

BUT

Le but de ce laboratoire est de déterminer, par la méthode graphique de linéarisation, la masse linéique μ d'une corde fixée à ses deux extrémités et vibrant dans son mode fondamental.

La valeur de la masse linéique de la corde étant connue par votre enseignant ou votre enseignante, la qualité de votre expérimentation et de vos résultats sera prise en compte dans la correction de ce laboratoire.

THÉORIE

La vitesse d'une onde mécanique progressive dépend uniquement du milieu de propagation. Dans le cas d'une onde qui se propage dans une corde, le module v de sa vitesse (en m/s) est :

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (1)$$

où F est la tension (en Newton) et μ est la masse linéique de la corde, c'est-à-dire sa masse par unité de longueur (en kg/m). Ainsi, si la corde garde la même masse linéique et la même tension, la vitesse sera constante.

La longueur d'onde λ et la période T des ondes qui se propagent sur la corde sont reliées par l'équation générale s'appliquant à toutes les ondes :

$$v = \lambda f = \frac{\lambda}{T} \quad (2)$$

Dans ce laboratoire, l'étude des ondes progressives sera réalisée par l'analyse des ondes stationnaires qu'elles génèrent sur une corde tendue qui vibre. Une onde stationnaire est obtenue en superposant deux ondes progressives de même amplitude et de même fréquence mais voyageant en sens contraires. Pour une corde de longueur finie fixée à ses deux extrémités, l'onde stationnaire est produite par la superposition des allers et retours de l'onde progressive qui est réfléchiée à chacune des extrémités de la corde. Pour une corde de longueur donnée, seulement certaines ondes stationnaires sont possibles et on appelle celles-ci des **modes de résonance**.

Lorsqu'on pince une corde fixée à ses deux extrémités, l'onde stationnaire produite est dominée par le premier mode de résonance (qu'on appelle aussi le **mode fondamental**) : c'est le mode qui possède la plus petite fréquence (donc la plus grande longueur d'onde) possible. Le schéma ci-contre illustre une corde de longueur L fixée à ses deux extrémités vibrant dans son mode fondamental.

Lorsque la corde vibre dans son mode fondamental, elle possède une longueur d'onde λ égale au double de la longueur L de la corde (voir schéma ci-contre) :

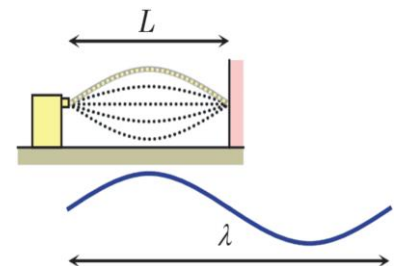
$$\lambda = 2L \quad (3)$$

En combinant les équations (1) et (2), on obtient :

$$\sqrt{\frac{F}{\mu}} = \frac{\lambda}{T} \quad (4)$$

En substituant $\lambda = 2L$ dans l'équation (4) puis en isolant T , on obtient :

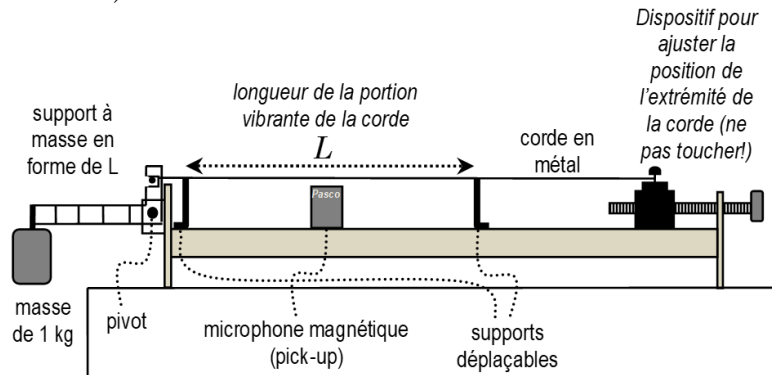
$$T = 2\sqrt{\frac{\mu}{F}}L \quad (5)$$



Dans cette expérience, le montage vous permettra de modifier la longueur L de la corde et de mesurer la période T de l'onde stationnaire et ce, pour une tension F qui demeurera constante. Vous pourrez ainsi déterminer expérimentalement la valeur de la masse linéique μ de la corde à partir de vos données et en linéarisant l'équation (5).

