

TP : Ultrasons et effet Doppler

Ce TP a pour but d'étudier le comportement d'un émetteur piézoélectrique puis d'utiliser un émetteur et un récepteur du même type afin de déterminer la vitesse d'une voiture télécommandée. La détermination de la vitesse de la voiture est basée sur l'effet Doppler. Nous montrerons dans la partie théorique que la fréquence des ondes ultrasonores réfléchies par la voiture vers le récepteur dépend de la vitesse de la voiture. La mesure de la fréquence permet donc de réaliser un radar de vitesse.

Un cristal est dit piézoélectrique si lorsqu'il est soumis à une tension électrique, il subit une déformation. Cette déformation est à l'origine de la formation des ondes ultrasonores car comme nous allons le constater les fréquences de fonctionnement sortent du domaine audible [20 Hz; 20 kHz]. En soumettant un cristal piézoélectrique à une tension électrique variable, on réalise l'émetteur.

Le même cristal piézoélectrique soumis à une contrainte mécanique (pression) va voir apparaître sur deux de ses faces une tension électrique. La mesure de cette tension électrique permet d'enregistrer l'onde ultrasonore. On a alors un récepteur. Émetteur et récepteur sont identiques mais utilisés de façon contraire.

A. Comportement de l'émetteur ultrasonore en fréquence

1. Filtre passe-bande

Rappeler la forme canonique du gain H d'un filtre passe-bande de fréquence centrale f_0 et de facteur de qualité Q et de gain H_0 à la fréquence centrale. Donner l'allure - en échelle linéaire - de la fonction $H(f)$. Montrer que le facteur de qualité Q peut se déterminer selon $Q = \frac{f_0}{\Delta f}$ où Δf est l'intervalle de fréquence pour lequel

$$H(f) \geq \frac{H_0}{\sqrt{2}}.$$

On rappelle qu'un signal rectangulaire ainsi qu'un signal triangulaire de fréquence f_{rt} comportent les harmoniques de rang impair du type $(2n+1)f_{rt}$ pour tout n entier. Le filtre précédent est supposé posséder un facteur de qualité Q assez élevé. On envoie dans ce filtre un signal rectangulaire ou bien un signal triangulaire de fréquence f_{rt} . A quelle condition portant sur f_{rt} obtient-on en sortie un signal sinusoïdal? Préciser la fréquence du signal sinusoïdal de sortie.

2. Expérience

Réaliser le montage de la figure 1. On utilisera le générateur basse fréquence HP 33120A en régime sinusoïdal avec une tension crête à crête de 10 V. L'oscilloscope numérique utilisé permettra de faire les mesures de tension. La valeur de la fréquence sera lue directement sur l'afficheur du GBF.

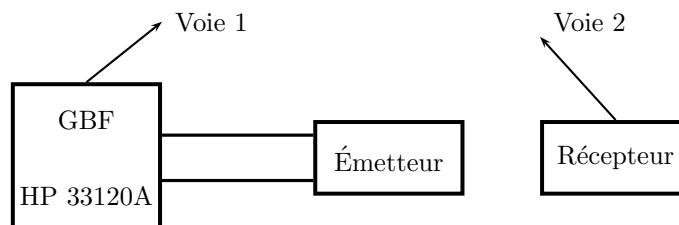


FIG. 1 – Comportement en fréquence

Le récepteur est placé en butée au plus près de l'émetteur et directement en face (angle sur le dispositif orientable $\theta = 0^\circ$). L'oscilloscope permettra de mesurer la tension crête à crête V_{pp} enregistrée sur la voie 2. Pour des fréquences comprises entre 35 kHz et 45 kHz, mesurer V_{pp} sur la voie 2 en fonction de la fréquence.

3. Exploitation

Tracer le graphique donnant cette tension en fonction de la fréquence. En déduire la valeur de la fréquence centrale f_0 et la valeur de l'intervalle Δf . Déterminer la valeur du facteur de qualité Q du cristal piézoélectrique utilisé ici. Commenter.

4. Comportement du cristal piézoélectrique en tant que filtre

Le générateur basse fréquence HP 33120A est réglé sur la fréquence f_0 mesurée précédemment. Commuter pour que la forme du signal envoyée dans l'émetteur soit à cette fréquence rectangulaire puis triangulaire. Observer le signal reçu par le récepteur. Imprimer les oscillogrammes obtenus. Refaire les mêmes opérations en réglant maintenant le GBF d'alimentation sur les fréquences $f_0/3$ puis $f_0/5$. Conclure. On prêter attention à l'émission maintenant perceptible par l'oreille puisqu'on est passé dans le domaine audible...

B. Étude de la directivité du rayonnement du cristal piézoélectrique

On va maintenant grâce au support orientable sur lequel se trouve le récepteur déterminer l'intensité rayonnée en fonction de l'angle θ entre les axes de l'émetteur et du récepteur.

