

VIIB – Effet Doppler

Le but de ce TP est :

- De regrouper les informations obtenues lors des précédents TP : filtrage, détection synchrone, fréquence d'échantillonnage et filtrage numérique.
- D'étudier l'effet doppler à l'aide d'un montage à base d'émetteur/récepteur ultra-sonores.

Matériel à disposition :

- 1 Oscilloscope numérique Keysight avec câbles coaxiaux, et T...
- 1 interface Sysam avec ordinateur équipé de Latis-Pro.
- 1 GBF FI 5505 GA
- 1 alimentation +15V/0/-15V
- 1 alimentation continue réglable.
- 1 plaquette AD633
- 1 boîte de composants
- 2 émetteurs US + 1 récepteur US dont un monté sur véhicule
- Une rampe + dispositif de maintien du dispositif US.
- 1 amplificateur de signal sonore.
- 1 laser
- 1 phototransistor BPW17
- 1 plaque Labdec
- 1 boîte à décades de résistances.
- 1 boîte à décades de capacités.
- Les notices des différents appareils de mesure.

I – Principe de la mesure

I-1) Document 1 : L'effet Doppler

La fréquence d'une onde (sonore) n'est pas un caractère absolu de l'onde. Elle dépend du mouvement relatif de l'émetteur et de l'observateur, et plus précisément de leur vitesse relative. Une personne fixe écoute des bips émis périodiquement tous les T par un haut-parleur en mouvement à la vitesse $\vec{v} = v \vec{u}_x$. En fait, à cause de l'éloignement progressif du haut-parleur, la personne reçoit des bips séparés d'une durée T' supérieure à T .



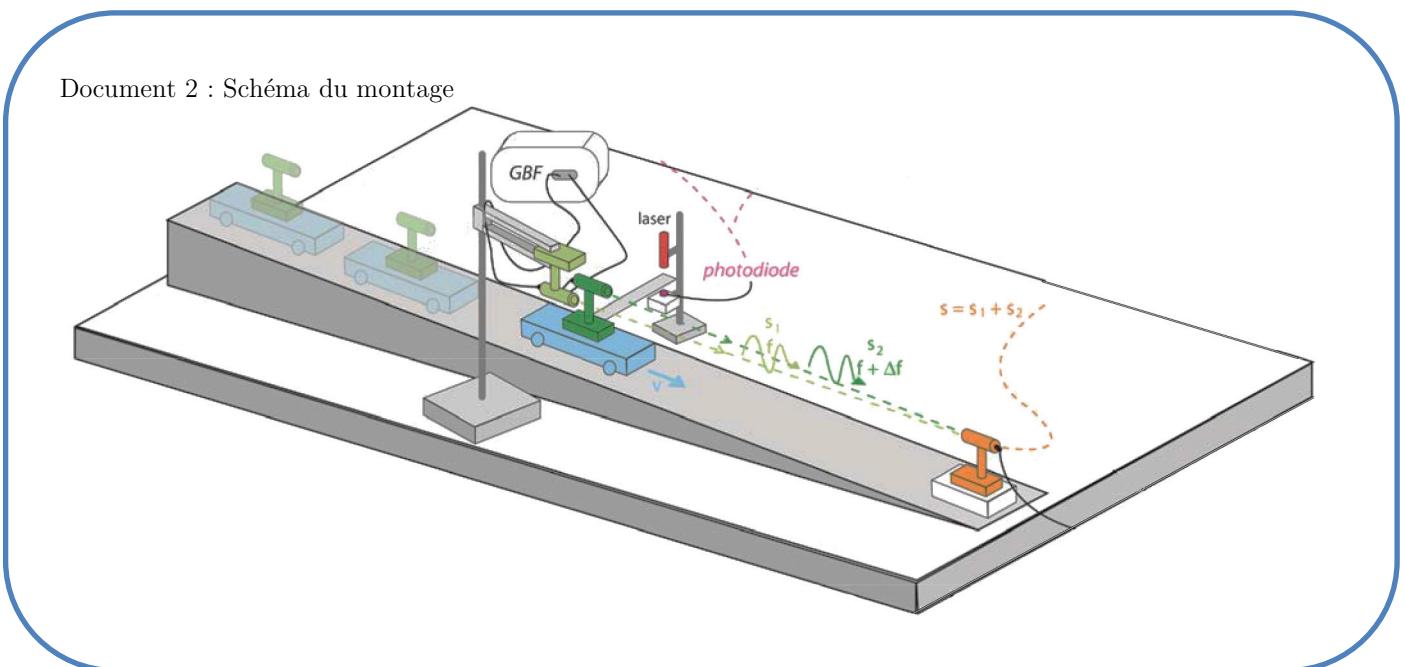
Formalisons cette situation : la distance initiale entre la personne et le haut-parleur est notée l_0 . Le premier bip est émis en $t_0 = 0$. Il est reçu en $t'_0 = \frac{l_0}{c}$ et ainsi de suite...