MONTAGE

Pour générer l'onde sur une corde, vous allez utiliser un **sonomètre**, un appareil qui est l'équivalent d'une guitare à une corde (voir schéma ci-dessous).



Les deux supports déplaçables servent à sélectionner la longueur efficace L de la partie de corde que vous allez faire vibrer. Le microphone magnétique détecte le mouvement de la corde et fonctionne sur le même principe qu'un « pick-up » de guitare électrique : un aimant est entouré d'une bobine de fil de cuivre et lorsque la corde métallique du sonomètre bouge devant l'aimant cela modifie le champ magnétique et induit un courant électrique dans la bobine.

Ce courant électrique oscillant est ensuite envoyé à un *oscilloscope*, un appareil qui permet de visualiser les signaux électriques (*oscillo-* pour « ondes » et *-scope* pour « voir »). C'est cet appareil qui nous permettra de mesurer la période d'oscillation de l'onde.

Une masse de 1 kg doit être accrochée à la cinquième encoche (la plus loin du pivot) du support en forme de « L » pour que la tension dans la corde soit la plus grande possible. En effet, si le point d'application de la force exercée par la masse sur le support est 5 fois plus éloigné du pivot que le point d'application de la tension, l'égalité des deux moments de force (par rapport au pivot) implique que la tension est égale à 5 fois la force exercée par la masse, donc à 5 fois le poids de la masse.

MANIPULATIONS

Avant de débiter les manipulations, téléchargez d'abord le fichier Excel « **TemplateCordeVibrante.xlsx** » que votre professeur rendra disponible en ligne. Vous devrez noter vos mesures expérimentales dans ce fichier.

- 1** Inscrivez votre numéro de montage sur votre feuille-réponse et également dans la case appropriée en haut de votre fichier Excel.
- 2** Vérifiez que la masse de 1 kg est bien suspendue sur la 5^e encoche (la plus loin du pivot).
- 3** Pour que la tension dans la corde du montage corresponde bien à 5 fois le poids de la masse suspendue, il faut que le support en forme de « L » soit parfaitement horizontal. Si ce n'est pas le cas, appelez le professeur pour qu'il ajuste le montage (ne touchez pas vous-même au dispositif d'ajustement situé de l'autre côté du montage ; il y a un risque de briser la corde).
- 4** Sur le sonomètre, placez d'abord un premier support déplaçable le plus près possible de l'extrémité où se trouve le support en forme de « L » (tel que montré sur le schéma précédent). Placez le deuxième support à environ 20 cm de distance de votre premier support afin d'avoir une *longueur de la portion vibrante de la corde* de $L \approx 20$ cm.

5 À l'aide du ruban à mesurer jaune intégré au sonomètre, prenez en note les positions x_1 et x_2 de chacun des deux supports qui délimitent la partie vibrante de la corde. Estimez également les incertitudes absolues δx_1 et δx_2 sur vos mesures.

