

# MP 25 - MESURE DES FRÉQUENCES TEMPORELLES (OPTIQUE EXCLUE)

Novembre 2019

Cléments (COLLÉAUX & DE LA SALLE)

## Bibliographie

- ✦ Duffait Élec *pour le fréquencemètre*
- ✦ Jolidon, BUP n804 *pour l'hétérodynage*

## Expériences

- ✦ Mesure de la période d'un pendule simple au chronomètre
- ✦ Mesure de la fréquence d'un diapason au fréquencemètre
- ✦ Mesure de l'effet Doppler par détection synchrone

## Introduction

Les fréquences interviennent dans quasiment tous les domaines de la physique, il peut être très important de les mesurer avec précision. Le problème c'est que c'est une mesure qui nécessite forcément de passer par un moyen détourné (on n'a pas d'instrument capable de mesurer l'inverse d'un temps). On va voir comment, en fonction du type de fréquence à laquelle on s'intéresse (hors domaine de l'optique puisque les méthodes sont très particulières et applicables seulement à ce domaine) on va pouvoir accéder à une mesure précise.



J'utilise un accordeur (trouvé sur le play store) pour mesurer la fréquence d'un diapason, afin de montrer une application quotidienne (on peut baisser la note à l'aide d'une masselote)

## 1 Mesure d'une période : Pendule pesant

Ici, on va utiliser la caractéristique la plus intuitive qu'on a de la fréquence. On sait qu'elle est définie comme l'inverse d'une période :

$$f = \frac{1}{T}$$

Or on a des instrument de mesure de temps (chronomètre), qui vont nous permettre de remonter à des fréquences. Prenons le cas d'un système simple : le pendule simple. La fréquence de ce système (dans la limite des petits angles) est :

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{mgL}{J + mL^2}}$$

Mais nous on mesure

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J + mL^2}{mgL}}$$

Pour s'assurer que notre méthode de mesure est bonne, on va essayer de remonter, à l'aide de cette relation, à la valeur de  $g$ . Ne perdons pas de vue qu'il s'agit d'un montage de métrologie, chaque expérience doit être mise dans le contexte d'une mesure, et non d'une simple vérification de loi.



## Vérification de la méthode de mesure par période

✎ Ché pa

⊖ 5 minutes max

On fixe une masse  $m$  à une distance  $L$  de l'axe de rotation. Pour plusieurs valeurs de  $L$ , on lâche le pendule avec un angle suffisamment faible (pas besoin de le mesurer...). On mesure au chronomètre une dizaine d'oscillations et on rentre la période mesurée. Si la mesure est bonne, le tracé de  $(2\pi/T)^2(J + mL^2)/m$  en fonction de  $L$  nous donne directement la valeur de  $g$  en coefficient directeur (le moment d'inertie  $J$  est donné par le constructeur).

On aura pu faire quelques points en préparation et seulement un ou deux en live.

Au niveau des incertitudes, on a celles sur la longueur (1 mm) et celles sur le temps au chrono ( $0.2 \text{ s}/N$  où  $N$  est le nombre d'oscillations mesurées).

C'est important de faire un point sur les incertitudes car la manip peut paraître très qualitative. Elle ne doit pas l'être pourtant, d'où l'importance d'avoir conscience des limites de la mesure.

↓ Cette technique reste très limitée dans son application car dès lors qu'on mesure un signal de fréquence supérieure à 1 Hz (signal sonore par exemple), ça devient chaud de suivre à l'oeil l'évolution...

## 2 Mesure par nombre d'oscillations : Fréquencemètre

En TP, on a tendance à surutiliser l'oscillo, car on peut accéder numériquement à toutes les caractéristiques de notre signal (y compris sa fréquence). Mais l'oscilloscope N'EST PAS un instrument de mesure (j'avoue c'est quand même pratique).

