Travaux Dirigés

de Physique

Charles Tuchendler

MPSI 4 – Lycée Saint-Louis

Année 2019/2020

Table des matières

TD n° 12 Ondes 1

Exercice n° 1 - Scorpion de sable 2

Exercice n° 2 - Vague humaine 2

Exercice n° 3 - Mascaret 2

Exercice n° 4 - Mesure de distance et de vitesse par radar 2

Exercice n° 5 - Mesure de la célérité du son 4

Exercice n° 6 - Interférences 4

Exercice n° 7 - Ondes stationnaires 4

Exercice n° 8 - Ondes stationnaires sur une corde de guitare 5

Exercice n° 9 - Deux haut-parleurs 6

Exercice n° 10 - Résonance 6

Exercice n° 11 - Déphasage 6

TD n° 12

Ondes

Figure 12.1 – *La révolution des vibrations hybrides est en marche.*

Exercice n° 1 - Scorpion de sable

Un scorpion de sable peut détecter le mouvement d'un insecte dans son voisinage par les vibrations mécaniques engendrées à la surface du sable par le déplacement de l'insecte. Deux types d'ondes différentes peuvent se propager : des ondes progressives transversales se propageant à la vitesse $v_t = 50$ m.s^{-1} et des ondes progressives longitudinales se propageant à la vitesse $v_\ell = 150$ m.s^{-1}.

On note Δt l'intervalle de temps séparant la détection des deux types d'ondes.

1. Expliquer la différence qu'il existe entre une onde transversale et une onde longitudinale.
2. A quelle distance du scorpion se trouve un insecte pour lequel $\Delta t = 4,0$ ms ?

Exercice n° 2 - Vague humaine

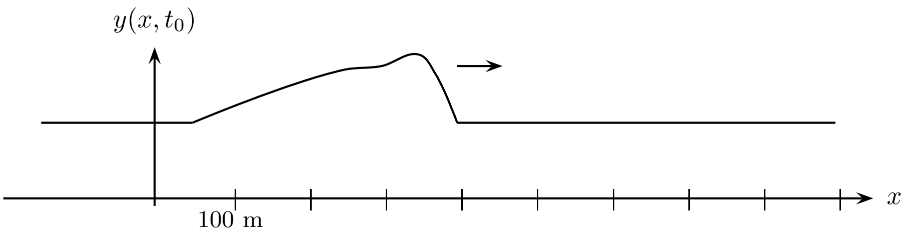
Il arrive très souvent lors d'évènements sportifs se déroulant dans des stades que le public crée une "hola", une vague humaine générée par le passage de chaque spectateur de la position assise à la position debout puis de nouveau assise. On considére ici qu'une durée $\tau = 1,8$ s est nécessaire à chaque spectateur pour effectuer le déplacement complet.

Notons ℓ la largeur de la vague créée par les spectateurs et définie comme la distance séparant le prochain spectateur qui devra commencer à se lever du spectateur qui vient de se rassoir sur son siège. On considère ici une onde se déplaçant de 853 sièges autour d'un stade en 39 s.

1. Quelle est la vitesse de propagation de l'onde humaine ?
2. Quelle est la valeur ℓ de la largeur de la vague ?

Exercice n° 3 - Mascaret

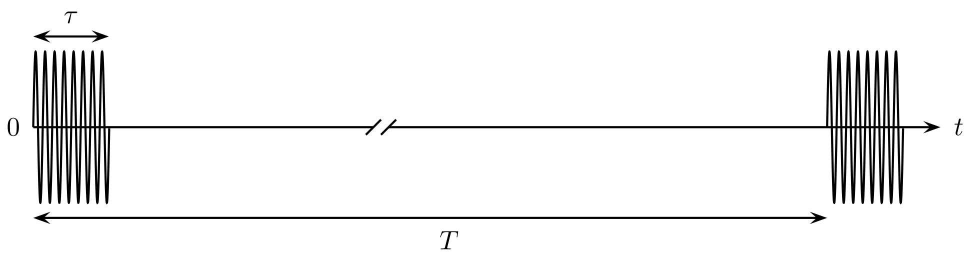
Un mascaret est une vague solitaire remontant un fleuve au voisinage de son estuaire, et provoquée par une interaction entre son écoulement et la marée montante. On considère ici un mascaret se déplaçant à la vitesse $c = 20$ km $\cdot$ h^{-1} le long d'un fleuve rectiligne, et on définit un axe Ox dans la direction et le sens de sa propagation. A un instant $t_0 = 0$, le profil de niveau de l'eau du fleuve a l'allure suivante :



