

- biblios:
- Dictionnaire de physique expérimentale Tome 1 La mécanique. L. Quaranta.
 - Expériences d'électronique. R. Duffaut.
 - Expériences de Physique - Capes de Sciences Physiques. R. Duffaut.
 - Revue Physique et Instrumentation - D. Barducci (technique)
 - Notices des appareils

La fréquence est le nombre de fois qu'un phénomène périodique se répète par unité de temps. L'unité de temps du système international est la seconde. Elle a été définie en 1967 à partir d'un nombre précis et très grand de périodes de radiation entre les 2 niveaux hyperfins de l'état fondamental du césium 133. L'incertitude relative sur la seconde définie par cet étalon est de 10^{-16} soit 1 seconde sur 3 millions d'années. Les mesures temporelles sont donc celles sur lesquelles on a le plus de précision. On se ramène donc à des mesures de fréquence pour déterminer d'autres grandeurs. Il peut être également intéressant au quotidien d'avoir accès à des fréquences pour accorder un instrument de musique par exemple. En voiture, le compte tour permet de connaître la vitesse de rotation du moteur et ainsi de ne pas l'abîmer.

Dans ce montage, nous allons voir différentes méthodes de mesures.

I) Mesures par comptage.

Les mesures par comptage reposent sur l'application directe de la définition de la fréquence: on compte le nombre de fois qu'un phénomène périodique se répète identique à lui-même pendant une durée donnée.

1) Le pendule simple. Quaranta Mécanique p 312.

Lorsque les fréquences sont faibles (de l'ordre du Hz), on peut suivre le mouvement à l'œil nu. Ici on va chronométrer la durée t de 10 oscillations d'un pendule simple:

$$n \text{ oscillations pendant une durée } t: f = \frac{n}{t}$$

$$\text{incertitude: } \frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta t}{t}$$

Plus on prend un nombre grand d'oscillations (et donc un temps long), plus la mesure de f sera précise (mais cela devient vite fastidieux).

$$\text{ici } n=10 \rightarrow t = 11,90 \text{ s}$$

Pour évaluer l'incertitude sur le temps, j'ai effectué plusieurs fois la mesure $\Rightarrow \Delta t = 0,1 \text{ s}$

$$t = 11,9 \pm 0,1 \text{ s}$$

$$f = \frac{10}{t} = \frac{10}{11,9} = 0,84 \text{ Hz}$$

$$\Delta f = f \frac{\Delta t}{t} = 0,84 \times \frac{0,1}{11,9} = 0,01 \text{ Hz}$$

$$f = 0,84 \pm 0,01 \text{ Hz}$$

La période des oscillations d'un pendule simple: $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$

or $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}$ La fréquence est donc reliée à la longueur l du fil et à l'accélération de la pesanteur g .

On peut mesurer l à l'aide d'un mètre: $l = 35,0 \pm 0,5 \text{ cm}$

Théoriquement, la masse au bout du fil est ponctuelle. Ici, on mesure la distance entre le point d'attache et le barycentre de la masse. L'incertitude sur l provient en partie du fait qu'on ne connaît pas précisément le barycentre (on ne sait pas si la masse est uniformément répartie).

l et f connus, on peut remonter à g .

$$g = 4\pi^2 l f^2 = 4\pi^2 \times 0,35 \times 0,84^2 = 9,75 \text{ m.s}^{-2}$$

$$\Delta g = g \left(\frac{\Delta l}{l} + 2 \frac{\Delta f}{f} \right) = 9,75 \left(\frac{0,5}{35} + 2 \times \frac{0,01}{0,84} \right) = 0,4$$

$$g = 9,7 \pm 0,4 \text{ m.s}^{-2}$$

On a vu ici comment on pouvait déterminer simplement une grandeur à partir de la fréquence. C'est aussi que procède les géologues pour mesurer g et ainsi en faire des cartographies qui permettent de localiser des cavités souterraines.

On va maintenant s'intéresser à un appareil de mesure qui procède par comptage et qui permet de déterminer des fréquences électriques ou acoustiques auxquelles on ne peut pas accéder visuellement.

2) Le fréquencemètre: Duffait - Expériences d'électronique p 274.