| N° du Bip | Instant d'émission | Distance | Instant de réception |
|--------------|--------------------|---------------------------|---|
| Bip 0 | $t_0 = 0$ | l_0 | $t'_0 = \frac{l_0}{c}$ |
| Bip 1 | $t_1 = T$ | $l_1 = l_0 + vT$ | $t'_1 = T + \frac{l_1}{c}$ |
| ...Bip $n-1$ | $t_{n-1} = (n-1)T$ | $l_{n-1} = l_0 + v(n-1)T$ | $t'_{n-1} = (n-1)T + \frac{l_{n-1}}{c}$ |
| Bip n | $t_n = nT$ | $l_n = l_0 + v nT$ | $t'_n = nT + \frac{l_n}{c}$ |

On déduit la période T' perçue par l'observateur : $T' = t'_n - t'_{n-1} = T + \frac{vT}{c} = T \left(1 + \frac{v}{c}\right)$ ainsi que la fréquence mesurée par l'observateur : $f' = \frac{f}{1+\frac{v}{c}} \sim f \left(1 - \frac{v}{c}\right)$. Notons $\Delta f = f' - f$ le décalage en fréquence alors :

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{v}{c}$$

I-2) Dispositif expérimental

I-3) Mesure de v à partir des battements

Le but est de déterminer la vitesse $v(t)$ instantanée de la voiture en faisant battre les ondes ultrasonores (US) des deux émetteurs. Le premier émetteur est fixe, de fréquence $f = 40\text{kHz}$. L'autre émetteur est solidaire du mobile en mouvement à vitesse instantanée $v(t)$ et il émet, dans le référentiel du laboratoire à une fréquence f' décalée par effet Doppler. Le décalage Δf étant proportionnel à v , on obtiendra une mesure de v à l'aide de la fréquence des battements.

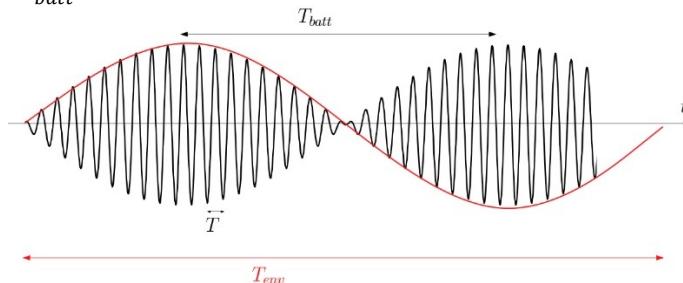
- Ecrire le signal reçu $s(t)$ par le récepteur, on écrira les signaux émis sous la forme :

$$\begin{cases} s_1(t) = A \cos(2\pi ft) \\ s_2(t) = A \cos(2\pi f't + \phi) \end{cases}$$

On suppose les amplitudes identiques pour plus de facilité dans les calculs, la différence entre les amplitudes se manifestera par des battements moins marqués.

Sur la figure ci-dessous, on a représenté $s(t)$ en déduire le lien entre $T_{batt} = \frac{T_{env}}{2}$ et Δf .

