ACOUSTIQUE 2 : INTERPRETATION ONDULATOIRE DES ONDES SONORES

Matériel :

- Un GBF
- Un stroboscope
- Un amplificateur
- Un vibreur
- Trois potences
- Une poulie
- Des masses marquées
- Une corde de guitare Ø 0.20 mm
- Une plaque percée d'un petit trou

Connaissances et savoir-faire exigibles :

(1) Connaître l'allure de l'onde après réflexion sur une extrémité fixe.
(2) Savoir comment produire un système d'ondes stationnaires ; application à la détermination d'une longueur d'onde.
(3) Connaître et exploiter les relations exprimant la quantification des modes : $2L = n \times \lambda$ (n entier) ; $\nu_n = nv/2L$.

Savoir-faire expérimentaux :

Avec le matériel disponible au laboratoire savoir réaliser et exploiter une expérience d'ondes stationnaires :
(4) - mesure de longueur d'onde,
(5) - mesure d'une célérité,
(6) - mesure des fréquences propres,
(7) - influence des paramètres.

I Réflexion d'un signal sur un obstacle fixe [1] :

1) Expérience : *Vérification à l'aide de la simulation de G.Gastebois*

Un élève tient la corde fixe à une extrémité et un autre élève excite verticalement l'extrémité opposée.

a. Faire deux schémas représentant la situation juste avant réflexion et la situation juste après réflexion.
b. Vérifier et corriger si besoin en visualisant la vidéo ondoscope-extrem-fixe.avi.

2) Questions :

Quelles sont les caractéristiques de l'onde réfléchie :

- Identiques à celles de l'onde incidente ?

Même célérité, même forme du signal

- Différentes de celles de l'onde incidente ?

Le sens de propagation s'inverse, l'élongation change de signe

3) A retenir : *Voir diaporama*

Lorsqu'une onde se réfléchit sur un obstacle fixe, il apparaît une onde réfléchie, de forme renversée, qui se propage à la même vitesse que l'onde incidente, mais en sens contraire.

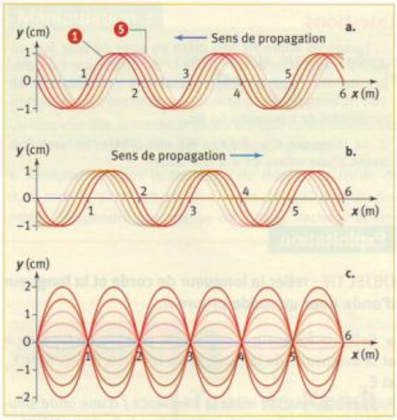
II Réflexion d'une onde progressive sinusoïdale sur un obstacle fixe : obtention d'ondes stationnaires :

1) Activité : *Livre Parisi Belin p62/63*

Pour introduire l'activité, on peut partir de la simulation de G.Gastebois, en choisissant onde progressive stationnaire.

OBJECTIF : simuler par un logiciel une onde sinusoïdale incidente, réfléchie et leur superposition.

Pour simuler l'onde réfléchie, il faut pouvoir caractériser le phénomène de réflexion. L'utilisation de l'ondoscope a montré que la réflexion sur une extrémité fixe ne modifie pas la forme de l'onde, mais qu'elle inverse le sens de la perturbation.
Pour poursuivre cette étude, on peut utiliser des logiciels qui permettent de mettre en évidence le phénomène de propagation d'une onde transversale progressive sinusoïdale, par exemple, le long d'une corde (voir sur le site *www.univlemans.fr/enseignements/physique/02/meca/reflexondes.html*).
Une corde tendue est fixée en O. Au repos, cette corde est confondue avec l'axe Ox. L'axe Oy est perpendiculaire à Ox (➡ doc. 2). Sous l'effet d'une perturbation se propageant le long de la corde, un point M quelconque de la corde se déplace transversalement. Son ordonnée *y* est appelée **élongation**.



Doc. 2. Visualisation par simulation de l'onde progressive sinusoïdale incidente (a), de l'onde réfléchie (b) et de l'onde stationnaire, superposition de l'onde incidente et de l'onde réfléchie (c).