Principe: Le fréquencemètre compte le nombre de période d'un signal périodique pendant un temps donné.

Son fonctionnement repose sur l'utilisation de portes logiques.

L'électronique logique fait appel à un codage de l'information et n'utilise que 2 états électriques nettement séparables:

- l'état 1 (ou haut) correspond à un signal de $+5V$
- l'état 0 (ou bas) correspond à un signal de $0V$.

On va donc travailler avec les séries TTL des modules Flanex.

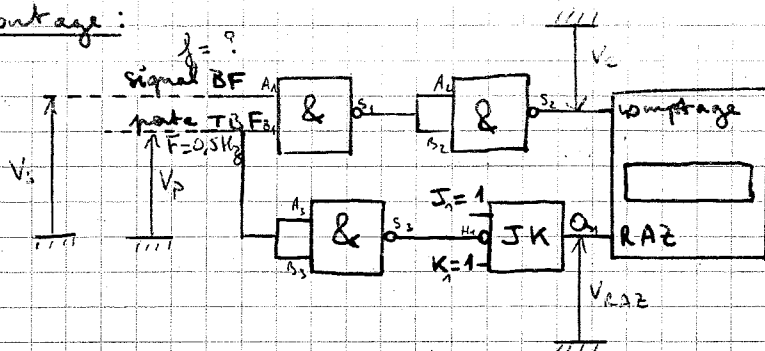
On réalise un ET logique entre le signal dont on veut mesurer la fréquence (sortie TTL d'un générateur BF) et un signal qui sert de porte dont on règle la fréquence sur $0,5 \text{ Hz}$ (sortie TTL d'un générateur TBF). On prend la fréquence égale à $0,5 \text{ Hz}$ pour avoir une période de $2s$. Ainsi, le fréquencemètre compte pendant une seconde $\Rightarrow$ donne le nombre d'impulsion par seconde $\Rightarrow$ la fréquence.

La sortie est formée de 4 niveaux séparés de 1 seconde.

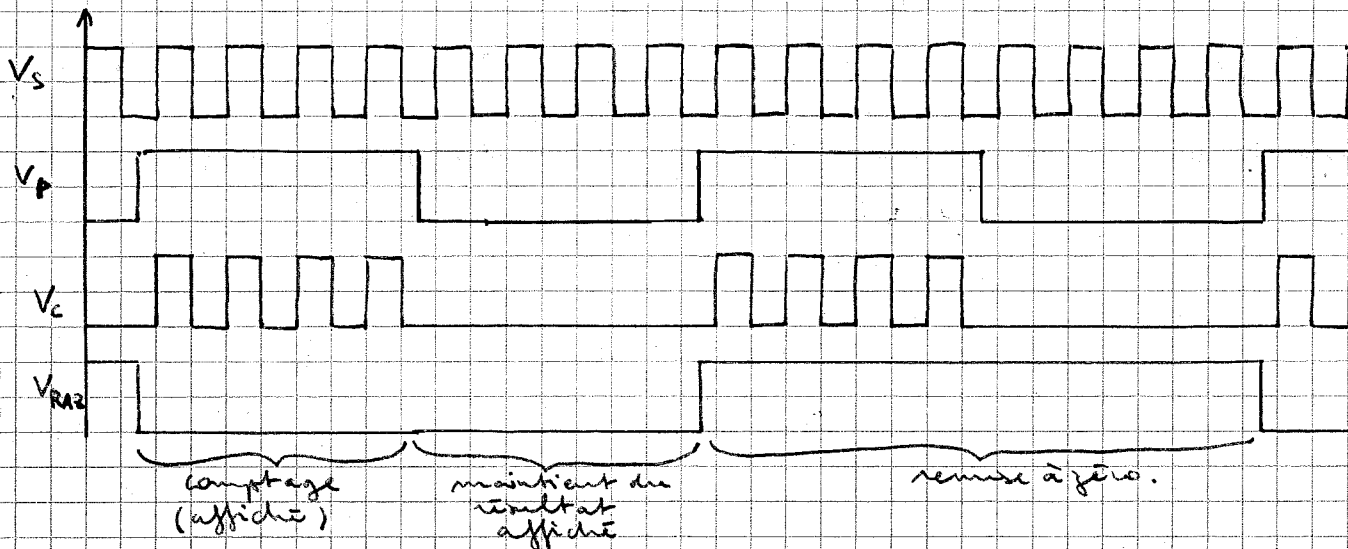
Le résultat est affiché sur un compteur.