5. Expérience

On alimente maintenant l'émetteur piézoélectrique toujours grâce au GBF en régime sinusoïdal à la fréquence f_0 . On place le récepteur au niveau de la graduation 0 de l'échelle centimétrique de telle sorte que l'on puisse voir le trait repère des angles conformément au schéma de la figure 2. A ce moment-là, on peut vérifier que la distance entre l'émetteur et le récepteur est de 11 cm.

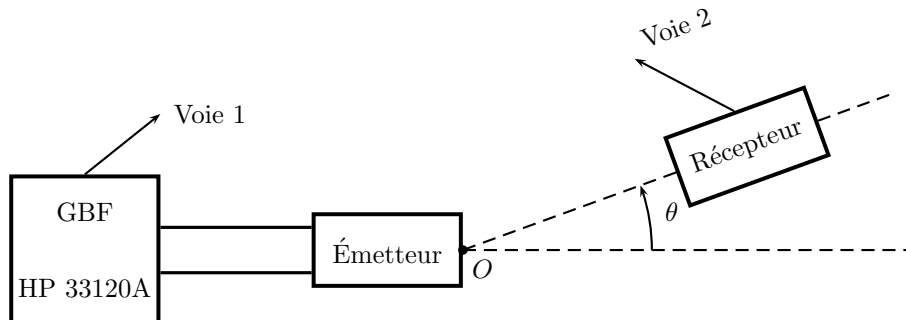


FIG. 2 – Directivité du rayonnement

Enregistrer pour toutes les valeurs de l'angle θ comprises entre 0° et 90° par pas de 5° , la valeur de V_{pp} mesurée sur la voie 2 de l'oscilloscope.

6. Exploitation

L'intensité ultrasonore rayonnée est proportionnelle au carré de l'amplitude de l'onde ultrasonore. Cette amplitude est elle-même proportionnelle à la tension V_{pp} mesurée. Ainsi, on tracera sur la feuille intitulée « Diagramme de Rayonnement » et jointe à l'énoncé du TP, la courbe donnant V_{pp}^2 en fonction de l'angle θ pour toutes les valeurs $-90^\circ \leq \theta \leq +90^\circ$. Commenter quant à la directivité de la source ultrasonore.

C. Radar de vitesse

7. Effet Doppler

On considère un émetteur fixe et un récepteur fixe qui reçoit les ondes ultrasonores réfléchies par la voiture. La vitesse de la voiture est $v \simeq 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Dans les conditions habituelles de pression et de température de la salle la célérité des ondes ultrasonores - qui est aussi celle du son - est $c = \sqrt{\gamma \frac{R}{M_{air}} T} = 343 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Le radar de vitesse est présenté sur le schéma de la figure 3. Les valeurs de a et de x_0 sont de l'ordre de la dizaine de centimètres et on a $\theta_0 = \dots$.

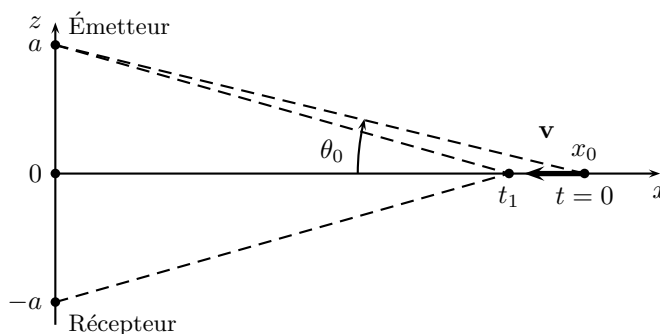


FIG. 3 – Radar de vitesse

A la date $t = 0$, la voiture se situe à l'abscisse x_0 . A cette même date $t = 0$, l'émetteur émet un maximum. Justifier le fait que ce maximum est reçu à une date t_1 par la voiture telle que $ct_1 = \sqrt{a^2 + (x_0 - vt_1)^2}$. La période de l'onde ultrasonore est T_e de l'ordre de $25 \mu\text{s}$ car sa fréquence $f_e = 1/T_e \simeq 40 \text{ kHz}$. On peut ainsi considérer que $vt_1 \ll x_0$ et $vt_1 \ll a$. En effectuant un calcul limité au premier ordre, montrer que t_1 est donné par l'expression : $t_1 = \frac{\sqrt{a^2 + x_0^2}}{c + v \cos \theta_0}$. En déduire que le récepteur capte le signal provenant de la voiture à la date $t_{1r} = 2t_1$.

