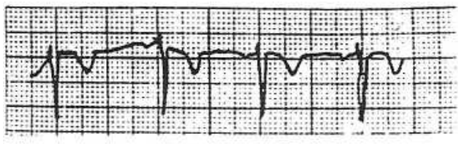
1. 3IMRT Exercices sur les ondes sonores et ultrasonores (corrigé) 2008 - 2009

I. Mesure de la fréquence cardiaque



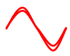
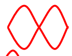
La courbe ci-contre est l'enregistrement d'un électrocardiogramme. Calculer le nombre de pulsations cardiaques par minute sachant que le papier défile à la vitesse v = 25 $mm.s^{-1}$. *(<u>Rép.</u> : 75 pulsations / min)*

La période T des pulsations correspond à la distance d = 20 mm entre deux pics consécutifs : Le papier parcourt la distance d pendant la durée T à la vitesse v donc d = v×T et T = d / v. Le nombre de pulsations par minute est la fréquence cardiaque f = 1/T soit : $\boxed{f = v / d}$ = 25 / 20 = <u>1,25 pulsations / s</u> ou bien 1,25 x 60 = <u>75 pulsations / min</u>

II. Propagation d'une vibration

Un vibreur produit à l'une des extrémités d'un ressort une vibration sinusoïdale longitudinale de fréquence 100Hz.

1. Entre deux points consécutifs où la compression des spires est maximale, on mesure une distance de 12 cm.
   a) Que représente cette distance ? **La longueur d'onde λ**
   b) Calculer la période et la célérité de l'onde progressive le long du ressort *(<u>Rép.</u> : 10 ms ; 12 $m.s^{-1}$)*
   T = 1 / 100 = 0,01 s = <u>10 ms</u> ; $\lambda = c.T$; $\boxed{c = \lambda / T = \lambda \times f}$ = 12 × 100 = 1200 $cm.s^{-1}$ = <u>12 $m.s^{-1}$</u>

2. On considère trois points du ressort situés à 24cm, 18cm et 15cm de l'extrémité du vibreur. Comparer les états vibratoires de ces points à l'état vibratoire de l'extrémité du ressort. *(<u>Rép.</u> : en phase, en opposition, en quadrature)*
   On calcule le rapport $\frac{\text{distance point-vibreur}}{\lambda}$ **:**
   24 / 12 = 2 : la distance vaut 2λ donc le point et le vibreur sont en phase 
   18 / 12 = 1,5 : la distance vaut $\lambda + \lambda/2$ donc le point et le vibreur sont en opposition de phase 
   15 / 12 = 1,25 : la distance vaut $\lambda + \lambda/4$ donc le point et le vibreur sont en quadrature 

III. Profondeur d'un fond marin

Un sonar utilise un émetteur-récepteur de fréquence 40kHz. Dans l'eau de mer, il envoie des impulsions sonores très brèves toutes les 20ms. La vitesse des ultrasons dans l'eau de mer est égale à 1500$m.s^{-1}$.

1. Calculer la profondeur maximale de l'obstacle si l'on veut que le premier écho soit perçu avant l'émission de la seconde impulsion. *(<u>Rép.</u> : 15 m)*
   Le premier écho doit être perçu au plus tard à t = 20 ms. Il est produit par la première impulsion qui a parcouru avec la célérité c, la distance d_{max} jusqu'à l'obstacle puis la même distance d_{max} après réflexion sur l'obstacle, soit : $2d_{max} = c \times t$; $\boxed{d_{max} = c \times t / 2}$ = 1500 x 20. 10^{-3} / 2 = <u>15 m</u>

2. Le sonar détecte un écho 0,53 s après l'envoi d'une impulsion. À quelle distance se trouve l'obstacle ? *(<u>Rép.</u> : 398 m)*
   d = c × t / 2 = 1500 x 0,53 / 2 = <u>398 m</u>

3. Quel phénomène limite la profondeur maximale de détection ? **L'absorption des ondes sonores par le milieu.**

IV. Célérité d'une onde sonore

On dispose d'un générateur basse fréquence délivrant une tension sinusoïdale $u_1 = U_m \cos(2\pi.f.t + \varphi)$ *de fréquence* f = 25 kHz et d'un oscillographe bicourbe utilisé en mode « balayage ». La tension u_1, appliquée sur la voie 1, donne l' oscillogramme de la figure 1.

