. Estimez les incertitudes Δf_n et ΔL en expliquant votre raisonnement.

Question 3

En utilisant `Matlab`® et la fonction `linfitxy` mise à votre disposition, déterminez le meilleur ajustement linéaire au sens des moindres carrés de f_n en fonction de l'indice n. En déduire une première mesure c_1 de la vitesse de propagation c, assortie de son incertitude Δc_1.

2. — Influence de la masse M (DMR : 1 heure)

Question 4

Réglez la corde de façon que L = 1 m, ajustez la fréquence pour visualiser le mode n=2. Mesurez f_2 pour plusieurs valeurs de la masse M (de 10 à 90 grammes par pas de 20 grammes). En utilisant l'Eq. 8, en déduire une mesure de c pour chaque valeur de M. Evaluez Δc et ΔM.

Question 5

Plusieurs expressions théoriques de la vitesse c sont proposées ci-dessous ; outre M et L, elles font intervenir la masse m de la corde et l'accélération de la pesanteur g. Faites une analyse dimensionnelle de chacune.

$$c = \frac{M}{m}\sqrt{gL} \qquad c = \frac{m}{M}\sqrt{gL} \qquad c = 2\pi e^{-M/m}\sqrt{gL}$$

$$c = \frac{1}{2\pi}\ln\left(\frac{M}{m}\right)\sqrt{gL} \qquad c = \sqrt{\frac{MgL}{m}} \qquad c = \sqrt{\frac{mgL}{M}}$$

Question 6

Lesquelles de ces expressions sont compatibles avec vos résultats expérimentaux ? Le cas échéant, utilisez un changement de variable et `linfitxy` pour réaliser un ajustement linéaire ; en déduire la masse m de la cordelette, ainsi qu'une estimée de sa masse linéique $\mu_1 = m/L$ et l'incertitude-type associée $\Delta\mu_1$.

Question 7

À l'aide d'une balance réalisez une mesure indépendante de μ (notée μ_2) assortie de son incertitude. Utilisez un test en Z pour juger de la compatibilité des valeurs mesurées par ces deux méthodes.

3. — Influence de la longueur L (DMR : 1 heure)

Question 8

Mesurez f_2, fréquence de résonance du mode 2, pour plusieurs longueurs L sans modifier la masse M, fixée à 40 grammes.

Question 9

D'après l'équation 8, quel graphe faut-il tracer pour vérifier par un ajustement linéaire l'évolution de f_2 avec L ?

Question 10

Utilisez alors `Matlab`® et la fonction `linfitxy` pour en déduire une deuxième mesure c_2 de la vitesse de propagation c ainsi que l'incertitude Δc_2 associée. Utilisez un test en Z pour évaluer la compatibilité avec la mesure c_1 effectuée à la question 3.

CAHIER DE TP —TROISIÈME SÉANCE

Question 2

n	1	2	3	4	5
f_n (Hz)					
Δf_n (Hz)					

Procédure suivie pour l'évaluation des incertitudes :

Question 3

Résultat de l'ajustement ($f_n = an + b$) :

$a =$ $\pm$ et $b =$ $\pm$

$\Rightarrow c_1 =$ $\pm$

Question 4

M (g)	10	30	50	70	90
ΔM (g)					
f_2 (hz)					
Δf_2 (hz)					
c (m/s)					
Δc (m/s)					

Procédure suivie pour l'évaluation des incertitudes :

Question 6

Modèle théorique retenu pour l'ajustement : $c =$

Masse linéique : $\mu_1 =$ $\pm$

Procédure suivie pour l'évaluation des incertitudes :

Question 7

Masse linéique : $\mu_2 =$ $\pm$

Procédure suivie pour l'évaluation des incertitudes :

Comparaison de μ_1 et μ_2 :

Question 8

L (m)					
ΔL (m)					
f_2 (Hz)					
Δf_2 (Hz)					

Procédure suivie pour l'évaluation des incertitudes :

Question 10

$c_2 =$ $\pm$

Comparaison de c_1 et c_2 :

N'oubliez pas la saisie en ligne de vos résultats.