 **Notez vos résultats dans Excel**

6 Incertitudes δx sur les positions des supports déplaçables

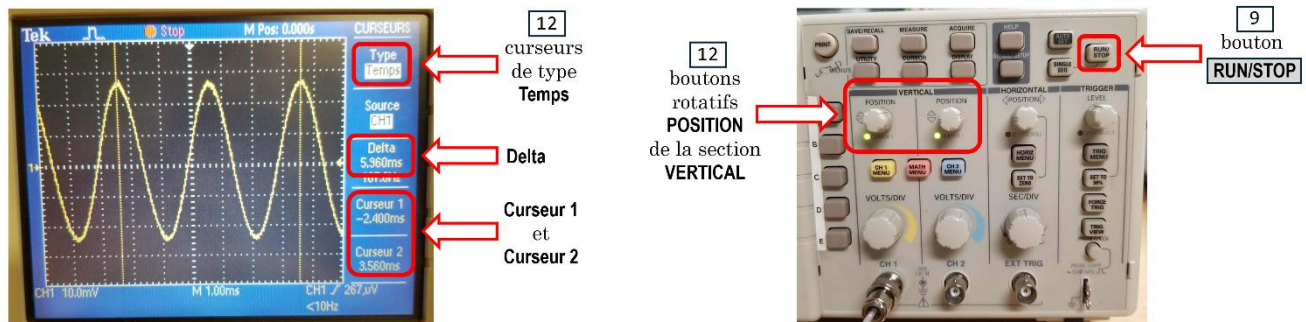
Écrivez sur votre feuille-réponse la valeur de l'incertitude δx sur les positions des supports déplaçables que vous avez jugé bon d'utiliser et expliquez comment vous avez déterminé cette valeur.

 **À compléter dans le rapport**

7 Placez le microphone magnétique à peu près à mi-chemin entre les deux supports déplaçables, tel que montré sur le schéma précédent.

8 Pour mesurer la période T de l'onde générée par la corde, nous allons utiliser l'oscilloscope. Vérifiez qu'il est bien allumé (sinon faites-le en appuyant sur le bouton situé sur le dessus de l'appareil, à gauche). Assurez-vous que le connecteur (fil gris) du microphone magnétique (petite boîte noire) est branché dans le canal 1 (**CH1**) de l'oscilloscope.

9 En pinçant la corde, faites vibrer la portion de corde qui se trouve entre les deux supports déplaçables. Regardez le signal s'afficher en temps réel sur l'écran de l'oscilloscope. Si rien ne bouge, il est peut-être en mode arrêté ; essayez d'appuyer sur le bouton **RUN/STOP** afin que la mention « **STOP** » (en rouge) sur le haut de l'écran *disparaisse*.



10 Pour obtenir un son qui provient uniquement de l'oscillation du segment de corde entre les deux supports déplaçables et non de l'autre partie de la corde, il faudra l'empêcher autant que possible de vibrer. Le plus simple est de déposer un doigt au milieu de la partie de la corde qui n'est pas supposée vibrer (sans appuyer trop fort pour ne pas modifier la tension) pendant que vous faites vibrer la corde comprise entre les supports.

11 Au moment où vous obtenez un « beau » son avec une amplitude assez grande, appuyez sur le bouton **RUN/STOP**. L'oscilloscope enregistre le signal pendant quelques instants et l'affiche ensuite de manière stable à l'écran. Si vous n'êtes pas satisfaits, vous pouvez faire vibrer à nouveau la corde et refaire **RUN/STOP**. Même si le signal obtenu à l'écran n'est pas un sinus parfait, ce n'est pas très grave. L'important ici est que votre signal soit périodique et que vous soyez capables de repérer et de mesurer correctement la période T à laquelle la corde vibre. (Il pourrait en effet y avoir de légères asymétries ou de petites bosses causées par une superposition d'harmoniques dans votre signal.)

12 À droite de l'écran de l'oscilloscope, vous devriez voir que le type de curseurs sélectionné est « **Temps** ». En bas de cette colonne, les informations « **Curseur 1** » et « **Curseur 2** », indiquent la position sur l'axe horizontal, en millisecondes (ms), de chacun des deux curseurs. Vous pouvez déplacer ces curseurs afin de mesurer un intervalle de temps Δt en tournant les deux boutons rotatifs **POSITION** de la section **VERTICAL**. Au centre de la colonne, l'information « **Delta** » affiche directement l'intervalle de temps Δt qui se situe entre les deux curseurs.

13 Déplacez les curseurs afin de mesurer l'intervalle de temps Δt pour le plus grand nombre de cycles complets apparaissant à l'écran. Estimez également l'incertitude absolue $\delta\Delta t$ sur votre mesure. Notez également le nombre n de cycles complets que vous avez réussi à sélectionner pour prendre votre mesure.