1. a) La sensibilité de la voie 1 est de 2 $V.div^{-1}$; calculer l'amplitude et la valeur efficace de la tension u_1 *(<u>Rép.</u> :5V; 3,5V)*
   U_{1M} = 2,5 div x 2$V.div^{-1}$ = 5 V ; $U_1 = U_{1M} / \sqrt{2}$ = <u>3,5 V</u>

   b) L'origine des temps coïncide avec le passage du spot au centre de l'écran ; exprimer la tension $u_1(t)$
   $u_1(t) = - U_{1M} \sin(2\pi.f.t)$

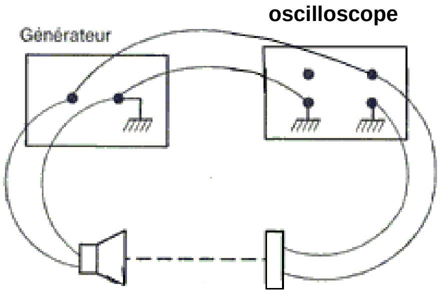
2. Le générateur est relié à un haut-parleur qui émet des ondes ultrasonores de fréquence f = 25 kHz.
On étudie ces ondes sur l'axe du haut-parleur à l'aide d'un capteur C qui transforme les vibrations reçues en une tension u_2 de même fréquence et de même phase que les vibrations. Cette tension u_2 est appliquée sur la voie 2 de l'oscillographe. Pour une position C_1 du capteur les courbes observées sont confondues et reproduites sur la figure 1.
   a) On éloigne alors progressivement le capteur du haut-parleur. Comment est modifiée la courbe représentant $u_2(t)$, celle représentant $u_1(t)$ restant fixe ?
   $u_2(t)$ se déplace vers la droite de l'écran lorsqu'on éloigne le capteur du haut-parleur car les vibrations enregistrées par le capteur vont être en retard de phase par rapport à celles du haut-parleur.

b) On continue d'éloigner le capteur jusqu'à ce que l'on obtienne à nouveau, à la position C_2, les courbes représentées sur la figure 2. La distance C_1C_2 mesure 1,4 cm.

- Pourquoi les courbes ont-elles des amplitudes différentes ? **Absorption des ondes sonores par le milieu**
- Déterminer la célérité des vibrations ultrasonores de la source dans l'air. *(<u>Rép.</u> : 350 m.s^{-1})*

La figure 2 montre que la vibration enregistrée par le capteur à la position C_2 est en phase (pour la 1ère fois) avec celle enregistrée à la position C_1 donc $C_2C_1 = \lambda = c \times T = c / f$; $\boxed{c = C_2C_1 \times f}$

$c = 1{,}4.\ 10^{-2} \times 25.\ 10^{3} = \underline{350\ m.s^{-1}}$



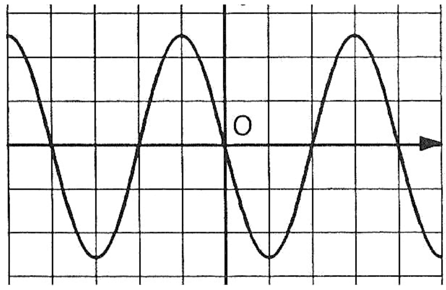


figure 1

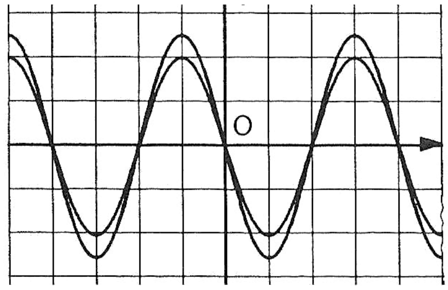
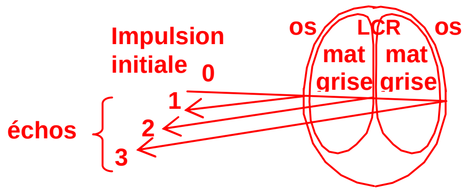


