

Effet Doppler : Mesure de la vitesse d'un train

1 Présentation de l'expérience

L'effet Doppler-Fizeau, du nom des physiciens autrichiens Christian Doppler et français Hippolyte Fizeau correspond à la modification de la fréquence d'une onde lorsque sa source ou sa réception est en mouvement. Par exemple, vous entendez le son aigu de la sirène des pompiers lorsqu'elle se rapproche de vous; puis le son devient grave lorsque le camion vous a dépassé. Plus généralement, la fréquence d'une onde est modifiée quand elle est reçue par un récepteur en mouvement relatif par rapport à la source ou quand elle est émise par une source en mouvement par rapport à un récepteur fixe. Ce phénomène est utilisé dans de nombreuses applications de la vie courante (les radars routiers, en médecine, en astrophysique,...)

Notions abordées:

- Savoir utiliser les fonctions simples d'un oscilloscope
- Savoir mesurer la période et la fréquence d'une onde
- Obtenir la vitesse d'un véhicule à partir de l'effet Doppler

Matériel à disposition :

- Un train miniature sur des rails
- Un émetteur et un récepteur d'ondes ultrasonores
- Un générateur de signaux sinusoïdaux
- Un boîtier électronique permettant de régler la vitesse du train et son sens de déplacement (avance/recule) et permettant d'amplifier le signal reçu.
- Un chronomètre
- Un oscilloscope

Le rapport d'expérience doit comporter :

- Une brève introduction exposant les objectifs du TP
- Les réponses aux questions posées, ordonnées et référencées
- Des tableaux regroupant les mesures et les résultats
- Les calculs d'incertitude de mesure
- Une conclusion générale résumant les résultats obtenus lors de ce TP

Au cours de ce TP, nous chercherons à mesurer la vitesse d'une locomotive à l'aide de l'effet Doppler. La source, placée sur le toit de la locomotive émet des ondes ultrasonores (voir Fig. 8). Un récepteur immobile est placé au bout des rails.



Figure 8 : Photo du montage et des différents appareils utilisés

2 Caractérisation de l'onde ultra-sonore

Dans cette partie, nous cherchons à utiliser les fréquences des ondes émises et reçues pour déterminer la vitesse du train. Vous devrez obtenir sur l'oscilloscope un écran similaire à la Figure 9. Les fonctions de l'oscilloscope dont vous aurez besoin sont indiquées en annexe 2.

➤ Régler le générateur sur un signal sinusoïdal de fréquence 40kHz et afficher ce signal sur la voie 1 de l'oscilloscope. Afficher le signal reçu sur la voie 2. Utiliser la fonction **Autoscale** de l'oscilloscope pour afficher le signal sur l'oscilloscope (voir annexe 2-A). Recentrer les signaux en utilisant les boutons de commandes verticales 1 et 2.

➤ **A partir de la mesure d'une période,** Vérifier la valeur de la fréquence affichée sur l'écran l'oscilloscope (partie inférieure). Si la mesure automatique de la fréquence ne s'affiche pas en bas de l'écran, suivre la démarche de l'annexe 2-6.2.

➤ On cherche à mesurer une fréquence de l'ordre de 40kHz en affichant 5 périodes, quelle sensibilité horizontale (indiquée en haut à gauche de l'écran) doit-on choisir sur l'oscilloscope ? Affiner le réglage si nécessaire.

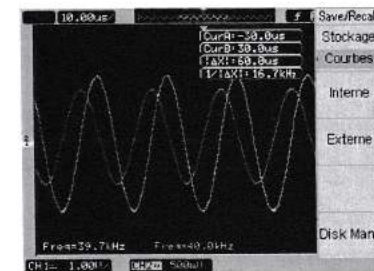


Figure 9 : Capture d'écran de l'oscilloscope avec visualisation du signal émis et du signal reçu

- En plaçant le train à environ 1 m du récepteur, visualiser le signal reçu par le récepteur en branchant le câble issu du récepteur sur la voie 2 de l'oscilloscope.
- Quelle est la fréquence du signal reçue lorsque le train est à l'arrêt ?
- Que se passe-t-il lorsque l'on rapproche ou éloigne le train du récepteur ?
- A partir d'une position où les signaux sont en phase, avancer le train pour que les deux signaux soient en opposition de phase, l'avancer une deuxième fois pour que les deux signaux soient en phase. Quelle distance a été parcourue pour chaque manipulation ? A quoi correspond cette distance ?
- A partir de ces observations, trouver une méthode précise permettant de déterminer la longueur d'onde de l'onde. En déduire la vitesse de l'onde.