 **Notez vos résultats dans Excel**

14 Incertitudes $\delta\Delta t$ sur les intervalles de temps

Écrivez sur votre feuille-réponse la valeur de l'incertitude $\delta\Delta t$ sur les intervalles de temps que vous avez jugé bon d'utiliser et expliquez comment vous avez déterminé cette valeur.

 **À compléter dans le rapport**

15 Vous allez maintenant reproduire cette mesure (étapes **5** à **14**) pour différentes longueurs de corde vibrante. Ne déplacez toujours que le support le plus éloigné de la masse suspendue. Prenez soin à chaque fois d'étouffer le son de la partie de la corde qui se trouve à l'extérieur des supports, et déplacez le micro au besoin pour qu'il se trouve toujours à peu près au centre de la partie vibrante de la corde.

Effectuez des mesures pour 10 longueurs L de corde différentes situées environ entre 20 cm et 60 cm. Assurez-vous que vos points couvrent bien l'étendue des longueurs demandées.

 **Notez vos résultats dans Excel**

16 Linéarisation de l'équation théorique de la période en fonction de la longueur

Afin d'obtenir la valeur expérimentale de la masse linéique μ de la corde, posez les variables transformées afin de linéariser l'équation $T = 2\sqrt{\frac{\mu}{F}}L$ de manière à obtenir une droite de la forme la forme $Y = MX + B$.

 **À compléter dans le rapport**

17 SIGNATURE

Assurez-vous d'avoir bien inscrit votre numéro de montage ainsi que vos 10 mesures x_1 , x_2 , Δt et n dans votre fichier Excel. Appelez votre professeur afin qu'il vérifie vos **variables transformées** (que vous venez d'écrire à l'étape précédente) ainsi que votre **fichier Excel** et qu'il appose sa signature sur votre feuille-réponse.

18 Dépôt du fichier Excel sur LÉA-Travaux

Avant de quitter le laboratoire, déposez une copie de votre fichier Excel dans l'onglet « **Fichier Excel Corde Vibrante** » que votre professeur aura créé dans la plateforme **LÉA-Travaux**. Il est normal à ce moment-ci que votre fichier ne soit pas complété, mais il doit contenir au moins votre numéro de montage ainsi que vos 10 mesures de x_1 , x_2 , Δt et n . Indiquez sur votre feuille-réponse le nom du coéquipier qui a déposé le fichier sur **LÉA-Travaux** (ne déposez qu'un seul fichier Excel par équipe.)

 **À compléter dans le rapport**

19 Les manipulations sont désormais terminées. Si vous voulez, vous pouvez vérifier qualitativement vos mesures à l'aide d'un diapason (étapes **20** à **25**).

Remplacez le matériel comme vous l'avez trouvé.

VALIDATION QUALITATIVE DES MESURES (partie facultative)

Il est possible de vérifier que les valeurs de périodes obtenues sur l'oscilloscope concordent bien avec les fréquences des ondes qu'on peut entendre. Pour y parvenir, vous devrez régler la longueur de la corde pour faire en sorte que sa fréquence fondamentale corresponde à **440 Hz**, la fréquence du diapason qui se trouve également sur votre table. Vous pourrez ainsi valider « par oreille », que la note du son du diapason est la même que celle du son produit par la corde, et vérifier que la période affichée à l'oscilloscope concorde bien avec cette fréquence.