Notes personnelles sur le TP3

université
PARIS DIDEROT
PARIS 7

ONDES ET VIBRATIONS

TRAVAUX PRATIQUES N^{O} 4 : CÂBLE CO-AXIAL

• Documents de référence —
Outre cet énoncé, les documents suivants doivent tous être lus et assimilés avant la séance :

- Cours, chapitres 4 (paragraphe 2) et 5 (paragraphes 1 et 3)
- Documents d'accompagnement en techniques expérimentales : "Mémo sur les incertitudes et chiffres significatifs".

• Documents à remettre
Vous devrez avoir préparé la séance en ayant lu attentivement l'énoncé, puis répondu aux **questions de préparation** en utilisant la feuille prévue à cet effet : découpez-la soigneusement et remettez-la à votre enseignant. Sans préparation, vous ne pourrez pas accéder à la salle.

À la fin de la séance, à des fins d'analyse statistique et pédagogique, vous devrez **saisir certains de vos résultats expérimentaux** en complétant un questionnaire en ligne dont l'adresse vous sera donnée sur Moodle et en séance.

• Documents à conserver
Au cours de la séance, utilisez les pages du « cahier de TP » pour noter les résultats, méthodes et points importants. Vous conserverez ainsi une trace de votre travail expérimental, et pourrez mieux vous préparer à l'épreuve d'évaluation pratique.

• Interrogation de TP

Les séances de TP servent de préparation à l'évaluation pratique individuelle qui aura lieu la semaine du 15 avril 2019. Mettez-les à profit avec discernement !

À découper soigneusement et remettre à votre enseignant de TP avant le début de la séance.

FEUILLE DE PRÉPARATION INDIVIDUELLE

Nom et prénom :

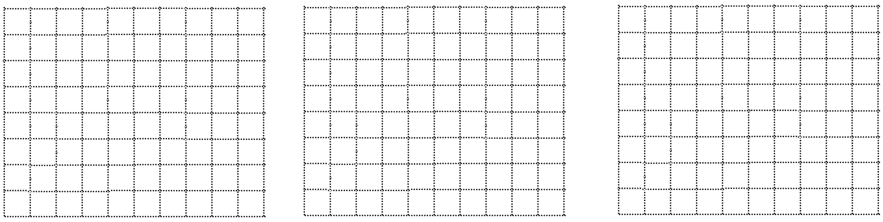
n° d'identification :

Date :

Question 1

c =

Question 2



(i) (ii) (iii)

Question 6

$\ell_a =$ Atténuation en dB/km : $\alpha_{\text{dB}} =$

Question 9

Relation entre A et B :

Nature du point $x = 0$, (tension, intensité) :

Question 10

$c_{\text{ph}} =$

$\Delta c_{\text{ph}} =$

Question 15

$\ell_a =$

$\Delta \ell_a =$

Dans l'ARQS (cf. l'enseignement d'électrocinétique), un câble coaxial est assimilé à deux fils conducteurs parfaits : si tel était le cas, les signaux électriques devraient se propager à une vitesse infinie le long des câbles. L'ARQS n'est qu'une approximation, qui n'est applicable que tant que la longueur des câbles est très petite devant la longueur d'onde (à gauche sur la fig. 5).

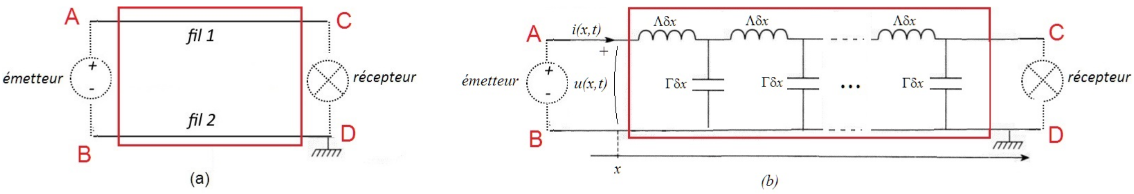


FIGURE 5 – *Deux modèles de câbles coaxiaux : (a) modèle ARQS et (b) modèle non résistif, d'inductance linéique* Λ *et de capacité linéique* Γ.