L'onde incidente et l'onde réfléchie en O se superposent. Dans le cas d'une corde, cela signifie qu'à une date *t* quelconque, l'élongation de la corde en un point d'abscisse *x* est la somme de l'élongation de la corde due à l'onde incidente à la date *t* et de l'onde réfléchie à cette même date.

Le doc. 2c présente le résultat d'une simulation de la propagation, le long d'une corde, d'une onde incidente sinusoïdale de fréquence 10 Hz. L'onde incidente se propage de droite à gauche et se réfléchit sur l'extrémité fixe de la corde située à *x* = 0. Pour l'onde incidente et l'onde réfléchie, la forme de la corde a été représentée à 5 dates séparées d'une durée de 6,25 ms.

- Indiquer si dans le cas de l'onde incidente, la forme de la corde repérée par 1 est antérieure ou postérieure à la forme de la corde repérée par 5 (➡ doc. 2a). Déterminer la valeur de la longueur d'onde pour l'onde incidente, l'onde réfléchie (➡ doc. 2c) ainsi que la célérité *v* de ces ondes. Comparer la fréquence de l'onde réfléchie à celle de l'onde incidente.
- L'onde stationnaire (➡ doc. 2c) présente des nœuds et des ventres de vibration. Proposer une relation liant l'élongation de l'onde incidente et celle de l'onde réfléchie à toute date *t* en un point situé sur un nœud ; sur un ventre.

Questions

4. Exprimer, en fonction de la longueur d'onde, la distance qui sépare deux nœuds voisins.
5. Quel point commun présentent les vibrations des points de la corde appartenant à un même fuseau ? Qu'en est-il pour deux fuseaux voisins ?
6. Y a-t-il propagation d'une perturbation dans le cas d'une onde stationnaire ?

Réponses :

- La forme représentée par 1 est postérieure à la forme représentée par 5 (voir le sens de propagation de l'onde).
  Pour l'onde incidente, la longueur d'onde (période spatiale) est égale à 2 m.
  Pour l'onde réfléchie, elle est également de 2 m.
  Pour déterminer la période de l'onde, on remarque que 5 dates séparées chacune de 6.25 ms représentent un quart de la période. Donc T = 6.25×4×4 = 100 ms
  Pour obtenir la célérité, on utilise la formule $v = \frac{\lambda}{T} = \frac{2}{100\times10^{-3}} = 20 m/s$
  La fréquence de l'onde incidente et celle de l'onde réfléchie sont identiques et égales à 10 Hz.
- On voit que, pour un nœud de vibration, quand l'élongation de l'onde incidente est maximum et égale à y = 1 cm (pour x = 2 m par exemple), alors l'élongation de l'onde réfléchie est minimum y = -1 cm.
  Ainsi on peut écrire que pour un nœud de vibration de l'onde stationnaire : $y_{incidente} = - y_{réfléchie}$.

  Pour un ventre de vibration (pour x = 1.5 m par exemple), on voit que les élongations de l'onde incidente et de l'onde réfléchie sont maximums y = 1 cm.
  Ainsi on peut écrire que pour un ventre de vibration de l'onde stationnaire : $y_{incidente} = y_{réfléchie}$.

4. La distance qui sépare deux nœuds voisins est égale à λ/2.
5. Les vibrations des points d'un même fuseau se font dans le même sens et à la même fréquence. C'est aussi le cas pour deux fuseaux voisins.
6. Non. En marquant un point sur l'onde stationnaire, on remarque qu'il ne se propage pas.

2) A retenir : *Voir diaporama*

- La superposition d'une onde progressive sinusoïdale de fréquence ν et de l'onde réfléchie sur un obstacle fixe issue de celle-ci fait apparaître une onde stationnaire de même fréquence ν. (les élongations des deux ondes s'additionnent algébriquement).

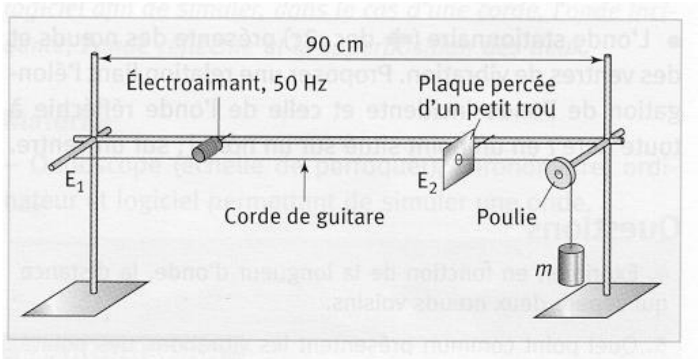
Remarque :
Une onde stationnaire apparaît pour toute fréquence de l'onde incidente, il n'y a pas quantification.

