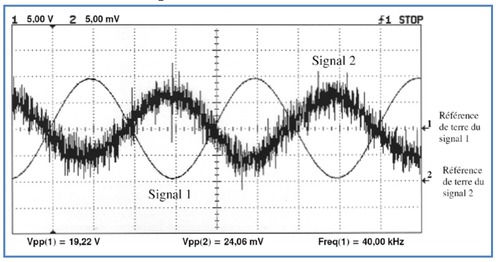
O1 - Télémétrie

Pour réaliser le télémètre, on place un émetteur et un récepteur à ultrasons côte à côte. Ce bloc est appelé le télémètre. A la distance D, on place un obstacle réfléchissant les ondes sonores, que nous appellerons la cible. Une onde sinusoïdale, de période T, est émise par l'émetteur du télémètre, elle se réfléchit sur la cible et est détectée par le récepteur du télémètre. Sur l'écran d'un oscilloscope, on visualise simultanément deux signaux ; celui capté (par un dispositif non décrit) en sortie de l'émetteur et celui du récepteur.

1°) On appelle temps de vol, noté t_v, la durée du trajet aller-retour de l'onde entre le télémètre et la cible. Exprimer t_v en fonction de la distance D séparant le télémètre de la cible et de la célérité c de l'onde.

2°) Pour illustrer le principe de la mesure, on colle la cible au télémètre, puis on l'éloigne lentement, en comptant le nombre de coïncidences, c'est-à-dire le nombre de fois où les signaux sont en phase. Pour simplifier, on suppose que lorsque D=0, les signaux sont en phase. On se place dans le cas où l'on a compté exactement un nombre n de coïncidences. Exprimer D en fonction de n et de la longueur d'onde des ondes ultrasonores.



3°) Lors du recul de la cible, 50 coïncidences ont été comptées avant d'observer les signaux suivants sur l'écran de l'oscilloscope (voir figure). Dans les conditions de l'expérience, la longueur d'onde des ondes sonores valait 8,5 mm. En exploitant les données de l'enregistrement, calculer la distance séparant le télémètre de la cible.

4°) Pourquoi les deux signaux de la figure sont-ils si différents ? Identifier quel est, selon toute vraisemblance, le signal capté en sortie de l'émetteur et celui reçu par le récepteur.

5°) Le comptage des coïncidences a été réalisé en plaçant l'oscilloscope en mode XY. Dans le cas des signaux de la figure, représenter la figure que l'on obtiendrait en se plaçant dans ce mode.

O2 - Effet Doppler

Une onde sinusoïdale de fréquence f se propage dans la direction de (Ox) dans le sens positif de (Ox) avec la célérité c. Un observateur se déplace avec une vitesse $\vec{v} = v\overrightarrow{u_x}$ parallèle à (Ox).

1°) Écrire le signal $s(x,t)$ de l'onde en définissant les notations nécessaires.

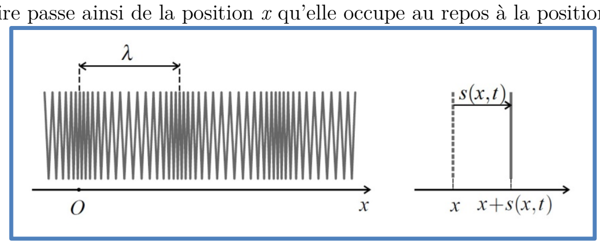
2°) Pour l'observateur en mouvement, le point d'abscisse x est repéré par une abscisse le long d'un axe (Ox') qui lui est lié, telle que $x' = x - vt$. Exprimer $s(x',t)$.

3°) En déduire l'expression de la fréquence f' pour l'observateur en mouvement. Comparer f' et f suivant le signe de v.

4°) Vous marchez dans la rue et un camion de pompier, sirène en marche, arrive de derrière et vous dépasse. Qu'entendez-vous ?

O3 - Onde longitudinale sur un ressort

L'onde de compression-dilatation le long d'un ressort est une onde longitudinale analogue à une onde sonore. Lors du passage de cette onde chaque spire bouge dans la direction de l'axe (Ox), axe parallèle au ressort. Un signal associé à l'onde est le déplacement $s(x,t)$ de la spire qui est située à l'abscisse x en l'absence d'onde : cette spire passe ainsi de la position x qu'elle occupe au repos à la position $x + s(x,t)$ (voir figure).