Un autre modèle (cf. chapitre 5), plus réaliste que l'ARQS, représente le câble coaxial (supposé non résistif) comme une chaîne de composants infinitésimaux distribués tout au long du câble (à droite sur la fig. 5). Il est alors caractérisé par son impédance Z_C

$$Z_C = \sqrt{\frac{\Lambda}{\Gamma}} \tag{9}$$

dont la valeur dépend des inductance Λ et capacité Γ linéiques. La vitesse de propagation des signaux électriques est alors

$$c = \frac{1}{\sqrt{\Lambda\Gamma}} \tag{10}$$

Dans les deux modèles, un câble coaxial est un **quadripôle** qui connecte les bornes A et B d'un dipôle (par exemple un générateur) aux bornes C et D d'un autre dipôle (par exemple un récepteur), comme indiqué sur la figure 5.

Pour cette séance de TP, vous disposez d'un générateur de résistance interne $r_G = 50\,\Omega$, d'un oscilloscope, et de câbles coaxiaux (de type RG58U, impédance caractéristique $Z_C = 50\,\Omega$) courts (quelques dizaines de centimètres) ou longs (L=100 m, et Δ L=1 cm d'après le constructeur). Un des câbles est piqué à 10, 5 et 2 m de l'extrémité. Sont également disponibles des *bouchons*, dispositifs récepteurs qu'on assimilera à des résistors idéaux. Grâce à l'oscilloscope, vous visualiserez le signal électrique en différents endroits du câble, et pourrez ainsi mesurer sa vitesse de propagation et son atténuation. Dans une première partie, vous emploierez des **impulsions brèves** ($\lesssim 10\,$ns), puis dans la deuxième partie des **signaux sinusoïdaux**.

1. — Étude en régime impulsionnel (DMR : 1 h 15)

Question 1

En supposant que l'inductance linéique des câbles utilisés en TP est $\Lambda = 0{,}2\,\mu$H.m^{-1}, calculez la vitesse de propagation c des signaux électriques sur ces câbles.

Question 2

Une impulsion rectangulaire d'amplitude 2 V et de durée 10 ns (fig. 6) est émise par le bipôle AB et voyage le long d'un très long câble RG58U, dont l'extrémité est raccordée à un bipôle récepteur CD d'impédance R. Un observateur visualise à l'oscilloscope la tension entre l'âme et le blindage du câble en un point situé 100 m avant le récepteur. Représentez le signal total vu par cet observateur en fonction du temps t dans les trois cas suivants (i) $R = 50\,\Omega$; (ii) $R = 1000\,\Omega$; (iii) $R = 0\,\Omega$. Prenez comme origine des temps ($t = 0$) l'instant où le front ascendant de l'impulsion incidente arrive au point d'observation.

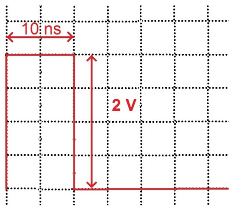


FIGURE 6 – *Impulsion rectangulaire.*

Question 3

Réglez le générateur (notamment sa fréquence de récurrence) de telle sorte qu'il émette des impulsions de forme rectangulaire aussi brèves que possible (typiquement 10 à 30 ns, la durée peut varier selon le modèle de générateur). Réalisez le montage de la figure 7 : sortie du généra-

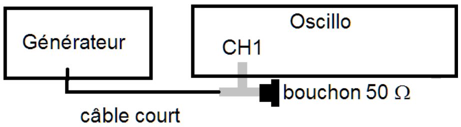


FIGURE 7 – *Montage A.*

teur reliée à la voie CH1 de l'oscilloscope en utilisant un câble court terminé par un T branché à un bouchon de 50 Ω. Vérifiez à l'oscilloscope les caractéristiques du signal (forme, amplitude, durée, fréquence de répétition).

Question 4

Remplacez le bouchon par une des extrémités du câble long, l'autre extrémité restant débranchée (fig. 8). Représentez et interprétez l'allure du signal observé sur la voie 1. Branchez le bouchon de 50 Ω à l'extrémité du câble long. Commentez. Quel est le rôle du bouchon ?