La remise à zéro est assurée par un signal niveau de période $4s$ fourni par une bascule JK (en divisant par 2).

montage :



cablage des composants
à la fin du Duffaut.
(NAND 7400 (3/4))
(JK: 7476 (1/2))
⚠ pour JK: S et R, à Vcc
+ alimenter les composants



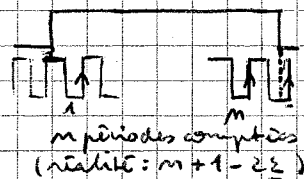
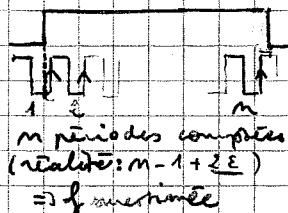
Si on ne remet pas à zéro, la fréquence s'additionne à chaque comptage.

Précision de la mesure:

- incertitude sur le comptage:
(déclenchement front montant)

L'erreur sur le comptage est de ± 1

compte $\Rightarrow$ l'erreur sur la fréquence est de ± 1 Hz (et ce quel que soit la fréquence du signal à mesurer $\Rightarrow$ cette erreur a d'autant plus d'influence que la fréquence est basse).



- autre source d'incertitude: sur la fréquence de la porte (qu'on ne peut pas vérifier au pulvéromètre).

Gamme de fréquence d'utilisation: de la dizaine d'Hz $\rightarrow$ dizaine de MHz.

- limite basse fréquence: incertitude relative très grande (cf comptage).

- limite hautes fréquences: fréquence limite par le temps de commutation de la porte (~ 10 ns pour un circuit TTL $\rightarrow f = \frac{1}{10 \cdot 10^{-9}} = 100 \text{ MHz}$)

notre fréquencemètre $\rightarrow 20 \text{ MHz}$

$\Rightarrow$ fréquence commutation devant être inférieure à la fréquence du signal.

Aux très basses fréquences, le fréquencemètre est utilisé en période-mètre. Dans ce cas on inverse le rôle de la porte et du signal: c'est le signal à mesurer qui fournit la durée pendant laquelle l'appareil compte le nombre de porte.

Utilisation: - mesure d'une fréquence délivrée par un GEF:

$$f = 336 \pm 1 \text{ Hz}$$

vérification à l'aide d'un fréquencemètre KATEG: $f = 335 \pm 1 \text{ Hz}$

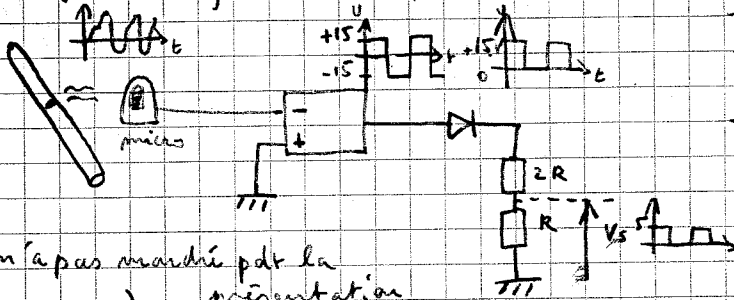
↑ entrée

+ expliquer le choix de résolution.

- mesure de la fréquence d'un instrument de musique (tuyau d'orgue)

Le fréquencemètre modifié ainsi ne peut mesurer la fréquence que de signaux carré d'amplitude 5V: il faut mettre en forme le signal avant de l'injecter dans le fréquencemètre.

mise en forme du signal:



- on utilise un AO en comparateur qui transforme n'importe quel signal périodique en créneau d'amplitude crête à crête [-15V; +15V]

- une diode redresse le signal (0; +15V)

- un pont diviseur de tension [0, 5V] → OK pour portes logiques

Le signal créneau obtenu a la même fréquence que le signal dont on veut mesurer la fréquence

$$f = \pm \text{ Hz}$$

Vérification au fréquencemètre KATEG: $f = 462 \pm 1 \text{ Hz}$

En préparation, le fréquencemètre donnait 462 Hz ou 930 Hz suivant le réglage de l'offset. / explication: → 462 et si → 930)

mais ne pas l'expliquer et de suite (l'expliquer à la fin lorsqu'on fait la FFT du signal sur synchronie et qu'on visualise la forme du signal)

II) Mesures par comparaison

Les mesures par comparaison sont des méthodes indirectes qui consistent à comparer la fréquence recherchée à une fréquence connue et fixée par l'expérimentateur.