On appelle a l'espacement entre deux spires consécutives dans l'état de repos. Lors du passage de l'onde, la distance entre les spires situées au repos en $x_i = ia$ et $x_{i+1} = (i+1)a$ devient d_i.

1°) Exprimer d_i en fonction de $a, s(x_i,t)$ et $s(x_{i+1}t)$.

2°) On suppose que $s(x,t) = A\cos(\omega t - kx + \varphi)$. On pose $\Phi = \omega t + \varphi$. En utilisant une formule de trigonométrie, montrer que :

$$d_i = a + 2A\sin\left(\frac{ka}{2}\right)\sin\left(\Phi - \mathrm{kx_i} - \frac{\mathrm{ka}}{2}\right)$$

3°) On suppose que $ka \ll 1$. Cette hypothèse correspond-elle bien à la figure ci-dessus ? Montrer que, lors du passage de l'onde, la distance entre deux spires consécutives situées au repos au voisinage de x devient :

$$d(x,t) \sim a\big(1 + kA\sin(\omega t - kx + \varphi)\big)$$

4°) La figure donne l'allure du ressort à $t = 0$. En déduire où se trouvent, sur la figure, les spires dont le déplacement est nul ?

O4 - Séisme

Un séisme produit deux types d'ondes sismiques : les ondes P, longitudinales, qui se propagent avec la célérité c_P et les ondes S, transversales, qui se propagent avec la célérité $c_S < c_P$.

1°) Lors d'un séisme, on commence à détecter les premières à l'instant de date t_P et les secondes à l'instant de date t_S. Montrer qu'on peut en déduire, connaissant c_P et c_S, la distance entre le foyer du séisme et l'appareil ainsi que la date du début du séisme.

2°) Pour un séisme, on mesure les distances $\Delta 1, \Delta 2$ et $\Delta 3$ entre le foyer du séisme et trois stations de mesures. Sans faire de calcul, montrer que cette information permet de localiser le foyer du séisme à l'intérieur de la Terre. Quel système fonctionne sur ce même principe ?

O5 - Trains d'ondes

Une onde se propage dans la direction de l'axe (Ox), dans le sens positif avec la célérité c. La source, située en $x = 0$, émet un train d'ondes, c'est-à-dire une oscillation de durée limitée :

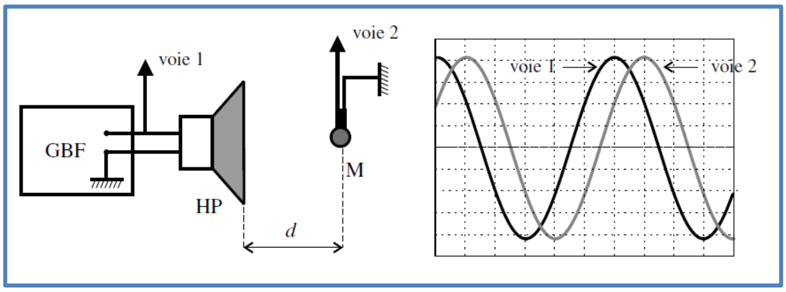
$$s(0,t) = \begin{cases} 0 \; si \; t < 0 \\ sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \; si \; 0 \leq t < \tau \\ 0 \; si \; t \geq \tau \end{cases}$$

1°) Exprimer $s(x,t)$ pour x positif quelconque.
2°) Représenter $s(x,\frac{\tau}{2})$ et $s(x,\frac{3\tau}{2})$ en fonction de x pour x>0 (prendre $\tau = 4T$ pour le dessin). Quelle est la longueur du train d'ondes dans l'espace ?
3°) On suppose à présent que :

$$s(0,t) = \begin{cases} 0 \; si \; t < 0 \\ e^{-t/\tau} sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \; si \; t \geq 0 \end{cases} avec \; \tau = T$$

En s'aidant d'une calculette graphique représenter $s(0,t)$ en fonction de t, puis $s(x,6\tau)$ en fonction de x. On considère habituellement que ce train d'ondes dure 6τ. Justifier et donner la longueur du train d'ondes.