- 20** Commencez par calculer quelle devrait être la période d'une onde de 440 Hz (rappel : $T = 1/f$). Notez ce résultat sur une feuille brouillon.
- 21** En regardant votre tableau de données, trouvez les mesures qui se rapprochent le plus de cette période et déduisez quelle devrait être la longueur approximative de la corde pour obtenir cette période.
- 22** Modifiez la longueur de la corde afin d'avoir approximativement cette longueur de corde vibrante, puis pincez la corde.
- 23** Frappez sur le diapason avec le maillet en caoutchouc fourni, placez le diapason sur le sonomètre (celui-ci agit comme une caisse de résonance) et pincez la corde. Vous devriez pouvoir constater que les deux fréquences entendues sont assez proches.
- 24** Si vous avez l'oreille musicale, vous pouvez réajuster la longueur de la corde légèrement jusqu'à ce que les deux sons aient exactement la même fréquence.
- 25** Une fois que vous êtes convaincus que la corde vibre à **440 Hz**, enregistrez le signal en utilisant le bouton **RUN/STOP** et mesurez la période d'une oscillation. Celle-ci devrait concorder, dans les limites de l'incertitudes, à celle que vous avez calculée à l'étape **20**.

Remplacez le matériel comme vous l'avez trouvé.

ANALYSE

Pour les questions suivantes, utilisez les **règles simplifiées** ou la **méthode différentielle** pour les calculs propagation des d'incertitudes. Exprimez vos résultats sous la forme $x = (\tilde{x} \pm \delta x)$ en respectant les règles de la nomenclature.

26 Calcul de la longueur L de la corde (et de son incertitude)

Montrer un exemple complet de calcul (qui correspond à la première ligne de votre **Tableau 1** et **2**) qui montre comment vous avez combiné vos mesures de x_1 , x_2 , δx_1 et δx_2 afin d'obtenir la valeur correspondante de L et de δL .

 À compléter dans le rapport

27 Calcul de la période T de vibration du mode fondamental (et de son incertitude)

Montrer un exemple complet de calcul (qui correspond à la première ligne de votre **Tableau 1** et **2**) qui montre comment vous avez combiné vos mesures de Δt , $\delta \Delta t$ et n afin d'obtenir une valeur de T et de δT .

 À compléter dans le rapport

28 Ajustement du nombre de décimales affichées dans vos tableaux Excel

Vous êtes désormais en mesure de compléter toutes les cases manquantes dans vos tableaux Excel.

Assurez-vous de bien respecter les règles de la nomenclature associées à la notation $x = (\tilde{x} \pm \delta x)$.

Assurez-vous d'avoir le bon nombre de décimales affichées pour chaque case dans vos tableaux Excel.

Utilisez au besoin les touches raccourcies « ajouter une décimale » et « réduire les décimales ».



29 Calcul de la tension F dans la corde (et de son incertitude)

Rappel : tel qu'expliqué précédemment dans la partie **MONTAGE**, le point d'application de la force exercée par la masse de 1 kg sur le support est 5 fois plus éloigné du pivot que le point d'application de la tension. L'égalité des deux moments de force (par rapport au pivot) implique que la tension est égale à 5 fois la force exercée par la masse, donc à 5 fois le poids de la masse.

Calculez la tension F qui était présente dans votre corde. Calculez également l'*incertitude absolue* δF associée à votre valeur de tension. Considérez que l'*incertitude relative* sur la tension est de 5% (cette valeur est basée sur des tests effectués par l'équipe de professeurs).

 À compléter dans le rapport

30 Graphique des variables transformées

Tracez un **GRAPHIQUE 1** (nuage de points) de vos variables transformées Y en fonction de X à partir des données de votre **TABLEAU 2**. Votre graphique doit respecter les consignes de mise en forme habituelle (titre complet, axes bien identifiés par les symboles des variables, unités des axes écrites entre parenthèses, etc.). Ajoutez une courbe de tendance linéaire à votre graphique et remplacez dans l'équation affichée les variables x et y par les véritables variables de votre expérience.

31 Calcul de la masse linéique μ de la corde (et de son incertitude)

Dans l'espace prévu à cet effet dans le rapport, recopiez la valeur de votre pente M et de son incertitude δM calculées dans les cases rouges (vous devrez ajuster vos valeurs M et δM afin de respecter le bon nombre de chiffres significatifs et le bon nombre de décimales). Spécifiez également les unités de la pente M .