Il existe des appareils capables de donner directement la fréquence d'un signal (de la même manière qu'un ampèremètre affiche simplement l'intensité du courant). Nous allons essayer de fabriquer notre propre fréquencemètre.

Cette fois-ci, la méthode est moins intuitive, mais plus directe : la fréquence d'un signal peut aussi être vue comme le nombre d'oscillations en 1s.

Le signal est traité ainsi :

1. Le signal  $u_0$  (sinusoïdal de fréquence  $f_0$ ) rentre dans un comparateur à hystérésis à seuil très faible (+15V lorsque  $u_0 > 0$  et -15V lorsque  $u_0 < 0$ )
2. On coupe les tensions négatives (diode) et on divise la tension par 3, afin d'avoir un signal TTL (0V, +5V).
3. On multiplie (grâce à une porte ET) ce signal créneau par un autre créneau (0V, 5V) de fréquence 0.5Hz (horloge).

En sortie on a alors un signal nul pendant 1s, et créneau de fréquence  $f_0$  pendant 1s etc. Il suffit alors, à l'aide d'un compteur, de compteur (sans blague) le nombre de montée de ce signal de sortie pendant 1s, ce nombre est directement la fréquence  $f_0$  !

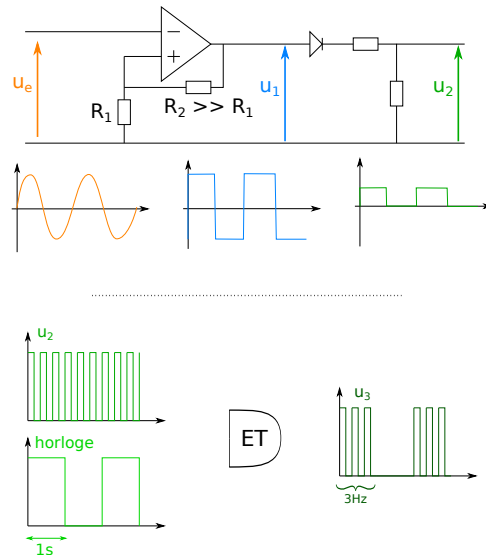


FIGURE 1 – Principe du fréquence-mètre

La manip est bien détaillée dans le fascicule d'élec. On fait quelques tests au GBF pour montrer que la fréquence affichée correspond à l'unité près à celle envoyée (quelques tests à 10Hz, 100 Hz, 746Hz)

On peut aussi en profiter pour montrer à l'oscillo l'évolution du signal entre chaque bloc ( $u_e$ ,  $u_1$ ,  $u_2$  et  $u_3$ ).

#### Attention!

Parfois le compteur donne toujours une valeur supérieure à la fréquence envoyée et la valeur affichée n'est jamais la même... Ceci est dû au fait qu'il existe un peu de bruit et que le compteur compte des montées qui ne sont pas censées exister. Il faut alors brancher une petite résistance en parallèle avant le compteur afin de réduire ces petits bruits. Régler la valeur de cette résistance (de l'ordre de  $1000\Omega$  généralement) jusqu'à ce que la fréquence soit toujours la même et qu'elle corresponde à la fréquence envoyée.

### Mesure de la fréquence d'un diapason

⚡ Duffait électronique

⌚ 2 minutes

On fait pareil mais avec un diapason et un micro à la place du GBF. Notons que la fréquence affichée avec cette méthode a nécessairement une incertitude de 1Hz à cause des effets aux bords de l'horloge : par exemple si à la montée de l'horloge, le signal vient juste de passer de 0V à +5V, on a loupé une oscillation.

*Tout ça c'est bien gentil, mais pour l'instant on s'est quand même limité à des signaux très simples : des sinusoïdes. Mais par exemple si on écoute deux diapasons de fréquences proches, on entend des battements... Comment isoler la fréquence des battements dans ce cas ? Avec cette méthode c'est impossible, nous avons besoin d'une méthode nous permettant d'isoler une fréquence avant de la mesurer*

## 3 Isoler une fréquence : La détection synchrone

Dans les différents exemples que nous avons présentés, il fallait retrouver la fréquence d'un signal monochromatique, c'est à dire ne possédant qu'une fréquence. Dans des cas plus compliqués et réalistes les signaux sont composés de plusieurs fréquences et donc plus difficiles à traiter.