1. Faire un schéma du profil de niveau du fleuve à $t = 1,0$ min, en supposant que l'onde se propage sans déformation.
2. Un surfeur attend avec sa planche à l'abscisse $x_s = 2,0$ km. À quel instant va-t-il recevoir la vague ?
3. Un détecteur fixe, enregistrant la hauteur du fleuve en fonction du temps, est placé à l'abscisse $x_\mathrm{d} = 1,4$ km. Dessiner l'allure des variations $y(x_d, t)$ en fonction de t.
4. En réalité, l'onde se déforme petit à petit car la vitesse de propagation augmente avec la profondeur. Comment évolue alors le profil de la vague ?

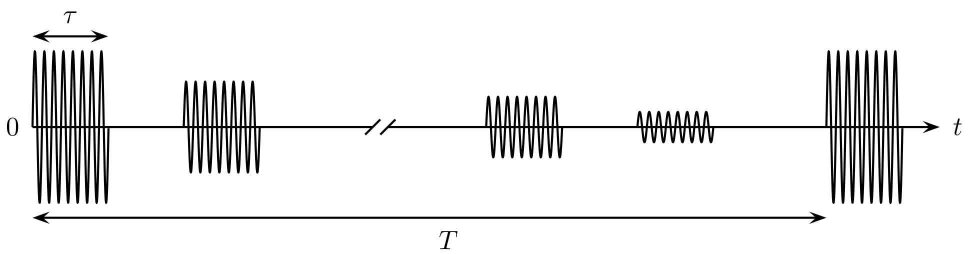
Exercice n° 4 - Mesure de distance et de vitesse par radar

Un radar (mot provenant de l'acronyme anglais pour *Radio Detection and Ranging*) est un appareil utilisant des ondes radio (ondes électromagnétiques de fréquences comprises entre 3 MHz et 110 GHz) pour détecter la présence d'objets mobiles, et pouvant également déterminer leur distance et leur vitesse. On présente ici le principe de ces deux mesures. Le radar comporte une antenne qui émet, avec une période T, des impulsions sinusoïdales, c'est-à-dire des signaux sinusoïdaux de durée limitée τ. Deux de ces impulsions successives sont représentées sur le schéma ci-dessous (attention, il y a une rupture d'échelle due au fait que les durées sont très différentes).



Ces impulsions sont envoyées dans toutes les directions de l'espace. Lorsque l'une d'elles rencontre un objet réfléchissant, elle est renvoyée vers l'antenne, qui devient réceptrice entre deux impulsions (mais elle ne peut pas détecter de signal reçu tant qu'elle émet une impulsion). Cela fait alors apparaître un point lumineux sur un écran, indiquant la direction de la cible, et l'analyse du signal reçu permet d'effectuer les mesures souhaitées.

1. Un radar émet des impulsions de fréquence $\nu = 2,90$ GHz et de durée $\tau = 1,00\ \mu$s, avec une période $T = 100\ \mu$s. L'enregistrement ci-dessous montre deux impulsions émises par le radar, commençant aux instants $t_0 = 0,00\ \mu$s et $t_1 = 100\ \mu$s, et trois échos commençant aux instants $t_A = 3,00\ \mu$s, $t_B = 80,0\ \mu$s et $t_C = 90,0\ \mu$s, issus de la réflexion par différents objets de l'impulsion émise à partir de t_0.