3 Mesure de la vitesse du train

3.1 Mesure manuelle de la vitesse

- Mesurer manuellement la vitesse du train lorsque le commutateur de vitesse est successivement sur les positions 1, 4, et 7. Pour cela, vous disposez d'un chronomètre et de repères le long des rails espacés de 50cm.
- Pour faire reculer le train, utiliser la position *recule* sur le boîtier.
- Présenter les résultats dans un tableau. Que pensez-vous de la qualité de votre mesure ?

3.2 Effet Doppler

La fréquence émise par l'émetteur est $f_e = 40\text{kHz}$. La vitesse d'onde ultra-sonore émise, v_e a été déterminée dans la section 2. Après une courte phase d'accélération, le train se déplace à une vitesse constante v_T . La fréquence perçue par le récepteur est alors :

$$f_r = \frac{f_e}{1 - v_T/v_e} \quad (1)$$

avec $v_T > 0$ si le train se rapproche du récepteur et $v_T < 0$ s'il s'éloigne.

- En déduire la relation liant la vitesse du train v_T en fonction de la différence de fréquence $\Delta f = f_r - f_e$ et de la vitesse de l'onde ultrasonore v_e .
- Lorsque le train avance, en utilisant les vitesses estimées dans la partie I, calculer le décalage de fréquence que l'on cherche à mesurer sur l'oscilloscope. Comparer ces valeurs aux fréquences des signaux émis et reçus, qu'en pensez-vous ?

3.3 Mesure de la période et fréquence de battement

Afin d'effectuer une mesure de la différence de fréquence Δf entre onde émise et onde reçue, nous allons utiliser le **phénomène de battement** (Voir annexe 1). Il est obtenu en additionnant le signal émis et le signal reçu. La mesure de la demi-période de battement $\frac{T_B}{2}$ permet d'obtenir la différence de fréquence entre les 2 ondes (Figure 10) :

$$\frac{T_B}{2} = \frac{1}{\Delta f}$$



Pour additionner les 2 signaux avec l'oscilloscope, utiliser la fonction **Math** (Annexe 2-6.3).

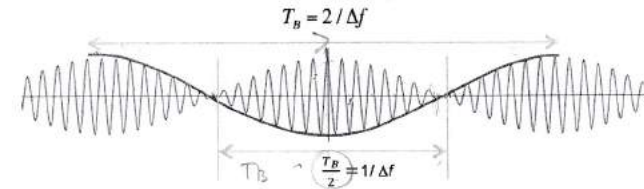


Figure 10 : Somme de deux signaux de fréquences proches

- Si le train ne bouge pas, voyez-vous une période de battement ?
- Nous allons maintenant mesurer le signal reçu par le récepteur lorsque le train avance en utilisant la fonction **Single** (Voir annexe 2-6.4) :
 - Régler la sensibilité horizontale à 50ms par carreau.
 - Placer le commutateur de vitesse sur la position 1 pour faire avancer le train.
 - Appuyer sur **Single** après quelques dixièmes de secondes afin d'enregistrer le signal reçu par le récepteur lorsque le train avance.
 - Additionner les deux signaux en utilisant la fonction **Math**.
 - Après avoir réglé la sensibilité horizontale (environ 10ms/carreau), visualiser les battements et imprimer le signal mesuré pour le joindre à votre compte-rendu (Voir annexe 2-6.6).
- N.B. : Pour une meilleure visibilité, n'afficher que le signal Math. (supprimer les voies 1 et 2 en appuyant sur les boutons rectangulaires 1 et 2.**
- La période de battement ne peut pas être obtenue automatiquement par l'oscilloscope, nous allons donc utiliser les curseurs (Annexe 2-6.5) pour mesurer la période de battement $\frac{T_B}{2}$.
- Refaire une mesure de la période de battement pour les positions 4 et 7 du commutateur en réglant cette fois la sensibilité horizontale sur 50ms/carreau.
- En déduire la vitesse du train. Présenter vos résultats dans un tableau.
- Comment varie la différence de fréquence ? Comparer avec vos mesures faites précédemment