Prenons l'exemple de l'effet Doppler qui décrit le changement de fréquence perçue avec le changement de la distance émetteur/récepteur. Cet effet va être illustré sur ce banc où on a un émetteur piézoélectrique mobile et un récepteur fixe. La théorie de l'effet Doppler permet d'exprimer la fréquence  $f_{rec}$  du signal reçu par le récepteur en fonction de celle du signal monochromatique émis par l'émetteur  $f_{em}$  :

$$f_{rec} = \frac{1}{1 - \frac{v_{em}}{c}} f_{em}$$

avec  $v_{em}$  la vitesse constante de l'émetteur.

Dans le cas réaliste où  $v_{em} \ll c$ , l'expression se réécrit  $f_{rec} = f_{em} + \delta f$  avec  $\delta f = \frac{v_{em}}{c} f_{em} \ll f_{em}$ . Le signal reçu par l'émetteur est donc constitué de deux fréquences avec l'une très faible devant l'autre. Comme les méthodes détaillées précédemment ne sont pas applicables ici, nous allons présenter une nouvelle méthode pour remonter à une fréquence : la détection synchrone.

Cette méthode nécessite de regarder les spectres des signaux considérés ici. Le signal émis est pur à  $f_{em}$  tandis que le signal reçu est pur à  $f_{em} + \delta f$ . Pour séparer ces deux composantes très proches, c'est compliqué. On va donc traiter ainsi le signal reçu :

1. On multiplie le signal reçu par un sinus de fréquence  $f_{em}$ . En sortie, on a alors deux composantes :  $2f_{em} + \delta f$  et  $\delta f$
2. On filtre ensuite plus facilement la fréquence qui nous intéresse  $\delta f$  puisque que les deux fréquences sont très éloignées, on peut donc les filtrer grâce à un passe-bas.

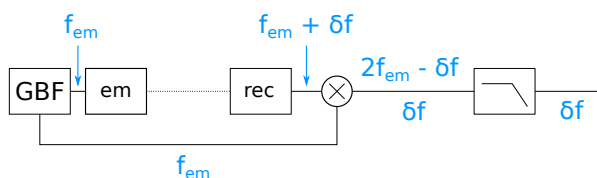


FIGURE 2 – Principe de l'hétérodynage

### Application de l'hétérodynage à l'effet Doppler

🔗 Jolidon, BUP n804

⌚ 5 min

On utilise le banc à effet Doppler dans la collection en alimentant l'émetteur fixe avec 10 V et 40 000 Hz. On mesure la vitesse du récepteur avec les détecteurs utilisés pour la chute libre dans le TP "Mécanique Newtonienne". Le moteur du banc est alimenté par le boîtier fait pour.

Voilà on a fait un peu le tour des méthodes de mesure de fréquences... Pour aller plus loin, on pourrait citer l'analyse spectrale d'un signal. En effet, lorsque l'on veut étudier un signal plus complexe, composé de plusieurs fréquences, aucune de nos méthodes n'est vraiment adaptée. Finalement, on peut retenir que la méthode s'adapte au contexte.