   (a) Calculer la longueur d'onde λ des ondes émises pendant une impulsion, et le nombre N d'oscillations dans chaque impulsion.
   On prendra pour l'air la célérité $c = 3,00.10^8\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$.
   (b) Calculer la distance à laquelle se trouvent les différents objets détectés, en supposant que les ondes se propagent à la même célérité que dans le vide. Comment expliquer la différence d'amplitude entre les impulsions initiales et les échos ?
   (c) Montrer qu'il existe une distance minimale en dessous de laquelle on ne peut pas détecter un objet, et donner sa valeur numérique.

2. Pour déterminer la vitesse d'un objet, une première possibilité consiste à utiliser l'effet Doppler : si par exemple l'objet s'éloigne du radar à une vitesse v, l'onde réfléchie aura une fréquence légèrement inférieure à ν :

$$\nu' = \left(1 - \frac{v}{c}\right)\nu$$

   Déterminer la variation relative de fréquence pour un avion s'éloignant à la vitesse $v = 150\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$, et conclure sur la précision de cette méthode.

3. On peut également comparer des échos successifs reçus du même objet, en mesurant simplement le décalage temporel entre ces échos. Calculer le décalage temporel entre les deux échos successifs reçus de l'avion ci-dessus, et commenter.

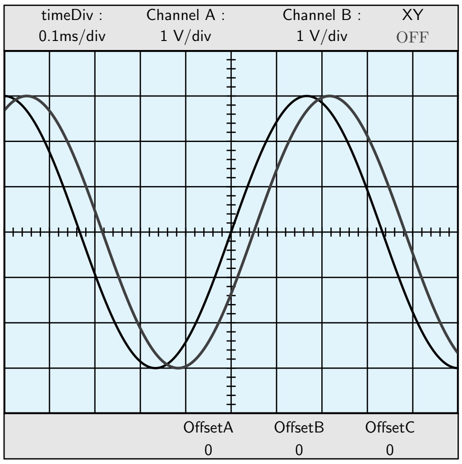
4. Les deux méthodes citées précédemment mesurent uniquement la composante de vitesse longitudinale (selon la ligne de visée). Comment détermine-t-on la composante v_2 de vitesse transversale, et finalement la norme de la vitesse de l'objet ?

5. Citer et présenter un autre dispositif permettant d'effectuer des mesures de distances et de vitesse. Préciser ses avantages et ses inconvénients.

Exercice n° 5 - Mesure de la célérité du son

Un haut-parleur est mis en vibration à l'aide d'un générateur de tension sinusoïdale fournissant une tension $u(t) = U_{\mathrm{m}} cos(2\pi\nu t)$ avec $\nu = 1,5$ kHz. Il émet ainsi une note pure, constituée d'une onde acoustique sinusoïdale de même fréquence, se propageant avec une célérité c.

Un microphone est placé à une distance d du haut-parleur, et convertit le signal sonore reçu en une tension électrique $u'(t)$ en phase avec ce signal sonore. Sur un oscilloscope, on visualise simultanément les deux tensions $u(t)$ et $u'(t)$. On règle l'amplification du microphone et les échelles de l'oscilloscope de manière à avoir la même amplitude pour les deux courbes.

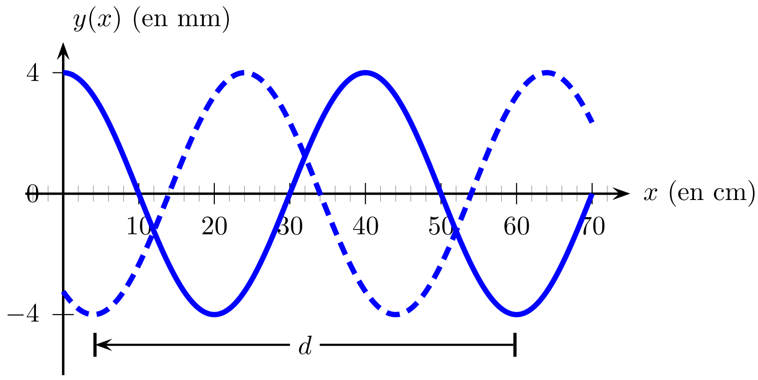


1. Pour une certaine position du microphone, l'écran a l'allure ci-contre. Montrer qu'il est possible de faire coïncider les deux courbes en modifiant la distance d.
2. Représenter dans chaque cas ce qu'on observerait en mode XY.
3. En augmentant progressivement d, on trouve cette coïncidence pour deux valeurs successives d_1 et d_2. En déduire la célérité c du son. Faire l'application numérique pour $d_1 = 35,0$ cm et $d_2 = 57,0$ cm.