On va rester dans le domaine acoustique et on va déterminer la fréquence d'un diapason désaccordé à l'aide d'une manivelle fixée sur une de ses 2 branches.

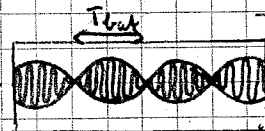
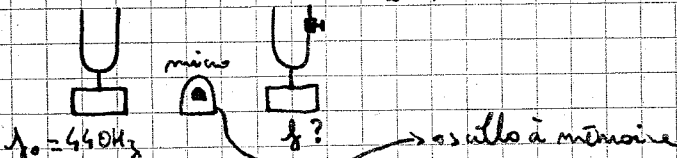
1) interférences acoustiques Quantica Nécampé p 417

Le diapason qui nous sert de référence a une fréquence de $f_0 = 440 \text{ Hz} \pm 1 \text{ Hz}$ (déterminé au fréquencemètre KATEG)

Le diapason dont on veut déterminer la fréquence a une fréquence f légèrement inférieure à f_0 (à l'oreille le son est plus grave)

La mise en vibration de ces 2 diapasons simultanément entraîne l'apparition d'interférences. Le signal récapitulé sur l'oscilloscope présente des battements de période T_{bat} et donc de fréquence $f_{\text{bat}} = \frac{1}{T_{\text{bat}}} = f_0 - f$

→ on les entend!



$T_{\text{bat}} = 47 \text{ ms} \pm 2 \text{ ms}$ (période déterminée à l'aide des curseurs et incertitude évaluée en estimant un max et un min de la période)

$\Rightarrow f_{\text{bat}} = 22 \text{ Hz}$

$\frac{\Delta f_{\text{bat}}}{f_{\text{bat}}} = \frac{\Delta T_{\text{bat}}}{T_{\text{bat}}} \Rightarrow \Delta f_{\text{bat}} = f_{\text{bat}} \times \frac{\Delta T_{\text{bat}}}{T_{\text{bat}}} = 22 \times \frac{2}{47} = 1 \text{ Hz}$

$f_{\text{bat}} = 22 \text{ Hz} \pm 1 \text{ Hz} \Rightarrow f = f_0 - f_{\text{bat}} = 440 - 22 = 418 \text{ Hz} \pm 2 \text{ Hz}$

vérification de f au fréquencemètre HAREG: $f = 417 \text{ Hz} \pm 1 \text{ Hz}$

Dans les orchestres, la méthode des battements est utilisée pour accorder les instruments entre eux.

Lorsqu'on a déterminé la fréquence des oscillations du pendule, on pouvait suivre le mouvement à l'œil nu. Pour des fréquences plus importantes (typiquement au delà de 10 Hz), cela n'est plus possible à cause de la persistance rétinienne. Pour étudier les phénomènes périodiques rapides, comme la rotation d'un moteur, on va utiliser une autre technique: la stroboscopie.

2) Stroboscopie. Duffaut Capes p 248

Le stroboscope émet des flashs lumineux à une fréquence f_{strob} réglable par l'utilisateur.

Le but ici va être de déterminer la fréquence de rotation f_{rot} d'un disque noir comportant un secteur blanc.

Le disque est entraîné par un moteur à courant continu dont la vitesse de rotation dépend de la tension appliquée.