figure 2

V. <u>Échogramme du cerveau</u>

Une sonde branchée sur un générateur haute fréquence (GHF) émet des impulsions ultrasonores et reçoit les échos renvoyés par les surfaces de séparation des différents milieux. Ces échos sont analysés sur l'écran d'un oscilloscope.

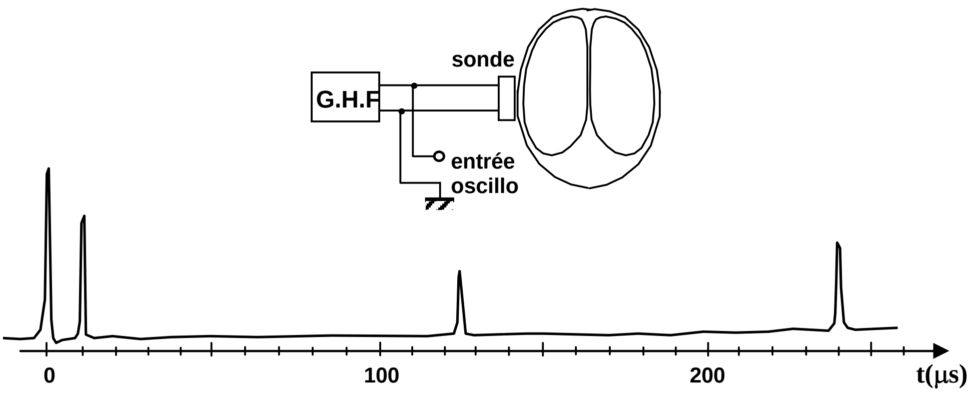
1. Déterminer l'origine des différents échos *(:0 :impuls. Initiale ; 1:os / mat. grise ; 2:mat. grise / LCR ; 3:mat. grise /os)*
   Impulsion émise à t= 0 ; 1er écho reçu à t_1 du à la réflexion os/matière grise ; 2ème écho reçu à t_2 du à la réflexion matière grise/LCR (à la sortie du premier hémisphère); 3ème écho reçu à t_3 du à la réflexion matière grise /os (à la sortie du deuxième hémisphère)



(LCR : liquide céphalo rachidien)

2. les hémisphères cérébraux sont-ils symétriques ? (oui car intervalle de 115 μs entre échos 1-2 et 2-3)
   Les intervalles de temps $t_2 - t_1$ et $t_3 - t_2$ sont les durées « d'aller et retour » de l'onde dans chaque hémisphère.
   $t_2 - t_1 = 125 - 10 = 115\ \mu s$ et $t_3 - t_2 = 240 - 125 = 115\ \mu s$; ces intervalles étant égaux, l'onde parcourt la même distance dans les deux hémisphères qui sont donc symétriques.

3. Trouver l'ordre de grandeur de leur dimension transversale sachant que la vitesse des ultrasons dans le milieu remplissant la cavité crânienne est environ 1540 m.s^{-1}. *(<u>Rép.</u> : 8,8 cm)*
   les hémisphères ont une largeur d parcourue deux fois par l'onde dans la durée $\Delta t = t_2 - t_1 = t_3 - t_2$
   donc : $2d = c \times \Delta t$; $\boxed{d = c \times \Delta t / 2}$ $= 1540 \times 115.\ 10^{-6} / 2 = 0{,}088 m = \underline{8{,}8\ cm}$