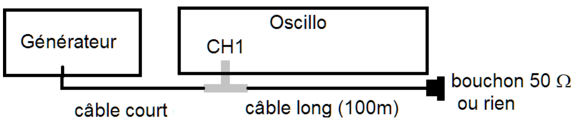


FIGURE 8 – *Montage B.*

Question 5

Utilisez un T branché au bouchon pour visualiser sur la voie 2 de l'oscillocope le signal en fin du câble long (fig. 9). Le signal en début de câble reste visualisé sur la voie 1. Déduisez des observations une première mesure c_1 de la vitesse de propagation c des signaux électriques. Évaluez l'incertitude-type Δc_1 en justifiant brièvement votre raisonnement. Mesurez également l'amplitude des signaux en $x = 0$ et $x = L$.

Question 6

Dans le cas d'une onde électrique progressive sur un câble coaxial, l'expérience montre que l'amplitude du signal décroît au cours de la propagation. On supposera qu'elle s'atténue exponentiellement avec la distance parcourue. Si les amplitudes mesurées en deux points distants

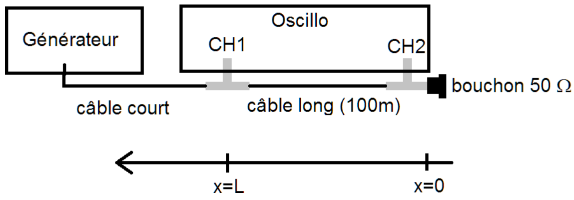


FIGURE 9 – *Montage C.*

de $|x_1 - x_2| = 50$ m valent respectivement A_1=1 V et $A_2 = 0{,}8$ V, quelle est la distance caractéristique d'atténuation ℓ_a ? Et l'atténuation α_{dB} en dB/km ?

Question 7

Utilisez les mesures expérimentales des tensions mesurées en $x = L$ et $x = 0$ à la question 5 pour évaluer ℓ_a et α_{dB}.

Question 8

Réalisez le montage de la fig. 10 et utilisez les quatre voies de l'oscilloscope pour observer le signal en $x = 10\,\text{m}$ (voie 1), 5 m (voie 2), 2 m (voie 3) et 0 m (voie 4). Utilisez un T sur la voie 4 pour pouvoir facilement modifier l'impédance terminale. Comparez les signaux observés pour

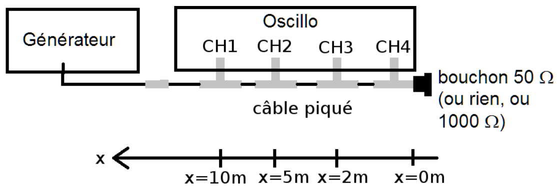


FIGURE 10 – *Montage avec un câble piqué.*

quatre impédances terminales : bouchon de 50 Ω, résistance de 1000 Ω, court-circuit, résistance R inconnue. Exploitez les signaux observés dans les cas 50 Ω et résistance R pour déterminer R (l'évaluation de l'incertitude n'est pas demandée).

2. — Expériences en régime sinusoïdal (DMR : 1h45)

Enlevez le câble piqué et reprenez le montage de la figure 9 sans bouchon : l'extrémité du câble long doit être en circuit ouvert (impédance du récepteur infinie). Réglez le générateur pour qu'il délivre un signal sinusoïdal de pulsation $\omega = 2\pi f$ et d'amplitude E = 10 V.

Dans un premier temps, pour simplifier l'analyse, on suppose que la propagation du signal sinusoïdal se fait à la vitesse c_{ph} sans aucune atténuation. On pose $q_r = \omega / c_{\text{ph}}$. On appelle x l'abscisse d'un point le long du câble. L'origine ($x = 0$) est l'extrémité libre du câble, et l'axe x est orienté vers le générateur (Fig.9). Dans ces conditions, les représentations complexes de la tension $\underline{u}$ entre l'âme et la gaine du câble et du courant $\underline{i}$ s'écrivent :

$$\left\{\begin{array}{lcl} \underline{u}(x,t) & = & \underbrace{A\exp\left(j(\omega t + q_r x)\right)}_{\text{onde incidente}} + \underbrace{B\exp\left(j(\omega t - q_r x)\right)}_{\text{onde réfléchie}} \\ \underline{i}(x,t) & = & \underbrace{-\frac{A}{Z_C}\exp\left(j(\omega t + q_r x)\right)}_{\text{onde incidente}} + \underbrace{\frac{B}{Z_C}\exp\left(j(\omega t - q_r x)\right)}_{\text{onde réfléchie}} \end{array}\right.$$

Question 9

L'extrémité $x = 0$ du câble n'est pas raccordée (impédance terminale infinie) : quelle relation lie alors A et B ? Cette extrémité est-elle un nœud ou un ventre de tension ? Et pour l'intensité ?