O6 - Onde progressive sinusoïdale



Un haut-parleur HP est mis en vibration à l'aide d'un générateur de basses fréquences GBF réglé sur la fréquence $f = 1500 \, Hz$. L'onde sonore ainsi créée se propage dans l'air à la célérité $c = 342 m \cdot s^{-1}$. Un microphone M placé à distance d du haut-parleur reçoit le signal sonore et le transforme en un signal électrique. Les signaux du GBF et du micro sont envoyés respectivement sur les voies 1 et 2 d'un oscilloscope.

1°) Pour une certaine position de M et un réglage adéquat de l'oscilloscope, l'écran a l'aspect représenté sur la figure. Quel est le déphasage des signaux visualisés ?

2°) L'oscilloscope étant synchronisé sur la voie 1, comment évolue la courbe de la voie 2 lorsqu'on éloigne M de HP ?

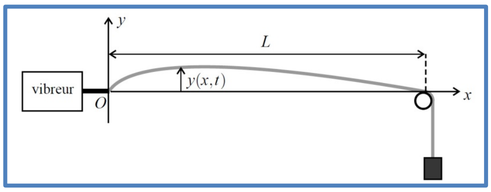
3°) De combien doit-on augmenter d pour voir deux signaux en phase ? Quel est le meilleur moyen pour savoir si les signaux sont en phase ?

O7 - Résonances de la corde de Melde

Une corde de Melde de longueur utile L est tendue entre un vibreur, en $x = 0$, et une poulie, en $x = L$. Le vibreur a un mouvement vertical sinusoïdal de pulsation : $y_{vibreur} = a_{vibreur} \, cos(\omega t)$.
On cherche le déplacement de la corde sous la forme d'une onde stationnaire :

$$y(x,t) = A \, cos(\omega t + \varphi) \, cos(kx + \psi)$$

où $A, \varphi \; et \; \psi$ sont des constantes à déterminer et où k est le vecteur d'onde associé à la pulsation .



1°) En exploitant le fait que la corde est fixe en $x = L$ et liée au vibreur en $x = 0$, obtenir l'expression de $y(x,t)$ en fonction de $a_{vibreur}, \omega, k, L, x \; et \; t$.

2°) La corde étant en résonance avec un seul fuseau, l'amplitude maximale de vibration de la corde est environ égale à $10a$. Quelle relation y a-t-il entre la longueur d'onde λ de l'onde stationnaire et L? On fera l'approximation : $arcsin\left(\frac{1}{10}\right) \sim \frac{1}{10}$.

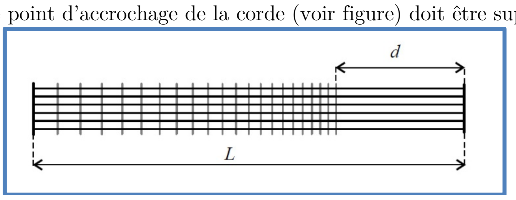
O8 - Frettes d'une guitare

Les frettes placées le long du manche d'une guitare permettent au musicien de modifier la hauteur du son produit par la corde. En pressant la corde contre une frette, il diminue sa longueur, provoquant une augmentation de la fréquence fondamentale de vibration de la corde.

1°) Retrouver rapidement la fréquence de vibration fondamentale d'une corde de longueur L le long de laquelle les ondes se propagent à la célérité c.

2°) La note monte d'un demi-ton lorsque la fréquence est multipliée par $2^{\frac{1}{12}}$.Pour cela, comment doit-on modifier la longueur de la corde ?

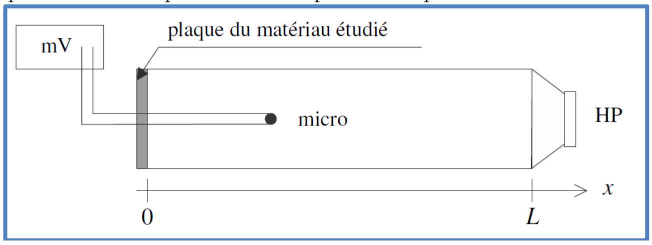
3°) En plaçant le doigt sur les frettes successives on monte à chaque fois la note d'un demi-ton. Combien de frettes peut-il y avoir au maximum, sachant que la distance d entre la dernière frette et le point d'accrochage de la corde (voir figure) doit être supérieure à 0,25L ?