- Une onde stationnaire présente des nœuds et des ventres de vibrations (l'extrémité de la corde où se situe l'obstacle est nécessairement un nœud de vibration).
  La distance entre deux nœuds ou deux ventres consécutifs est égale à λ/2, λ étant la longueur d'onde de l'onde incidente.

III Réflexion sur deux obstacles fixes :

1) Activité expérimentale [(4), (5), (6) et (7)] :

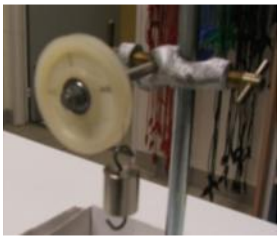
Nous avons déjà constaté dans les oscillations forcées d'une corde (chapitre précédent paragraphe II3)) qu'une onde stationnaire ne pouvait apparaître le long d'une corde fixée entre deux points fixes que pour certaine fréquence.
Nous allons voir à présent, l'influence qu'ont les différents paramètres liés à la corde sur l'onde stationnaire.

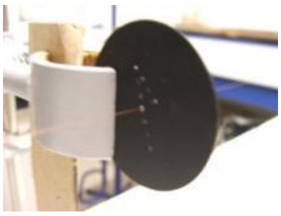


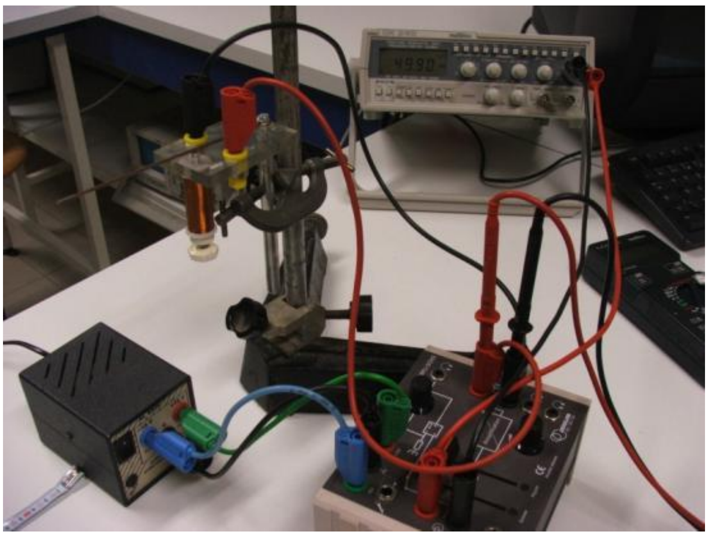
Voici le dispositif expérimental :
Nous utiliserons celui-ci à une différence près : l'électroaimant de 50 Hz est remplacé par un vibreur alimenté avec une tension alternative de 50 Hz.

Attention, ces deux appareils qui permettent de mettre en vibration la corde, l'excite à une fréquence double de leur fréquence de vibration.
La fréquence d'excitation de la corde sera donc de 100 Hz.

La plaque percée d'un petit trou constitue un point fixe pour la corde, déplacée lentement le long de la corde, elle permet de faire varier la longueur L en maintenant la tension du fil constante.







Question 1 :

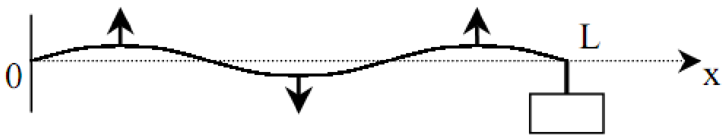
- La fréquence de vibration de la corde étant fixée (100 Hz), quels paramètres de cette expérience peut-on faire varier ? Citez-les.
- Quelle précaution faut-il prendre pour étudier l'influence de ces divers paramètres ?

a. Expérience 1 : éclairage stroboscopique :

Accrochez une masse de 25 g pour tendre la corde, cherchez la longueur de corde (en déplaçant la plaque trouée) qui permet d'obtenir trois fuseaux.