4 Détermination de l'incertitude sur la vitesse du train.

(Partie à faire si il vous reste du temps)

On considère que l'on connaît parfaitement la fréquence émise et la vitesse de l'onde ultrasonore. Dans ce cas, l'incertitude sur la vitesse du train peut être déduite de la relation :

$$\frac{\Delta v_T}{v_T} = \frac{\Delta T_B}{T_B}$$

- Estimer l'erreur de mesure ΔT_b . En déduire l'incertitude sur la vitesse du train. Quelle est l'avantage de la méthode de la partie 3 ?

5 Annexe 1 : Phénomène de battement

Le phénomène de battement s'entend en musique où le battement est une perception sonore due au mélange de deux sons, de fréquences fondamentales voisines. Lorsque deux sons sont de fréquences f_1 et f_2 très proches — donc de hauteurs voisines — l'oreille reçoit une sorte de pulsation lente dont la fréquence est la différence $f_1 - f_2$ en valeur absolue. Par exemple, un *la* à 440 Hz joué en même temps qu'un *la* à 440.5 Hz produiront conjointement une pulsation de 0.25 battements par seconde.

Des exemples peuvent être écoutés en suivant les deux liens ci-dessous :

Entre 440Hz et 440.5Hz (fréquence de battement 0.5Hz):

<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b2/SoundBeats1.ogg>

Entre 440 et 442Hz (fréquence de battement de 1 Hz):

<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8c/SoundBeats2.ogg>

La fréquence de battement s'obtient en sommant les deux signaux de pulsations proches $\omega_1 = 2\pi f_1$ et $\omega_2 = 2\pi f_2$. Pour simplifier les calculs, on suppose que ces 2 signaux ont même amplitude A et même déphasage initial que l'on suppose nul, l'onde résultante s'obtient en sommant les 2 ondes :

$$S(t) = A \cos(\omega_1 t) + A \cos(\omega_2 t)$$

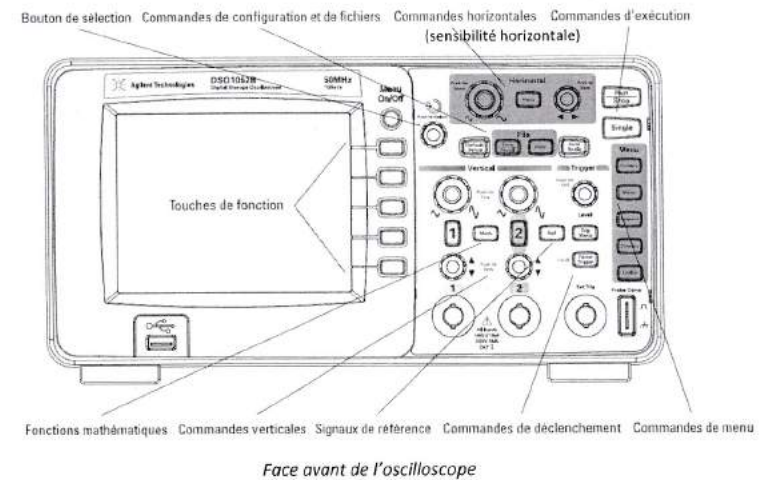
$$S(t) = 2A \cos\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t\right) \cdot \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t\right)$$

$$\text{on a donc } S(t) = 2A \cos\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t\right) \cdot \cos\left(\frac{\Delta\omega}{2} t\right) \text{ avec } \Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$$

$$\text{Comme } \omega_i = 2\pi f_i, S(t) = 2A \cos\left(\frac{f_1 + f_2}{2} 2\pi t\right) \cdot \cos\left(\frac{\Delta f}{2} 2\pi t\right)$$