- Ecrire le lien entre v et T_{batt} .

I-4) Mesure de v par analyse spectrale de $s'(t)$

On va multiplier la sortie amplifiée $s(t)$ avec le signal $s_1(t)$. On suppose grâce à l'amplificateur que les deux amplitudes sont égales.

- En déduire le signal $s'(t)$ obtenu en sortie du multiplicateur.
- Représenter le spectre du signal.
- Quel est le pic qui servira à la mesure de v ?

I-5) Mesure de v à partir du signal filtré $s''(t)$

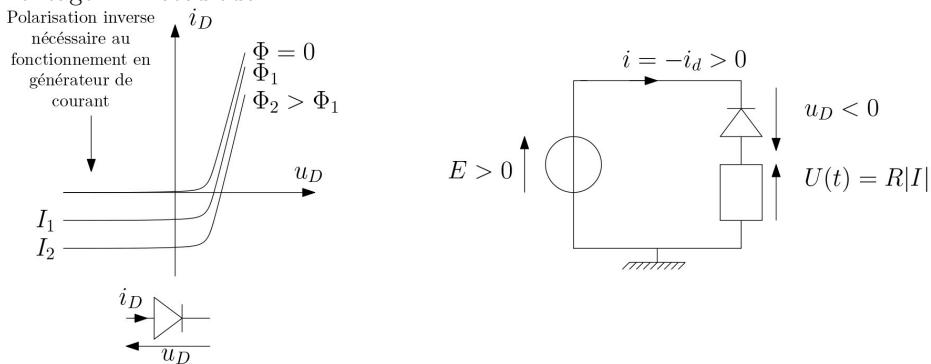
On peut isoler l'harmonique précédent à l'aide d'un filtre passe-bas analogique ou numérique.

- Calculer le produit RC qu'il faut utiliser pour réaliser un filtrage efficace de la fréquence Δf (Elle sera proche de 50Hz).
- En déduire le lien entre la période du signal filtré et la vitesse.

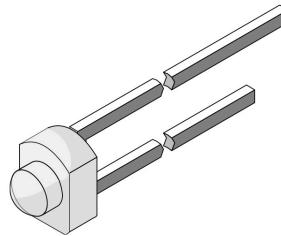
I-6) Mesure directe de v

Afin de synchroniser les mesures on a placé sur le mobile une « lame » qui lors de la descente de celui-ci va couper un faisceau laser. Le faisceau laser cible une photodiode BPW17 qui va voir son intensité à ses bornes variée lors du passage de la « lame ».

Document 3 : Montage « Photodiode »



Lorsque le laser illumine la photodiode, le courant est quantifiable et la tension aux bornes de la résistance a une valeur finie. A l'inverse lorsque le flux lumineux devient quasi-nul, le courant devient très faible ainsi que la tension aux bornes de la résistance. (On prendra E=5V).



Le phototransistor est un composant polarisé : la cathode est représentée par une « connexion » plus courte. Ainsi le +5V sera relié à la petite connexion de la photodiode.

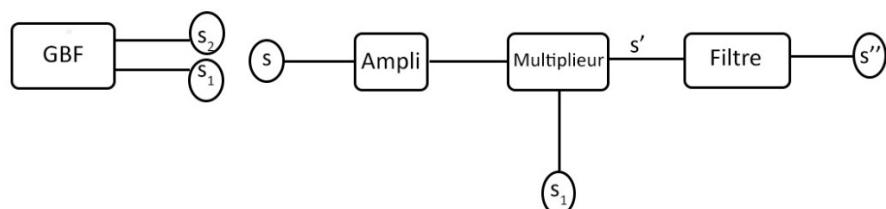
- Exprimer la vitesse v en fonction de l'épaisseur « projetée » de la lame et de la durée Δt mesuré lorsque le faisceau n'illumine plus la photodiode.