VI. Niveau sonore *** question 1.b) et 2) modifiées (erreurs dans la feuille distribuée) ***

1. On considère deux sons d'égales intensités $I = 10^{-6}$ W.cm^{-2} et de fréquences $f_1 = 2000$ Hz, $f_2 = 6000$ Hz.
   a) Pour un sujet normal écoutant successivement ces deux sons, le niveau sonore sera-t-il le même ?
   (Rép : non, le niveau sonore varie avec la fréquence ; voir le spectre sonore)

   b) Deux sons identiques d'intensité $I = 10^{-6}$ W.cm^{-2} et de fréquence 1000 Hz sont émis simultanément. Quel est le niveau sonore en décibels du son résultant ?
   Les puissances sonores s'ajoutent pas les niveaux sonores ! Le son résultant a l'intensité $I' = 2.I = 2.\ 10^{-6}$ W.cm^{-2} = $2.\ 10^{-2}$ W.m^{-2} et le niveau sonore $L' = 10 \times \log(I'/I_0)$
   $L' = 10 \times \log(2.\ 10^{-2} / 10^{-12}) = 10 \times \log(2.\ 10^{10})$ = 103 dB

2. On superpose trois sons de 20 décibels chacun et de fréquence 1000 Hz. Quel est le niveau sonore du son résultant ?
   Pour chaque son : $L = 10.\log(I / I_0)$; $L/10 = \log(I / I_0)$ donc $I / I_0 = 10^{L/10}$; $I = I_0 \times 10^{L/10} = I_0 \times 10^{20/10}$
   soit : $I = 100.I_0$; le son résultant a l'intensité $I' = 3.I = 300.I_0$ et le niveau sonore $L' = 10.\log(I'/I_0)$
   soit : $L' = 10.\log(300)$ = 24,8 dB ; *(Les niveaux sonores ne s'additionnent pas : 3L' = 60 dB)*

VII. Impédance acoustique

On donne les impédances acoustiques :

air : $Z_1 = 0{,}04.\ 10^3$ g.cm^{-2}.s^{-1} ; os compact : $Z_2 = 6{,}10.\ 10^5$ g.cm^{-2}.s^{-1} ; os spongieux : $Z_3 = 2{,}55.\ 10^5$ g.cm^{-2}.s^{-1}

Calculer les coefficients de transmission T et de réflexion R pour une onde ultrasonore passant, de l'air à l'os compact puis de l'os compact à l'os spongieux en incidence normale. Conclure. *(Rép : $T \approx 0$ et $R \approx 1$; $T = 0{,}832$ et $R = 0{,}168$)*

calculs utilisant les formules : $R = \left(\dfrac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}\right)^2$ et $T = 1 - R$; Les ultrasons sont donc presque totalement réfléchis dans le 1er cas partiellement réfléchis dans le 2ème cas

VIII. Vélocimétrie sanguine par effet Doppler

Pour déterminer la vitesse V d'écoulement du sang dans une artère, on utilise une sonde doppler inclinée de 40° par rapport à la peau et émettant des ultrasons de fréquence 5 MHz. Une variation de fréquence Δf =1470 Hz est mesurée.

1. Calculer la vitesse V sachant que la célérité C des ultrasons dans le sang est de 1540 m.s^{-1}.
   (Rép : $V = \dfrac{c \times \Delta f}{2 \times f \times \cos\theta} = 29{,}5$ cm.s^{-1})
2. Calculer l'angle d'inclinaison de la sonde donnant une variation de fréquence Δf = 950 Hz.
   $\cos\theta = \dfrac{c \times \Delta f}{2 \times f \times v} = \dfrac{1540 \times 950}{2 \times 5.10^6 \times 0{,}295} = 0{,}496$; $\theta = 60°$
3. L'incertitude sur la mesure de la variation de fréquence est estimée à 20 Hz. Calculer l'incertitude relative (en %) sur la mesure de la vitesse pour les deux angles d'inclinaison de la sonde. Conclure
   (Rép : $\theta = 40°$: $\dfrac{\Delta v}{v} = \dfrac{\Delta(\Delta f)}{\Delta f} = \dfrac{20}{1470} = 1{,}4$ % ; $\theta = 60°$: $\dfrac{\Delta v}{v} = 2$ %)