Question 10

L'autre extrémité du câble ($x = L$, côté générateur) est un nœud de tension à condition que la fréquence f soit égale à f_p telle que

$$f_p = \left(p + \frac{1}{2}\right) \frac{c_{\text{ph}}}{2L} \qquad p \in \mathbb{N} \tag{11}$$

On souhaite estimer c_{ph} à partir d'une mesure $f_p \pm \Delta f_p$. Donnez l'expression de c_{ph} et de l'incertitude associée.

Question 11

Estimez la fréquence $f_{0,1}$ la plus basse (indice $p = 0$) pour laquelle vous devriez observer un nœud de tension sur la voie 1 en supposant que c_{ph} vaut c_1 (valeur mesurée à la question 5).

Question 12

Réglez le générateur sur cette fréquence. Affinez le réglage pour minimiser l'amplitude du signal sur la voie 1 (vous n'obtiendrez par un vrai nœud mais un *pseudo-nœud* : à cause de l'atténuation, les ondes incidentes et réfléchies n'ont pas tout à fait la même amplitude, aussi elles ne peuvent s'annuler totalement, même lorsqu'elles sont en opposition de phase). Évaluez l'incertitude sur cette mesure de f_0. Mesurez l'amplitude du signal en $x = L$ et en $x = 0$.

Question 13

Augmentez progressivement la fréquence jusqu'à obtenir le minimum de tension suivant (indice $p = 1$), et répétez l'opération pour les 5 premiers minima (indice $p \leq 4$). À chaque fréquence, mesurez la fréquence, et les amplitudes en $x = L$ et $x = 0$.

Question 14

Utilisez l'équation 11 pour déduire de vos mesures la vitesse de phase c_{ph} pour les 5 fréquences correspondantes. D'après vos mesures, la vitesse de phase dépend-elle de la fréquence ?

Question 15

Les expériences en régime impulsionnel ont montré que l'amplitude du signal s'atténuait au cours de sa propagation, avec une distance caractéristique ℓ_a. Un modèle théorique qui tient compte de cette atténuation prévoit que, quand la fréquence f est telle que $x = L$ est un pseudo-nœud, les amplitudes des signaux mesurés aux deux extrémités du câble vérifient

$$\frac{|\underline{u}(L,t)|}{|\underline{u}(0,t)|} = \sinh\left(\frac{L}{\ell_a}\right) \tag{12}$$

Si on estime ℓ_a à partir des mesures des amplitudes $|\underline{u}(L,t)| = u_L \pm \Delta u_L$ et $|\underline{u}(0,t)| = u_0 \pm \Delta u_0$, quelle sont les expressions de ℓ_a et de l'incertitude associée $\Delta \ell_a$?
Estimez ℓ_a à partir des mesures des questions 11 et 12 pour les 5 fréquences correspondantes. D'après vos mesures, la distance d'atténuation ℓ_a dépend-elle de la fréquence ?

Cahier de TP — Quatrième séance

Questions 3 et 4
Notes et commentaires :

Question 5
Procédure suivie pour évaluer c_1 et les incertitudes associées :

$c_1 = \qquad \pm$

Question 7
Procédure suivie pour évaluer A_1, A_2, ℓ_a et α_{dB}, ainsi que les incertitudes associées :

$\ell_a = \qquad \pm$
$\alpha_{\mathrm{dB}} = \qquad \pm$

Question 8
Raisonnement suivi pour évaluer R :

$R =$

Question 10
$f_{0,1} =$

Questions 11 à 14

p	0	1	2	3	4
f_p (Hz)					
Δf_p (Hz)					
c_{ph} (m/s)					
Δc_{ph} (m/s)					
$\lvert \underline{u}(L,t) \rvert$ (V)					
$\lvert \underline{u}(0,t) \rvert$ (V)					
ℓ_a (m)					
$\Delta \ell_a$ (m)					

Procédure suivie pour l'évaluation de Δf_p :

N'oubliez pas la saisie en ligne de vos résultats.

Notes personnelles relatives au TP4