## 4 Questions

- **Montrer le signal avec les battements pour Doppler, prendre le signal avant le filtre passe-bas //** C'est bizarre y a pas de battement // **On peut regarder le spectre ? //** Et la belle intervention de Champain, ici on fait un produit de cosinus, pas une somme donc c'est normal de pas avoir de battement
- **Au final pour l'hétérodynage l'instrument de mesure c'est le chrono donc un comptage d'événements, en quoi c'est différent de la manip' avec le pendule ? //** Ici, il faut remonter à un  $\delta f$  noyé dans le reste de la fonction donc la spécificité de cette mesure c'est la méthode pour isoler le  $\delta f$  //

- **Au final on voit que y a pas besoin de multiplier les deux signaux, on peut juste regarder à l'oscillo le signal  $f + \delta f$ , comment choisir le temps de mesure ? // On veut mesurer une fréquence de la dizaine de Hertz donc il faut 1/10 s en temps de mesure car on a la relation  $t/f = 1$  // **Du coup en quoi l'hétérodynage est-il vraiment pertinent ? //** Si l'oscillo n'a pas la résolution nécessaire pour séparer les deux fréquences**
- **Comment marche le chronomètre utilisé pour mesurer la vitesse du récepteur sur le banc Doppler ? //** Je sais pas
- **Pour le banc Doppler, comment être sûr que la vitesse du récepteur est constante ? //** On a fait gaffe aux câbles pour que leur tension ne ralentisse pas le récepteur et avec les données acquises on dirait que ça marche bien, la théorie semble vérifiée // **Mais du coup si la vitesse est pas constante qu'est-ce que ça change ? //** Y a proportionnalité entre la vitesse et  $\delta f$  donc si pendant le temps affiché au *Run Stop* sur l'oscillo  $v$  change, alors  $\delta f$  va changer aussi.
- **L'émetteur et le récepteur en sont pas parfaitement alignés, est-ce dérangeant ? //** Pas vraiment on va juste perdre un peu en puissance.
- **Pourquoi avoir utilisé un filtre tout fait pour l'hétérodynage ? //** Un simple filtre RC marche aussi mais quand on l'a testé, notre résistance marchait pas donc on avait pris ce filtre et au final on l'a gardé.
- **Connais tu une méthode classique pour mesurer une très grande fréquence ? // .. // On peut multiplier le signal étudié par un autre signal pour baisser la fréquence et revenir à des fréquences étudiables facilement.**
- **Au vu de votre incertitude de 1 Hz au fréquencemètre et de voter intro, est-ce que 1Hz c'est beaucoup en musique ? //** Non pas vraiment, il y a notamment un rapport 2 entre deux octaves.
- **Quels sont les rôle et caractéristiques de la caisse de résonance du diapason ? //** La caisse de résonance sert à amplifier le son produit, sa longueur est telle que la fréquence émise soit un mode propre de résonance. // **Attention à pas mettre le micro dedans, on peut tomber sur un noeud !**
- **Pourquoi un diapason c'est aussi bien résolu en fréquence ? //** Il y a sûrement un rôle de vibration de la poutre...et avec l'ajout de la masseolote qui modifie la fréquence émise on voit qu'il faut bien avoir deux branches symétriques // **Et la caisse de résonance ? //** Elle augmente l'amplitude // **Et le facteur de qualité ! On élargit le pic à 440 Hz**
- **Quelles sont les fréquences audibles ? //** 20 à 20 000 Hz
- **Comment réparer cette imprécision de 1 Hz pour le fréquencemètre, genre l'horloge qui démarre à des moments un peu aléatoire ? //.. //** On peut utiliser un GBF à verouillage de phase
- **Connais tu une application des des signaux TTL ? //** Le but c'est de donner des valeurs binaires et le seuil de détection est souvent à 1 ou 2 V //
- **Comment fonctionnent les boitiers compteurs utilisé pour le fréquencemètre ? //** Il y a sûrement des transistors sûrement mais je sais pas plus...
- **La fréquence émise par le diapason est-elle modifiée par le facteur de qualité ? //** Non c'est un filtre passe-bande // **et le pendule ? //** Avec des frottements fluides oui, la pulsation est en racine du discriminant de l'équation caractéristique// **Pas de problème avec un passe-bande mais y en a avec des passe-bas !**
- **Comment est défini la seconde ? //** Avec le nombre de désintégration du Césium 133
- **Quel peut être le rôle des conditions initiales pour le pendule ? //** Il faut rester dans les petits angles et pouvoir négliger les frottements // **Et avec des grands angles ? //** Modification de la fréquence // **Tu te's basé sur quel instant du mouvement pour déterminer les périodes ? //** J'ai lâché le pendule et j'ai attendu qu'il fasse un aller-retour pour lancer le chrono et je l'ai arrêté après 10 périodes.
- **Quelle peut être la conséquence sur le spectre de la diminution en amplitude pour le pendule ? //** L'étalement du spectre // **Quelle est la relation entre l'étalement du spectre et  $\omega_0$  et  $Q$  ? //** L'étalement c'est en  $\frac{\omega_0}{Q}$