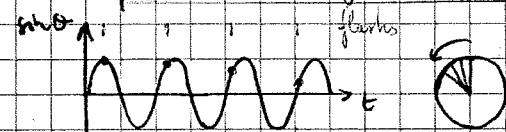
étude des 3 cas: (pour un disque tournant dans le sens des aiguilles d'une montre)

f_{strob} très légèrement inférieure à f_{rot} :



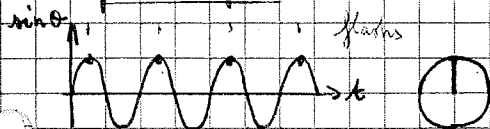
Le disque fait un peu plus d'un tour entre chaque flash lumineux $\Rightarrow$ le secteur se déplace dans le sens de rotation du disque.

f_{strob} très légèrement supérieure à f_{rot} :



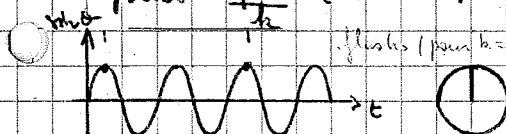
Le disque fait un peu moins d'un tour entre chaque flash lumineux $\Rightarrow$ le secteur se déplace dans le sens inverse de rotation du disque.

$f_{\text{strob}} = f_{\text{rot}}$:

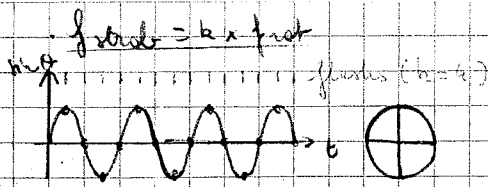


Le disque fait un tour entre chaque flash lumineux $\Rightarrow$ le secteur paraît immobile.

$f_{\text{strob}} = \frac{f_{\text{rot}}}{k} \quad (k \in \mathbb{N})$



Le disque fait k tours entre chaque flash lumineux $\Rightarrow$ le secteur paraît là aussi immobile.



Le disque n'a le temps de faire qu' $\frac{1}{k}$ tours entre chaque flash lumineux $\Rightarrow$ k secteurs immobiles

La "vraie" fréquence de rotation est la plus haute fréquence du stroboscope donnant l'immobilité d'un seul secteur.
 Pour être sûr qu'on est à la bonne fréquence, il suffit de vérifier qu'en doublant la fréquence on obtient 2 secteurs immobiles.
 $f_{rot} = 2 \cdot f_{st}$

$\Rightarrow 2 f_{st} = 2900 \text{ Eclairs/min} \Rightarrow f_{rot} = 1450 \text{ min}^{-1} \pm 20 \text{ min}^{-1}$

+ autre méthode: $f_{rot} = \frac{f_{st}}{k}$ (avec f_{st} = fréquence de 2 immobilités successives d'un seul secteur en 1 seconde) $\Rightarrow f_{st} = \frac{1450}{60} = 24 \text{ Hz} \pm 0,3 \text{ Hz}$

L'incertitude sur f_{rot} peut être évaluée en regardant de combien on peut varier la fréquence et en gardant l'immobilité apparente.

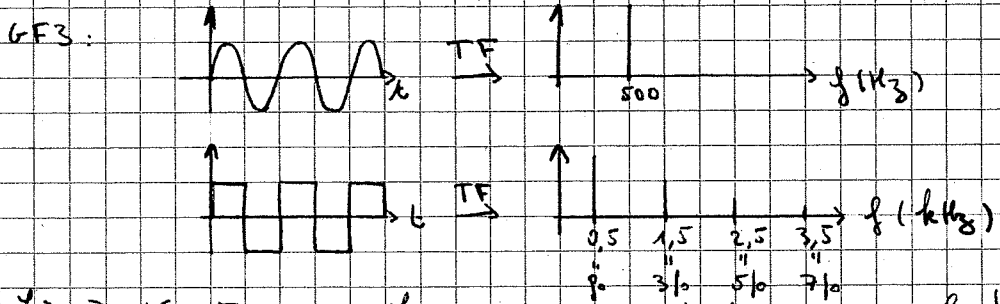
(+ note: Une autre source d'incertitude provient de la stabilité de la rotation)

La stroboscopie est utilisée dans l'industrie pour analyser les vibrations des machines