O9 - Tube de Kundt

On considère un tuyau cylindrique, d'axe (Ox) de longueur $L = 1{,}45\ m$, rempli d'air. A l'extrémité $x = L$ est placé un haut-parleur associé à un générateur de basses fréquences qui crée dans le tube une onde progressive se propageant dans le sens négatif de (Ox). A l'autre extrémité $(x = 0)$, l'expérimentateur place une plaque d'un matériau à étudier.

Un microphone mobile, relié à un millivoltmètre, peut se déplacer à l'intérieur du tuyau sans perturber les phénomènes étudiés. Il fournit une tension variable, proportionnelle à la surpression de l'onde sonore à la position du micro. On mesure la valeur efficace V de cette tension à l'aide d'un millivoltmètre numérique. V est ainsi proportionnel à l'amplitude de la surpression au point où se trouve le micro.



1°) Donner l'expression de la surpression $p_{HP}(x,t)$ de l'onde émise par le haut-parleur, en notant A_0 son amplitude, f sa fréquence, c la célérité du son. On prendra la phase initiale de cette onde nulle en $x = 0$.

2°) La plaque de matériau réfléchit cette onde et envoie dans le tube une onde d'amplitude égale à rA_0 avec $0 \leq r \leq 1$ et de phase initiale en $x = 0$ égale à φ. Donner l'expression de la surpression $p_r(x,t)$ de cette onde.

3°) On suppose qu'il n'y a pas d'autre onde que les deux ondes précédentes. Exprimer l'amplitude $A(x)$ de l'onde totale : $p(x,t) = p_{HP}(x,t) + p_r(x,t)$, en fonction de $A_0, r, \varphi, f\ , c\ et\ x$.

4°) On a réalisé des mesures avec une plaque de mousse. Les résultats sont consignés dans le tableau ci-dessous. On a noté les positions pour lesquelles l'indication du voltmètre V est minimale : x_1 est la première à partir de $x = 0$, $x_i\ la\ i^{ème}$. ($V_{min}\ et\ V_{max}$) sont les valeurs minimales et maximales de V).

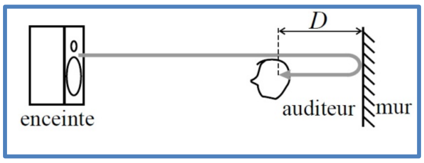
f en Hz	x_1 en cm	x_i en cm	i	$V_{min}\ en\ mV$	$V_{max}\ en\ mV$
460	26,6	101,5	3	1,50	6,80
750	13,2	58,8	3	1,10	5,40
845	10,6	51,1	3	1,25	6,30
1016	8,0	41,7	3	0,80	4,05
1042	7,3	40,1	3	1,60	8,35
1185	5,5	49,0	4	0,80	3,95
1400	3,7	28,1	3	1,00	5,05

a) On pose $\alpha = \frac{V_{max}}{V_{min}}$. Déterminer r en fonction de α.

b) Déterminer l'expression de φ en fonction de x_1 et de la longueur d'onde λ.

c) Calculer pour chaque fréquence les valeurs de r et de φ. Commenter ces résultats.

O10 - Ecoute musicale et interférences



La qualité de l'écoute musicale que l'on obtient avec une chaine hi-fi dépend de la manière dont les enceintes sont disposées par rapport à l'auditeur. On dit qu'il faut absolument éviter la configuration représentée sur la figure : présence d'un mur à distance D, trop courte derrière l'auditeur.