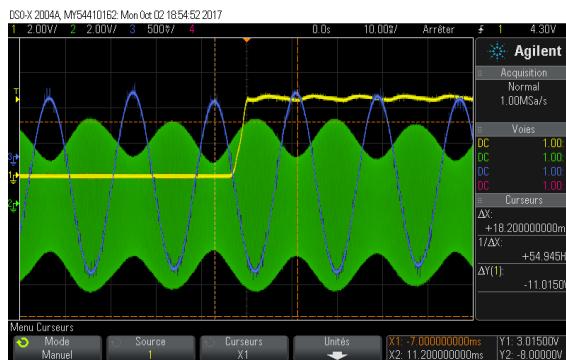
II – Cinémomètre doppler

II-1) Réalisation

On appelle cinémomètre, un appareil qui permet de réaliser une mesure de vitesse, ainsi on va exploiter l'effet Doppler pour faire cette mesure.

- Réaliser le montage et les branchements permettant la détermination de la vitesse à l'aide des mesures exposées dans la partie I.
- On observera les signaux s_1, s, s', s'' et u (pas forcément en même temps) sur l'oscilloscope et sur le logiciel Latis-Pro. (Sur la figure ci-dessous, on observe u , s et s')
- Pour le déclenchement on se servira du signal $u(t)$. Sur l'oscilloscope on réglera le menu trigger afin de réaliser le déclenchement en mode « Single » des mesures et sur latis-Pro on utilisera un « Pré-trig » de 25 ou 50% pour effectuer la synchronisation.
- On a représenté la chaîne de montage sur le schéma simplifié suivant :





Exemple d'oscilloscopogramme lors de l'acquisition des signaux

II-2) Incertitudes

a) Principe du calcul

On a, en notant U l'incertitude élargie à 95% :

$$\begin{cases} v = c \frac{\Delta f}{f} \\ c = \sqrt{\frac{\gamma R T}{M}} \end{cases} \Rightarrow \frac{U(v)}{v} = \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{U(T)}{T} \right)^2 + \left(\frac{U(f)}{f} \right)^2 + \left(\frac{U(\Delta f)}{\Delta f} \right)^2}$$

L'incertitude sur f est obtenue par lecture sur le GBF ou sur l'oscilloscope à l'aide du menu mesures :

- $\Delta_c(f) = \frac{0.6}{100} * \text{Valeur} + 60 \text{ Digits}$ avec $U(f) = \frac{2}{\sqrt{3}} \Delta_c(f)$
- $U(T)$ est lié à la l'indication de classe du thermomètre mais aussi à son erreur de lecture d'où, en notant q la résolution du thermomètre :

$$U(T) = \sqrt{U_{tolérance}^2 + U_{lecture}^2} = \sqrt{\left(\frac{q}{\sqrt{3}} \right)^2 + \left(\frac{q}{\sqrt{3}} \right)^2}$$

- $U(\Delta f)$ dépendra de la méthode de mesure choisie.

b) Mesure à partir des battements

Pour la mesure on utilise deux curseurs on a donc : $U(T_{batt}) = \sqrt{\frac{2}{3}} x$ où x représente la tolérance d'un curseur.

Or :

$$\Delta f = \frac{1}{T_{batt}} \Rightarrow \frac{U(\Delta f)}{\Delta f} = \frac{U(T_{batt})}{T_{batt}}$$

On retrouve le même type de calcul pour la mesure à partir de s'' et de u.

c) Mesure à partir d'un pic fréquentiel

La largeur d'un pic est liée à la taille de la fenêtre utilisé pour effectuer le calcul de la FFT ainsi on admettra que :

$$U(\Delta f) = \frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{T_a} \text{ où } T_a = \text{période d'acquisition}$$

- Sur l'oscilloscope T_a représente la largeur de la fenêtre en mode temporel.
- Sur Latis-Pro si vous êtes en mode manuel vous pouvez choisir T_a sinon c'est le temps d'acquisition tel que :

$$T_a = N T_e$$

II-3) Conclusion

- Après vos calculs d'incertitude, quelle méthode de mesure de v est conseillée ? Conclure.