L'émetteur émet un second maximum à la date T_e . Montrer qu'il est reçu par la voiture à la date t_2 telle que $c(t_2 - T_e) = \sqrt{a^2 + (x_0 - vt_2)^2}$. En déduire par un calcul de même nature que le précédent que $t_2 = \frac{cT_e + \sqrt{a^2 + x_0^2}}{c + v \cos \theta_0}$. Expliquer pourquoi le second maximum est reçu par le récepteur à la date $t_{2r} = 2t_2 - T_e$. En déduire que la période de l'onde ultrasonore mesurée par le récepteur $T_r = t_{2r} - t_{1r}$ est différente de la période de l'onde émise et vérifie $T_r = T_e \frac{c - v \cos \theta_0}{c + v \cos \theta_0}$. Cette formule constitue ce que l'on appelle l'effet Doppler. Montrer

que compte-tenu du fait que $v \ll c$, la fréquence de réception est donnée par :

$$f_r = f_e \left(1 + \frac{2v}{c} \cos \theta_0\right)$$

A partir de cette formule, on peut constater que, dans notre cas, l'écart relatif entre f_r et f_e est de l'ordre de 1%. Ce faible écart relatif va conditionner la mesure que nous allons effectuer pour obtenir la vitesse de la voiture v .

8. Circuit électronique de mesure

La valeur de f_e est connue très précisément grâce au générateur HP 33120A. Par contre, il est difficile de mesurer très précisément la fréquence f_r . Aussi, on va multiplier le signal obtenu sur le récepteur représenté par la tension $u_r(t)$ par le signal de l'émetteur $u_e(t)$ puis utiliser un filtre passe-bas. On va montrer qu'en sortie du dispositif, on obtient un signal de fréquence $f_r - f_e$ dont on va pouvoir évaluer la fréquence avec une bonne précision. Le circuit électronique est représenté sur la figure 4.

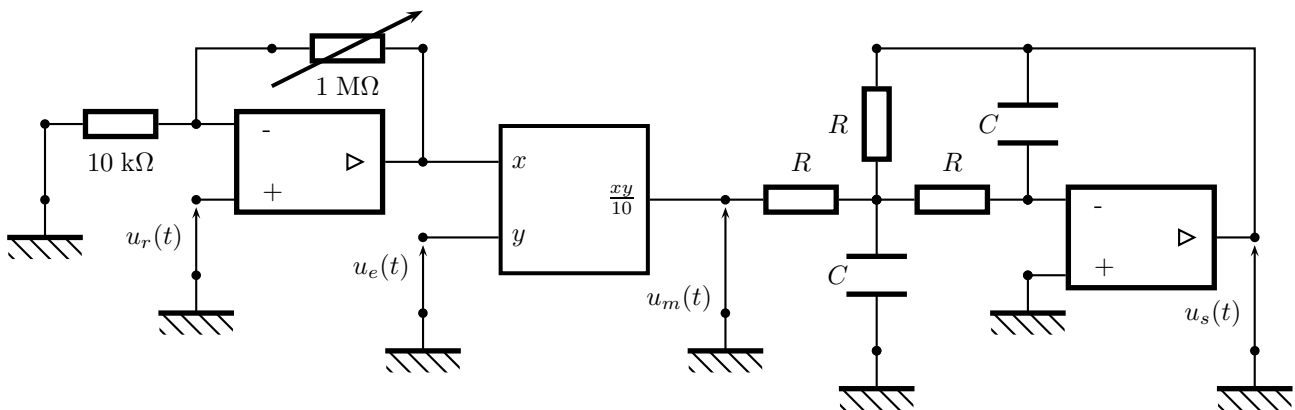


FIG. 4 – Circuit électronique de mesure

Quelle est la fonction du premier amplificateur opérationnel dans le montage de la figure 4 ? Indiquer quelle est la forme de la tension $u_m(t)$, on précisera en particulier les fréquences qui y sont présentes. Montrer que le filtre constitué par le second amplificateur opérationnel est un filtre passe-bas à -40 dB par décade de fréquence de coupure $f_c = \frac{0,374}{2\pi RC}$. On précise que $0,374 \simeq \sqrt{\frac{53-7}{2}}$. Sachant que, dans le cas de notre montage, la fréquence de coupure est inférieure à 1 kHz, donner la forme de la tension $u_s(t)$ qu'on enregistre sur l'oscilloscope.

9. Mesure de la vitesse

L'expérience consiste à faire passer la voiture au milieu du pont construit à cet effet et d'enregistrer le signal de sortie du boîtier électronique comportant le montage de la figure 4 sur l'oscilloscope. Pour cela, il faudra utiliser la fonction « SINGLE » du déclenchement de l'oscilloscope. Il faudra sans doute faire plusieurs tentatives afin d'obtenir un enregistrement de qualité en particulier en faisant évoluer le réglage de la base de temps et celui du niveau de déclenchement.

Mesurer précisément la fréquence de la tension de sortie du dispositif et en déduire la vitesse de la voiture à l'aide de :

$$v = \frac{c}{2 \cos \theta_0} \frac{f_r - f_e}{f_e}$$

Conclure en évaluant la précision de la mesure sachant que l'angle est $\theta_0 = 45^\circ$.