- **Comment ont été gérées les incertitudes sur Python ?** // Avec la propagation des incertitudes avec hypothèse de distributions gaussiennes //
- **Manip surprise : mesure du diamètre d'un cheveu!** Par diffraction d'un faisceau laser. L'angle est en  $\lambda/a$  donc le rayon de la tache est en  $\lambda D/a$  et en traçant le rayon en fonction de  $\lambda D$  on a  $a$  en coeff directeur. Attention à prendre une grande distance entre l'objet et l'écran, à pas envoyer le faisceau dans l'oeil de son binome et à bien prendre le rayon de la tache et pas son diamètre!

## 5 Remarques

- Incertitudes dans les polys de TS de L3 et M1
- La régression pour la manip surprise est une bonne idée
- "ce gros machin" , "vachement", "bon bah il me reste beaucoup de temps" on oublie!
- Bon fil directeur
- Attention à l'accordeur sur le portable qu'on aura pas le jour J
- **Le jury attend une TF et une discussion sur les paramètres à mettre pour avoir une belle TF vu que cette méthode est très souvent utilisée** cf le Duffait d'Élec. Typiquement la lecture du  $\delta f$  pour l'hétérodynage
- Pour les battements il faut croiser les caisses de résonance pour mélanger les signaux
- Pourquoi avoir étudié le pendule pesant à la place du pendule simple? C'est plus simple pour faire varier  $L$
- Il est possible de montrer les limites de l'oscillo sur les bases de temps extrêmes (réfléchir à la possibilité d'utiliser un ancien oscillo)
- L'oscillo ne fait pas une TF sur les points à l'écran mais sur tous ceux en mémoire. Si on veut acquérir le son d'un diapason il faut une grande base de temps!
- Éviter de refaire un même point devant le jury
- Bonne gestion des incertitudes
- On aurait pu afficher tous les signaux sur les 4 voies de l'oscillo
- Bonne conclu qui synthétise et on aurait pu revenir sur la problématique de la musique (signaux purs vs signaux composés)
- Belle précaution avec le matos sur la manip surprise, on éteint le laser avant de le bouger
- On dit pas "tabulé" pour une valeur dans une notice

2019

**Agrégation de physique : fiche de correction de montage**

Nom : DE LA SALLÉ Clément

Correcteur.trice.s : Alizée Dubois  
Amélie Chardac

Note : 16

Numéro et titre du montage (écrire MPxx) : MP 25 Mesure de fréquences temporelles

Structure générale (juge la forme)	😊😊	😊	😞	😞😞
Gestion du temps (durée visée 30 min)			✗	
Schémas explicatifs des manipulations ? (Sont-ils présents ? Sont-ils de qualité ?)	✗			
Formules théoriques utilisées lors de l'exploitation ? (Présentes ? Clairement énoncées ?)			✗	
Résultats numériques ? (Sont-ils présents, avec une unité, une barre d'erreur ?)	✗			
Gestion du tableau (Écriture, orthographe, axes sur les graphiques...)	✗			
Attitude (communication verbale, dynamisme, interaction avec les correcteur.trice.s ...)	✗			