La somme des deux signaux équivaut donc à une sinusoïde de fréquence égale à la moyenne des deux fréquences multipliée (ou modulée) par une sinusoïde de fréquence égale à $\frac{\Delta f}{2}$ et appelée fréquence de battement. Sur l'oscilloscope, on mesurera une demi-période de battement $\frac{T_B}{2} = \frac{1}{\Delta f}$ qui correspond à la période de battement que l'on perçoit de manière acoustique (Voir Figure 10)

6 Annexe 2 : utilisation de l'oscilloscope



Face avant de l'oscilloscope

6.1 Réglages de l'oscilloscope :

1. Pour régler l'oscilloscope rapidement, appuyer sur la touche **Autoscale**.
2. Pour le régler manuellement ou affiner le réglage, vous devez changer la sensibilité horizontale (commandes horizontales) et la sensibilité verticale (commandes verticales)
3. Pour faire apparaître les voies 1 2 ou Math sur l'écran appuyer sur les touches **1**, **2** ou **Math**

6.2 Affichage de la fréquence ou de la période sur l'écran principal:

1. Utiliser la touche **Meas** pour afficher les mesures automatiques telles que la période ou la fréquence d'un signal.
2. Dans le menu **Mesure** qui s'affiche sur l'écran, appuyer sur **Source** pour sélectionner la voie d'entrée (1 ou 2) pour laquelle vous souhaitez effectuer une mesure automatique.
3. Appuyer sur **Temps** (pour mesurer la période ou la fréquence) et tourner le bouton de sélection pour sélectionner la mesure souhaitée.
4. Appuyez ensuite sur le bouton de sélection ou sur la touche de fonction **Temps** pour faire apparaître la mesure dans la partie inférieure de l'écran.
Si le résultat de la mesure s'affiche sous forme d'astérisques « **** », il n'est pas possible d'effectuer la mesure avec les réglages actuels de l'oscilloscope.

6.3. Addition de deux signaux :

1. Appuyer sur la touche **Math**.
2. Dans le menu Math qui apparaît sur l'écran, appuyez sur **Utiliser**.
3. Appuyer plusieurs fois sur la touche de fonction **Utiliser** ou tourner le bouton de sélection pour sélectionner « A + B »

6.4 Fonction Run/Stop et Single

- Lorsque la touche **Run/Stop** est verte, l'oscilloscope est en train d'acquérir des données. Pour arrêter l'acquisition de données, appuyer sur la touche **Run/Stop** qui devient rouge. Pour relancer l'acquisition de données, appuyer à nouveau sur **Run/Stop**.
- Pour capturer et obtenir la représentation d'une seule acquisition, appuyer sur **Single**. Après avoir capturé et représenté une seule acquisition, la touche **Run/Stop** devient rouge.

6.5 Utilisation des curseurs, touche Cursors

Il est possible de configurer deux curseurs parallèles, réglables manuellement pour effectuer la différence de temps (horizontales) sur un signal sélectionné.

1. Appuyer sur la touche **Cursors**.
2. Dans le menu Curseurs, appuyer sur **Mode**.
3. Appuyer plusieurs fois sur la touche de fonction **Mode** ou tourner le bouton de sélection jusqu'à ce que *Manuel* soit sélectionné.
4. Appuyer sur **Type** pour basculer sur la mesure du type **Temps**
5. Appuyer sur la touche de fonction **Source** et maintenez-la enfoncée ou tournez le bouton de sélection pour sélectionner la voie ou le signal de fonction mathématique sur lequel effectuer la mesure.
6. Pour régler les curseurs, appuyer sur **CurA** et tournez le bouton de sélection pour régler le curseur A.
7. Appuyer sur **CurB** et tournez le bouton de sélection pour régler le curseur B.
8. Les valeurs affichées pour les curseurs sont :
CurA.; CurB ; ΔX : différence entre les valeurs de temps CurA et CurB ; $1/\Delta X$: la fréquence associée à la période

6.6 Enregistrer un signal sur clé USB pour l'imprimer

1. Placer la clé USB dans l'emplacement sur la face avant de l'oscillo
2. Appuyer sur la touche **save/recall**
3. Dans le menu **Stockage** : choisir **bmp**
4. Appuyer sur la touche de fonction **Externe**
5. Appuyer sur **Nouv. Fichier**, entrer le nom du fichier et **sauvegarder**