Faites ensuite les calculs nécessaires pour obtenir la masse linéique μ de la corde ainsi que son incertitude $\delta \mu$.

 À compléter dans le rapport

CONSIGNES POUR LA RÉDACTION DU TEXTE D'ANALYSE DE VOTRE RAPPORT DE LABORATOIRE :

Écrivez et imprimez un texte à l'ordinateur (**environ deux ou trois pages maximum**) qui contient les éléments suivants :

A1 Une section « **But de l'expérience** » dans laquelle vous expliquez le but de l'expérience, où vous présentez l'équation que vous cherchez à valider et où vous nommez et expliquez clairement la signification de chacune des variables présente dans l'équation (T , μ , F et L) ainsi que les unités qui y sont associées.

A2 Une section « **Analyse dimensionnelle** » dans laquelle vous démontrez que les unités physiques sont équivalentes de part et d'autre du signe d'égalité dans l'équation que vous avez écrite à la partie précédente.

A3 Une section « **Protocole** » dans laquelle vous résumez les manipulations que vous avez exécutées afin de mesurer et d'obtenir les données pertinentes dans votre expérience (x_1 , x_2 , Δt et n ainsi que L et T). Inutile de recopier vos données expérimentales, mais vous devez explicitement faire référence à vos **Tableau 1** et **2** dans votre texte.

A4 Une section « **Analyse des résultats** » dans laquelle vous présentez et commentez le graphique que vous avez tracé dans le but de vérifier votre équation. Inutile de réimprimer une seconde fois votre graphique, mais vous devez explicitement faire référence à votre **Graphique 1** dans votre texte. Spécifiez le titre du graphique, expliquez en mots il s'agit d'un graphique de que quoi en fonction de quoi, expliquez la forme générale que possède le graphique et expliquez à quoi correspond sa pente. Expliquez également quelles sont les unités de la pente.

A5 Une section « **Validation de la masse linéique** » dans laquelle vous devrez faire une recherche sur internet (ou demander à ChatGPT 😊) afin de trouver un intervalle de valeurs typiques de masses linéiques μ (en g/m) qui correspondent habituellement à des cordes de guitare. Comparez ces valeurs à la valeur de μ que vous avez obtenue à la fin de votre analyse et dites si votre valeur vous semble raisonnable et plausible.

A6 Une section « **Mesure la moins précise** » dans laquelle vous devrez expliquer et démontrer que la mesure de la tension F est la mesure la moins précise dans toute votre expérience. Afin de s'en convaincre, calculez d'abord les incertitudes relatives $\delta M/M$ et $\delta F/F$, puis combinez ces deux résultats afin de calculer quel pourcentage de l'incertitude absolue $\delta \mu$ est directement imputable à l'incertitude associée à la mesure de la tension. (Indice : revoyez les calculs que vous avez effectués à l'étape **31** pour calculer $\delta \mu$.)

A7 Une section « **Mesure la plus précise** » dans laquelle vous devrez répondre à la question suivante. En réalisant votre expérience, vous avez pris des mesures de x_1 , x_2 , Δt et n , que vous avez ensuite combinées afin d'obtenir des mesures de longueurs L et de périodes T . Laquelle de ces deux quantités (L ou T) avez-vous réussi à mesurer le plus précisément ? Pour répondre à cette question, vous devrez vous baser sur des calculs d'incertitudes relatives $\delta T/T$ et $\delta L/L$.

CONSIGNES POUR LA REMISE DU DOCUMENT FINAL :

Votre rapport de laboratoire devra être **agrafé** et contenir **dans l'ordre ci-dessous** :

(1) Votre **feuille-réponse** (**Corde vibrante Rapport**) dûment complétée.

(2) Votre **texte d'analyse** écrit à l'ordinateur (texte d'environ 2 ou 3 pages maximum).

(3) Votre **fichier Excel imprimé** (ce fichier devrait par défaut s'imprimer sur une seule page en format paysage et contenir vos 2 tableaux de données et votre graphique).