Exercice n° 6 - Interférences

Deux ondes sinusoïdales de même amplitude : $A = 9$ mm et de même longueur d'onde se propagent simultanément le long d'une corde tendue selon un axe x. La figure ci-dessous représente l'onde résultante à deux instants différents.

On peut mesurer un déplacement dans le sens des x décroissants de d en un intervalle de temps $\tau = 8,0$ ms.



1. Donner les expressions générales des deux ondes donnant naissance à l'onde résultante.
2. On choisit l'origine des temps de sorte que la phase initiale à l'origine φ_1 de la première de ces deux ondes soit nulle. Déterminer dans ce cas l'expression complète de la seconde onde en précisant :
   (a) son amplitude y_m,
   (b) la valeur de la pulsation spatiale k,
   (c) celle de la pulsation temporelle ω,
   (d) ainsi que sa phase initiale à l'origine φ_2.
3. Représenter le vecteur de Fresnel de chacune des trois ondes évoquées dans l'exercice.

Exercice n° 7 - Ondes stationnaires

Deux ondes se propagent sur une corde de longueur $L = 3,0$ m et produisent une onde stationnaire à trois fuseaux d'amplitude $A = 1$ cm. La célérité des ondes sur la corde est $c = 100$ m.s^{-1}. On considère que l'équation de l'une des deux ondes se met sous la forme $y(t) = y_m \sin(kx + \omega t)$.

Déterminer pour la seconde onde les valeurs de l'amplitude, des pulsations spatiale et temporelle ainsi que le signe devant ω.

Exercice n° 8 - Ondes stationnaires sur une corde de guitare

Une corde de guitare de longueur L est fixée à ses deux extrémités. La corde est considérée comme étant sans épaisseur, inextensible et sans raideur, et on note μ sa masse linéique (masse par unité de longueur). Les frottements ainsi que le poids sont négligés devant la force de tension T, qui est supposée être la même tout au long de la corde.

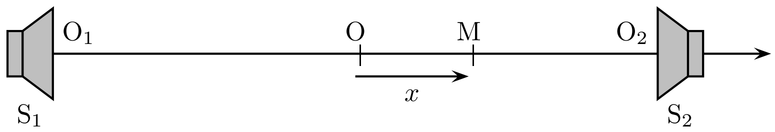
1. La célérité des ondes de déformation sur la corde est $c = \sqrt{T/\mu}$.
   Vérifier les dimensions de cette grandeur par analyse dimensionnelle.
2. Initialement la corde est horizontale et au repos. On l'écarte localement de cette position en la grattant avec un doigt, puis on la laisse évoluer librement. Une onde stationnaire apparaît alors et l'on cherche une expression de la forme $z(x,t) = Z_0 \cos(\omega t + \varphi)\cos(kx + \psi)$, avec $\omega = kc$, pour en rendre compte.
   (a) Monter que ω ne peut prendre qu'une série de valeurs discrètes ω_n, dites pulsations propres, avec n entier positif. Exprimer ω_n en fonction de L, n et c.
   (b) À chaque valeur de n correspond un mode propre de vibration. Le mode $n = 1$ est appelé mode fondamental. Les modes correspondant à n supérieur à 1 sont les harmoniques de rang n. Exprimer l'élongation $z(x,t)$ correspondant à l'harmonique de rang n, en fonction de son amplitude A_n , de la phase à l'origine du cosinus à variation temporelle φ_n, de la pulsation ω_1 du fondamental, ainsi que de x, L, n et t. Quelle est alors la relation entre la longueur L de la corde et la longueur d'onde λ_n dans ce mode ?
   (c) Donner les positions des ventres et des nœuds de vibration dans le mode de rang n. Combien de nœuds et de ventres comporte ce mode de vibration ?
   (d) Donner l'allure des positions extrêmes de la corde dans les modes de vibration correspondant au fondamental et aux deux premiers harmoniques. Donner leur longueur d'onde respective et préciser la position des nœuds et des ventres.
3. Une guitare électrique comporte six cordes en acier. Le tableau ci-dessous fournit pour chaque corde la valeur de sa fréquence fondamentale, lorsque la guitare est accordée, ainsi que son diamètre.