Manipulation qualitative (si présente)	😊😊	😊	😞	😞😞
Temps passé sur cette manipulation (Doit illustrer ou introduire un concept.)	✗			
Pertinence avec le titre du montage	✗			
Présentation du dispositif et le but recherché avec celui-ci. (Sont-ils présents ? Sont-ils de qualité ?)	✗			

On juge ici le montage manipulation par manipulation. Le nombre de 3 manipulations quantitative est arbitraire. Il n'est pas nécessaire d'en faire 3 pour avoir la note maximale mais mettre plus de 3 dispositifs dans 30 minutes de présentation n'est pas viable. Noter dans le cadre le nom de la manip.

Manipulation 1 : Pendule pesant	😊😊	😊	😞	😞😞
Temps passé sur cette manipulation (Temps suffisant pour exploitation et pas trop longtemps non plus.)	✗			
Pertinence avec le titre du montage	✗			
Présentation du dispositif et le but recherché avec celui-ci. (Sont-ils présents ? Sont-ils de qualité ?)			✗	
Réalisation d'une mesure en direct (Explication du protocole, point repéré sur les données.)			✗	
Analyse et exploitation des résultats. (Commentaires, comparaison avec une valeur théorique)	✗			
Discussion des sources d'erreur et des incertitudes (écriture, orthographe, axes sur les graphiques, ...)	✗			
Regard critique (recul sur les mesures effectuées et regard critique sur celles-ci.)	✗			

le point en direct avait déjà été fait en préparat.

↳ bien d'avoir dit que la même de  $y$  n'était pas le but.

Manipulation 2 : Fréquence mètre	😊😊	😊	😞	😞😞
Temps passé sur cette manipulation (Temps suffisant pour exploitation et pas trop longtemps non plus.)	✗			
Pertinence avec le titre du montage	✗			
Présentation du dispositif et le but recherché avec celui-ci. (Sont-ils présents ? Sont-ils de qualité ?)	✗			
Réalisation d'une mesure en direct (Explication du protocole, point repéré sur les données.)	✗			
Analyse et exploitation des résultats. (Commentaires, comparaison avec une valeur théorique)	✗			
Discussion des sources d'erreur et des incertitudes (écriture, orthographe, axes sur les graphiques, ...)	✗			
Regard critique (recul sur les mesures effectuées et regard critique sur celles-ci.)	✗			

TB explique\*

Manipulation 3 : Détection synchrone	😊😊	😊	😞	😞😞
Temps passé sur cette manipulation (Temps suffisant pour exploitation et pas trop longtemps non plus.)	✗			
Pertinence avec le titre du montage	✗			
Présentation du dispositif et le but recherché avec celui-ci. (Sont-ils présents ? Sont-ils de qualité ?)	✗			
Réalisation d'une mesure en direct (Explication du protocole, point repéré sur les données.)	✗	✗		
Analyse et exploitation des résultats. (Commentaires, comparaison avec une valeur théorique)	✗			
Discussion des sources d'erreur et des incertitudes (écriture, orthographe, axes sur les graphiques, ...)	✗			
Regard critique (recul sur les mesures effectuées et regard critique sur celles-ci.)			✗	

+\*

Réponse aux questions	😊😊	😊	😞	😞😞
Sur les choix relatifs des manipulations		✗		
Sur la culture connexe à la présentation			✗	
Sur la connaissance du matériel sorti		✗		
Exploitation en direct de la manip, de l'amélioration ou du jeu de données fourni. Exercice donné : Diffraction Mesure du diamètre d'un cheveu		✗		

Domage par le facteur 2 mais bonne réactivité.

Commentaires éventuels supplémentaires :

\* Les compteurs auraient pu être mieux expliqués

+\* Domage d'avoir de nouveau compté des périodes.

Il manquait dans ce montage une mesure par TF (spectre)

Présentation agréable, qui s'enchaîne bien (bonne problématique et transitions)