III Analyse de Fourier Duffaut électronique p47

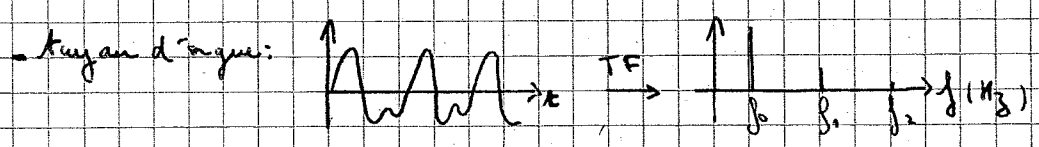
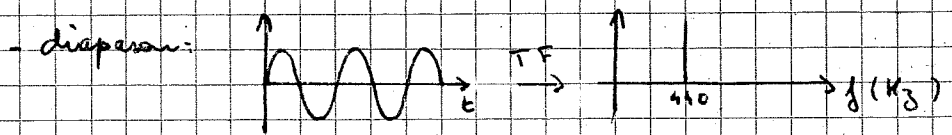
La transformée de Fourier permet de passer d'une description temporelle à une description fréquentielle. On obtient des spectres qui permettent d'extraire des infos plus précises dans l'étude des signaux. C'est d'autant plus intéressant que la plupart des signaux, en pratique, contiennent plusieurs fréquences.

Observation de spectres en synchronie:



Là où d'autres appareils nous auraient donné que la fréquence de 500 Hz, la transformée de Fourier nous donne toutes les fréquences contenues dans le signal original.

Analyse spectrale de sons:



$$f_0 = 463 \text{ Hz}$$

$$f_1 = 923 \text{ Hz}$$

$$f_2 = 1391 \text{ Hz}$$

17

Le fréquencesmètre ne nous avait donné que la fréquence du fondamental. Grâce à l'analyse spectrale, on a pu accéder aux harmoniques (qui sont des multiples du fondamental).
résolution: $\propto$ avec le tps d'acquisition

⚠ durée finie de l'enregistrement + fréquence d'échantillonnage + nombre de points ont des conséquences sur le spectre.

Conclusion: On a vu dans ce montage plusieurs méthodes pour déterminer des fréquences et ce dans divers domaines de la physique (mécanique, électronique, acoustique...)
On ne s'est pas intéressé aux fréquences optiques. Elles ont pourtant un intérêt primordial pour le maintien de l'étalon du mètre ($\rightarrow$ FPZ9 mesure de longueurs)

Q/rem: Comment s'effectue le comptage (fréquencesmètre)?

I) 2)

- Que fait le comparateur simple? est-ce que ça suffit? (effet, ploi pb?)
 - regarder à l'oscilloscope en + pts du montage pour trouver le pb. regarder avec une vrai sinus à l'entrée.
 - est-ce qu'on peut vraiment parler d'interférences?
non, ici ce sont des battements (cf sodium) $\rightarrow$ oscillations temporelles.
 - C'est quoi des interférences? $\rightarrow$ il faut des ondes de même fréquence
 - ploi la même désaccord?
 - ploi une diaphonie a un son aussi pur? (alors qu'on parle $\rightarrow$ excitation riche en modes)
- II) 1)
- intérêt de la mesure par comparaison?
 $\rightarrow$ permet de déplacer la plage de mesure (fréquencesmètre entre 0 et 1 kHz + étalon)
 $\rightarrow$ précision (accord)
 - incertitudes de mesure des battements? min et max, différence 1 ms. ou 2 ms $\leftrightarrow$ T_{beat} $\rightarrow$ incertitude dominée par la précision sur la référence (440) $\rightarrow$ dans
 - Comment diminuer les incertitudes de mesure? en prenant plusieurs périodes pour diviser l'incertitude.

III

- incertitude de synchronisme? pas de fréquence $\rightarrow$ durée d'acquisition du signal. 1 pixel correspond à 1 durée d'échantillonnage
- intérêts/applications des mesures de fréquences?
 - $\rightarrow$ longueur (via la vitesse)
 - $\rightarrow$ toute grandeur entrant dans ω d'un oscillateur (C, L, k, g, L...)
 - $\Rightarrow$ multimètres constantes diélectriques
- autre manip possible: Klystron + diode Gunn
 - $\rightarrow$ battements entre les 2 émetteurs
 - $\rightarrow$ accord des sources à 10 GHz à 500 kHz près