Eclairez la corde au stroboscope réglé sur la fréquence de vibration de la corde (on rappelle que ν_{strobo} (coup/min) = $\nu_{vibreur}$(Hz)×60).

Question 2 :



- Qu'observez-vous ? Faites un schéma.
  La corde paraît immobile, ou en mouvement apparent très lent.
- Que peut-on dire sur la vibration des points de la corde située entre deux nœuds consécutifs ?
  Les points de la corde entre deux nœuds consécutifs vibrent en phase.
- Et de part et d'autre d'un nœud ?
  Les points de la corde de part et d'autre d'un nœud vibrent en opposition de phase.

b. Expérience 2 : relation entre la longueur de la corde L et la longueur d'onde λ :

Ici on ne fait varier que L

Pour une masse de 50 g qui tend la corde, complétez le tableau suivant :

L (cm)	86	58	29
n	3	2	1
λ (cm)	58	58	58

n représente le nombre de fuseaux.
D'après le paragraphe précédent, on sait que la distance entre deux nœuds consécutifs est égale à λ/2.

Question 3 :

- Etablissez une relation entre L, n et λ.
  L = $n\frac{\lambda}{2}$
- Soit Δt la durée d'un aller-retour de l'onde le long de la corde : exprimer Δt en fonction de L et V célérité de l'onde. Le phénomène d'onde stationnaire est stabilisé si cette durée Δt correspond à un nombre entier de périodes T soit Δt = n T avec n nombre entier.
  Justifiez la relation entre L et λ déterminée précédemment.

  On sait que $v = \frac{distance}{temps}$ donc ici $V = \frac{2L}{\Delta t} = \frac{2L}{n \times T}$. On sait aussi que $\lambda = \frac{V}{\upsilon}$ donc $V = \lambda \times \upsilon$

  Finalement : $\frac{2L}{n \times T} = \frac{2L \times \upsilon}{n} = \lambda \times \upsilon \Leftrightarrow L = n\frac{\lambda}{2}$

c. Expérience 3 : relation entre la célérité V des ondes et la tension de la corde :

Ici on ne fait varier que $F_{tension}$ par l'intermédiaire de m

Pour différentes valeurs de la masse m, recherchez une valeur de L qui conduit à l'existence d'une onde stationnaire. Comptez le nombre de fuseaux. A partir de la relation entre L, n et λ établit ci-dessus, déterminez la valeur de λ pour les différentes masses puis calculez la célérité dans chaque cas sachant que ν = 100 Hz.

Complétez le tableau ci-dessous dans lequel $F_{tension}$ désigne la tension de la corde :

m (g)	*50*	*75*	*25*
L (cm)	*86*	*71*	*62*
n	*3*	*2*	*3*
$F_{tension}$ (N)	*0.49*	*0.74*	*0.25*
λ (cm)	*58*	*71*	*41*
V (m.s^{-1})	*58*	*71*	*41*
$V/\sqrt{F_{tension}}$	*83*	*83*	*82*

Calcul de $F_{tension}$: $F_{tension}$ = P(masse m) = m×g avec g = 9.81 N.kg^{-1}

Question 4 :

- Dans la dernière ligne du tableau, calculez $V/\sqrt{F_{tension}}$. Proposez une expression de V en fonction de $F_{tension}$.
  La célérité des ondes sur la corde est proportionnelle à la tension de la corde.
- Sachant que l'on a aussi $V = k \times \frac{1}{\sqrt{\mu}}$ et **à partir d'une mesure du tableau** ci-dessus, trouvez une valeur de μ qui est la masse linéique de la corde :
  On sait à présent que $V = \sqrt{\frac{F_{tension}}{\mu}} \Leftrightarrow \mu = \frac{F_{tension}}{V^2}$
  Avec la deuxième mesure : on trouve μ = 1.5×10^{-4} kg.m^{-1}

d. Expérience 4 : fréquences des modes propres de vibrations de la corde :

Ici on ne fait varier que ν

Nous allons dans cette expérience retrouver théoriquement la valeur des fréquences propres et vérifiez expérimentalement leur validité.