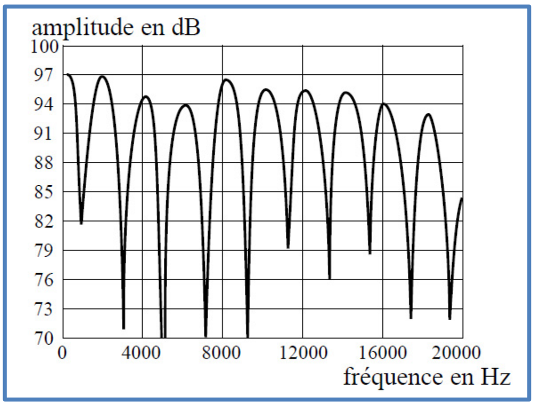
1°) Comme représenté sur la figure, l'onde issue de l'enceinte se réfléchit sur le mur. On note $c = 342\ m \cdot s^{-1}$ la célérité du son dans l'air.

a) Exprimer le décalage temporel qui existe entre les deux ondes arrivant dans l'oreille de l'auditeur : onde arrivant directement et onde réfléchie.

b) En déduire le déphasage de ces deux ondes supposées sinusoïdales de fréquence *f*. La réflexion sur le mur ne s'accompagne d'aucun déphasage pour la surpression acoustique, grandeur à laquelle l'oreille est sensible.

c) Expliquer pourquoi il y a un risque d'atténuation de l'amplitude de l'onde pour certaines fréquences. Exprimer ces fréquences en fonction d'un entier *n*. Quelle condition devrait vérifier *D* pour qu'aucune de ces fréquences ne soit dans le domaine audible ? Est-elle réalisable ?

d) Expliquer



2°) La figure ci-contre donne le résultat d'une expérience dans laquelle on a placé un micro, sensible à la surpression, à une certaine distance *D* du mur, puis envoyé un signal de fréquence variable et d'amplitude constante A_0. La courbe, d'allure très caractéristique, est appelée « courbe en peigne ». L'amplitude en décibels se définit par la relation : $A_{dB} = 20Log\left(\frac{A}{A_{ref}}\right)$ où A_{ref} est une amplitude de référence.

a) Lorsqu'il y a superposition de deux ondes de même amplitude A_0, quelle est, en décibels, l'augmentation maximale de l'amplitude ? Que peut-on dire de $A_{0,dB}$ au vu de la courbe ?

b) Calculer numériquement la distance *D*.

O11 - Accord d'un piano

1°) La célérité c des ondes transversales le long d'une corde sans raideur est déterminée par les paramètres physiques suivants : la masse volumique du matériau de la corde , le diamètre d de la corde et la tension T à laquelle elle est soumise. On fait l'hypothèse d'une formule du type :

$c = K\rho^{\alpha} d^{\beta} T^{\gamma}$ où K, α, β et γ sont des constantes. Déterminer α, β et γ.

2°) La corde d'un piano n'est pas sans raideur mais on admet que la célérité est bien proportionnelle à $\sqrt{T}$. Les notes les plus aiguës d'un piano sont produites par trois cordes qui doivent vibrer exactement à la même fréquence. On réalise ce réglage (l'accord du piano) en ajustant la tension des cordes. Pour cela, on utilise le phénomène de battements.

a) La fréquence fondamentale de vibration de la corde varie comme T^{δ} . Quel est l'exposant δ ?

b) On considère deux cordes vibrant à la fréquence 440 Hz. On entend les battements à l'oreille s'ils ont une période comprise entre 0,5 s et 5 s. Avec quelle précision relative obtient-on l'égalité des fréquences de vibration de deux cordes par cette méthode ?

c) En déduire la précision relative sur la tension de la corde.

O12 - Anharmonicité d'une corde de piano

On s'intéresse aux modes propres d'une corde de piano de longueur L, fixée en ses deux extrémités. La relation entre le vecteur d'onde et la pulsation d'une onde se propageant le long de cette corde est : $\omega = ck\sqrt{1+\alpha k^2}$ où c et dépendent de la section de la corde et de sa tension mais pas de sa longueur. Le coefficient α est dû à la raideur de la corde (il serait nul pour une corde parfaitement souple comme la corde de Melde).

1°) Quelles sont les unités de c et α ?

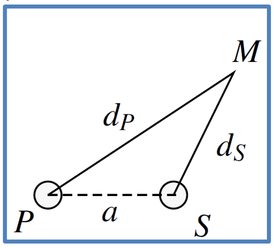
2°) Quelles sont les valeurs possibles de k pour une onde stationnaire existant sur cette corde ? Exprimer les fréquences correspondantes en fonction de c, α, L et d'un entier n.