Corde n°	1	2	3	4	5	6
Fréquence du fondamentale (Hz)	82,5	110	147	196	247	330
Diamètre (mm)	1,12	0,89	0,70	0,55	0,35	0,25

   Toutes les cordes ont une longueur $L = 0,63$ m et une masse volumique $\rho = 7,80 \times 10^3$ kg m^{-3}. Déterminer la norme de la tension d'une corde T en fonction de ρ, π, d, L et de la fréquence du mode fondamental. Calculer numériquement les tensions nécessaires pour que la guitare soit accordée. Comparer à la tension usuelle d'un cordage de raquette de tennis, qui est de « 25 kg » (c'est-à-dire égale au poids d'une masse de 25 kg).

Exercice n° 9 - Deux haut-parleurs

Deux haut-parleurs identiques S_1 et S_2, de même axe, orientés l'un vers l'autre, sont alimentés par le même générateur. Ils émettent des vibrations en phase, de même amplitude. Les ondes acoustiques ainsi engendrées se propagent dans l'air à la célérité $c = 330 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.



Au point O, milieu de $[O_1O_2]$, chacune des vibrations crée des variations de pression de l'air identiques $p_{1,\text{O}} = p_{2,\text{O}} = P_\text{m} \cos(2\pi\nu t)$ avec $\nu = 25$ kHz .

1. À quel domaine d'ondes acoustiques correspond cette fréquence ?
2. Exprimer en un point M quelconque de l'axe O_1O_2, d'abscisse x, la variation de pression due à la superposition des ondes progressives émises par S_1 et S_2. On fera apparaître une pulsation spatiale k, dont on calculera la valeur numérique.
3. Donner les positions des quatre nœuds de variation de pression les plus proches de O.

Exercice n° 10 - Résonance

On considère le dispositif de la corde de Melde dans lequel la corde est tendue grâce à un poids de masse m entre les points P et Q, Q marquant le point fixe de la corde au niveau de la poulie. L'amplitude de l'onde au niveau de P est suffisamment faible pour pouvoir être négligée et pouvoir considéré que P est un noeud. On prendra les valeurs $L = 1,20$ m pour la longueur de la corde et $\nu = 120$ Hz pour la fréquence de l'excitateur, supposée fixe.

1. Faire un schéma complet, soigneux et précis du montage en question.
2. On supposera dans cette question que la masse linéique de la corde vaut $\mu = 1,60$ g.m^{-1}.
   (a) Quelle masse permet d'exciter dans ces conditions la quatrième harmonique sur la corde ?
   (b) Un mode propre peut-il être excité si $m = 1,00$ kg ?
3. On suppose maintenant que μ est inconnue mais qu'une onde stationnaire apparait pour $m = 286,1$ g et $m = 447,0$ g et pour aucune autre valeur comprise dans cet intervalle. Déterminer la valeur de μ ?

Exercice n° 11 - Déphasage

Deux signaux acoustiques synchrones (de même fréquence) sont enregistrés au moyen d'un microphone. Les signaux électriques obtenus sont visualisés sur un oscilloscope en mode "XY". Dans ce mode, on représente le signal électrique de la voie 2 en fonction du signal électrique reçu par la voie 1 de l'oscilloscope.

Les deux signaux étant supposés sinusoïdaux, déterminer l'amplitude de chacun d'eux ainsi que leur déphasage relatif à l'aide de la courbe ci-contre.