Question 5 :

- Rappeler la relation entre la fréquence ν d'une onde sinusoïdale progressive, sa longueur d'onde λ et sa célérité V.
  $\lambda = \frac{V}{\upsilon}$
- Comment a-t-on désigné au chapitre précédent l'onde stationnaire associée au nombre de fuseaux n ?
  L'onde stationnaire a été appelée harmonique de rang n
- Établir la relation entre la fréquence ν_n du mode harmonique de rang n de vibration de la corde, la longueur L de la corde et la célérité V.

$$\upsilon = \frac{V}{\lambda} \; et \; L = n\frac{\lambda}{2} \quad d'où \; \upsilon_n = n\frac{V}{2L}$$

On se place à L = 88cm et m = 75 g. A l'aide du tableau et des formules précédentes, calculez les différentes fréquences propres. Vérifiez expérimentalement l'obtention de ces modes propres aux fréquences calculées.

On se place à L = 88cm et m = 75 g (donc V = 71 m/s). On a donc $\upsilon_n = n \times 40.3$

Si ν_{GBF} = 40 Hz, ν_{CORDE} = 80 Hz, on observe deux fuseaux. (on commence par cette valeur de fréquence (harmonique 2) car le vibreur ne permet pas de travailler en dessous ν_{GBF} = 30Hz. On ne peut donc pas observer le mode fondamental).

Pour observer le troisième mode harmonique, on se place à ν_{GBF} = 60 Hz d'où ν_{CORDE} = 120 Hz

Pour observer le quatrième mode harmonique, on se place à ν_{GBF} = 80 Hz d'où ν_{CORDE} = 160 Hz

2) A retenir : *Voir diaporama*

a. Condition de stabilité (3) :

Soit une **corde de guitare fixée à ses deux extrémités** : si une onde se propage le long de cette corde, elle est réfléchie un grand nombre de fois aux extrémités : des ondes stationnaires ne peuvent s'établir qu'à certaines conditions :

- On a vu dans le paragraphe précédent que la **longueur des fuseaux est de λ/2**.
- On a vu lorsque nous avions forcé l'oscillation de la corde que lors d'ondes stationnaires, la **longueur des fuseaux était égale à L/n**, n étant le rang de l'harmonique de vibration de la corde.

Conclusion : On en déduit que l'on peut observer une onde stationnaire de n fuseaux sur une corde de longueur L à condition que :

$$\boxed{L = n\frac{\lambda}{2}}$$

L : longueur de la corde en mètre
n : entier naturel donnant le nombre de fuseaux de l'onde stationnaire visibles sur la corde.
λ : longueur d'onde de l'onde sinusoïdale qui donne naissance à l'onde stationnaire = longueur d'onde de l'onde stationnaire

b. Production d'ondes stationnaires et détermination de longueur d'onde (2) :

Nous avons vu au chapitre précédent et au 1) de ce paragraphe comment produire des ondes stationnaires sur une corde métallique.

Nous savons à présent que la longueur d'un fuseau est égale à λ/2.

Donc lorsque nous produisons une onde stationnaire sur une corde fixée à ses deux extrémités, il suffit de mesurer la longueur d'un fuseau pour connaître la longueur d'onde de l'onde stationnaire en question.

c. Fréquences propres (3) :

Cherchons alors l'expression des fréquences propres (en fonction de la longueur de la corde) qui donnent naissance aux ondes stationnaires :
On connaît la relation liant la fréquence ν à la longueur d'onde λ par l'intermédiaire de la célérité des ondes V dans le milieu : $\nu = \frac{V}{\lambda}$ Or on a $L = n\frac{\lambda}{2} \Leftrightarrow \lambda = \frac{2L}{n}$ d'où :

$$\boxed{\upsilon_n = \frac{nV}{2L}}$$

Les fréquences des modes propres (fondamental et harmoniques) sont bien quantifiées.

Si on remplace V par sa relation avec $F_{tension}$ et μ que l'on a vue expérimentalement, on obtient :

$$\boxed{\upsilon_n = \frac{n}{2L}\sqrt{\frac{F_{tension}}{\mu}}}$$

La Hauteur du son produit par une corde de guitare dépend de sa longueur, de sa tension et de sa masse linéique.