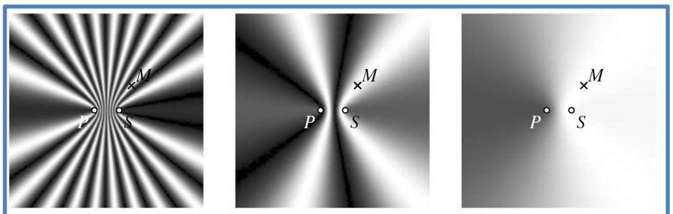
3°) Les cordes d'un piano de concert sont plus longues que les cordes d'un piano de salon. Pourquoi cela améliore-t-il qualité musicale du son?

O13 – Contrôle actif du bruit

La méthode du contrôle actif du bruit consiste à émettre une onde sonore qui, superposée à l'onde sonore du bruit, l'annule par interférence destructrice. Pour modéliser la méthode on suppose que la source primaire de bruit P est ponctuelle et qu'elle émet une onde sinusoïdale de longueur d'onde λ. On crée une source sonore secondaire ponctuelle S qui est située à distance $PS = a$ de la source primaire et qui émet une onde de même longueur d'onde.

1. On souhaite annuler le bruit en un point M. On pose $PM = d_P$ et $SM = d_S$.
   a) Exprimer le déphasage $\Delta\varphi_0$ que la source secondaire doit présenter par rapport à la source primaire en fonction de λ, d_P, d_S et d'un entier m.
   b) L'amplitude de l'onde d'une source ponctuelle à distance d de la source est $A = \frac{\alpha}{d}$ où α est une constante. Quel doit être le rapport $\frac{\alpha_S}{\alpha_P}$ des constantes d'amplitude relatives aux deux sources ?





$\lambda = 0,2a$ $\lambda = a$ $\lambda = 5a$

2. Les figures ci-dessus obtenues par simulation visualisent l'amplitude de l'onde résultante dans le plan contenant P, S et M : le gris est d'autant plus foncé que l'amplitude de l'onde sonore est élevée. Commenter ce document, notamment l'influence de la longueur d'onde.

O14 – Fréquences propres d'un tuyau sonore

La colonne d'air contenue dans un instrument à vent (flûte, clarinette...) ou dans un tuyau d'orgue vibre selon des modes propres correspondant à des conditions aux limites données. Dans une modélisation très simple on envisage deux types de conditions :

- Si l'extrémité du tuyau est ouverte, la surpression acoustique est nulle à cette extrémité,
- Si l'extrémité du tuyau est fermée, l'amplitude de variation de la surpression acoustique est maximale à cette extrémité.

1. On considère un tuyau de longueur L dans lequel la célérité des ondes sonores est c.

a) Déterminer les fréquences des modes propres du tuyau lorsque ses deux extrémités sont ouvertes. Représenter schématiquement la surpression dans le tuyau pour le troisième mode, les modes étant classés par fréquence croissante.

b) Même question si l'une des extrémités du tuyau est ouverte et l'autre fermée.

2. *Première application :* Les grandes orgues peuvent produire des notes très graves. Calculer la longueur d'onde d'un son de fréquence 34 Hz, correspondant au Do^0, en prenant la valeur de la célérité du son à 0°C dans l'air soit $c = 331\, m \cdot s^{-1}$. Calculer la longueur minimale d'un tuyau produisant cette note.

3. *Deuxième application :* On peut modéliser très grossièrement une clarinette par un tube fermé au niveau de l'embouchure et ouvert à l'extrémité de l'instrument.

a) Expliquer pourquoi le son produit par une clarinette ne comporte que des harmoniques impairs.

b) L'instrument est muni d'une « clé de douzième » qui ouvre un trou situé à distance $\frac{L}{3}$ de l'embouchure. Lorsque ce trou est ouvert la surpression est nulle en ce point. Quelles sont dans ce cas les longueurs d'ondes des modes propres du tuyau ? Quel est l'effet de l'ouverture du trou sur la fréquence du son émis par l'instrument ?