MP30 - Acoustique

May 18, 2019

Contents

- 2017 : Ce montage se limite souvent à la mesure de la célérité du son dans l'air et à l'étude du diapason. La propagation dans d'autres milieux que l'air est appréciée par le jury. L'utilisation de la représentation de Lissajous pour mettre en évidence les passages en phase n'est pas généralisée. L'utilisation d'émetteurs et récepteurs ultrasonores est répandue, mais leur principe de fonctionnement doit être connu. Par ailleurs, certains dispositifs commerciaux conduisent à des réflexions parasites qui perturbent les mesures. Le choix de dispositifs plus performants conduit à des mesures plus satisfaisantes.

- 2012 : Le jury attend des notions plus variées que les seules mesures de célérité. On peut penser : (i) aux phénomènes de réflexion-transmission, d'interférences et de diffraction, de modes... (ii) aux notions d'impédance acoustique, de timbre, de hauteur, d'effet Doppler... (iii) aux nombreuses applications : instruments de musique, sonar, échographie.

Bon courage !

Références :

- **Jolidon** pour presque tout.
- : L. Q UARANTA , Dictionnaire de physique expérimentale, Tome I : La mécanique, Pierron (2002) **[Quaranta I]** pour le trombone de König
- : R. D UFFAIT , Expériences de physique - CAPES de sciences physiques, Bréal (2011) **[Duffait CAPES]** pour les battements

Introduction

Lorsque vous me parlez de son, je pense directement au dernier tube à la mode. En effet, la musique est un art qui repose sur l'utilisation et la maîtrise de l'acoustique. Cependant, si ce domaine d'application est très important, l'acoustique ne se limite pas à l'étude des sons audibles (20 Hz – 20 kHz).

D'abord, on va caractériser le son en temps qu'onde par sa propagation et sa capacité à interférer. Ensuite, on va venir à 2 types d'applications de ses propriétés. Les instruments de musique qui utilisent le principe de cavité résonnante et les radars routiers qui utilisent l'effet Doppler.

1 Propagation : Mesure de la vitesse du son dans l'air

Jolion p517 Pour le fonctionnement des émetteurs et détecteurs d'ultrasons voir Jolidon p526/527

Insister sur le fait que ce sont des ultrasons.

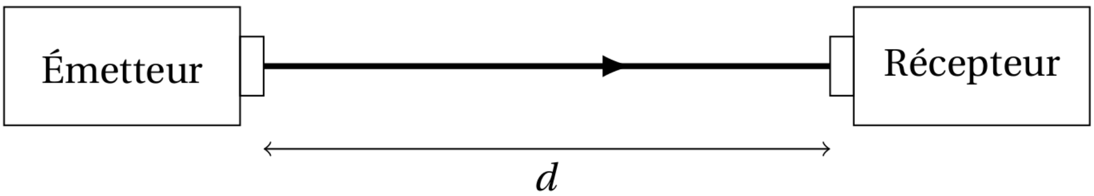


Figure 1: Figue issue du poly de Jeremy Ferrand

Experience :

- Placer l'émetteur ultrasonore P73.23 au niveau du 0 d'une grande règle (graduée) en bois que l'on scotchera à la table tout comme L'émetteur et l'alimenter par des bursts carrés) de quelques volts autours de 40 kHz à l'aide d'un GBF.
- Placer le récepteur P73.23 en face contre la règle.
- observer le signal aux bornes de l'émetteur sur un oscilloscope. Regarde aussi le signal de l'emmeteur pour trigger facilement et pour avoir une référence de temps.
- Coller le récepteur à l'émetteur (0 sur la règle) et regarder la forme du signal tandis qu'on le déplace le long du banc. Choisir alors une caractéristique facilement

identifiable quelque soit la distance choisie.

- Pour plusieurs distances entre l'emetteur et le récepteur (dont 0), mesurer le temps Δt entre l'émission et la réception)
- Créer la variable $\tau(d) = \Delta t(d) - \Delta t(0)$
- tracer $d(\tau)$. Faire un fit affine $d = a\tau + b$
  - b est un artefact de la position de l'emetteur/récepteur dans les becs qu'on a pris comme ref; C'est intéressant.
  - a=c_g la vitesse de groupe.

On compare à la loi dans l'approximation acoustique[1] avec l'hypothèse adiabatique (formule valable jusqu'à 6 GHz :

$$c_th = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \tag{1}$$

où : $M = 28.8\,10^{-3}\ kg.mol^{-1}$,$\gamma = 1.4 = 7/5$ (gaz parfait diatomique) et $R = 8.314\ J.mol^{-1}K^{-1}$

Comparer les deux mesures ! attention ! les deux ont une incertitude :

1.1 Incertitudes :

Mesure de c :
Source :

- mesure de Δt a toi de l'estimer à l'oscilloscope.
- la mesure de longueur d Deux mesures au maître : soit l'épaisseur du trait $+1mm/\sqrt{12}$ (lecture à la règle.
- l'incertitude sur c_g est donnée sur le fit.

Mesure de c_th :
Sources :

- Bein surtout la température. Comme on lit sur un thermomètre gradué : 1graduation/sqrt 12

donc :

$$u(c) = c \times \sqrt{\frac{1}{2}\left(\frac{u(T)}{T}\right)^2}$$

2 Interférences : Battements acoustiques

Duffait CAPES] p.293

Nous allons illustrer le phénomène de battements acoustiques à l'aide de diapasons. Rappelons qu'un diapason est formé de deux branches métalliques en U qui peuvent vibrer à une fréquence fixe extrêmement stable. La caisse de résonance[2] sous le diapason permet entre autre une adaptation d'impédance avec le reste de la pièce.

[1] Voir leçon LP25 p4

[2] Il y a deux aspects à garder à l'esprit : le diapason seul sonne longtemps et peu fort car il y a mauvaise adaptation d'impédance :

- La boite avec son ouverture assure une bonne adaptation d'impédance, c'est à dire que le son arrive bien à sortir.

Experience :

- Frapper un diapason à 440 Hz P71.6 avec un marteau P71.33 et mesurer sa fréquence sur un oscilloscope avec un micro P74.37 (demandez-le aux techniciens) relié à un adaptateur P74.38.
- En fixant une masselotte sur l'une des branches d'un diapason, cela abaisse légèrement sa fréquence de résonance. Le son est d'autant plus grave que la masselotte est proche de l'extrémité de la branche.
- Fixer une petite masselotte P71.27 vers le centre de l'une de ses branches, et mesurer le décalage en fréquence du diapason sur l'oscilloscope (de l'ordre de quelques Hz). Mettre en regard la caisse de résonance du diapason avec celle d'un autre diapason à 440 Hz sans masselotte.
- Mettre le micro entre les deux boites en vis-à-vis.
- Frapper les deux diapasons et observer des battements acoustiques sur l'oscilloscope (on peut également les entendre à l'oreille).
- Mesurer la fréquence de ces battements, elle correspond au décalage en fréquence dû à la masselotte. On retrouve le phénomène de battement dans différents domaines de la physique ondulatoire, en particulier en optique.

On retrouve le phénomène de battement dans différents domaines de la physique ondulatoire, en particulier en optique. Penser aux brouillages lors de l'étude du doublet du sodium avec un Michelson

2.1 (optionnel) Détection synchrone

Multiplier le signal du micro par un sinus d'amplitude à peu près 440 Hz Puis filtrer passe bas en dessous de 440 Hz. Et voilah !

2.2 Détection d'enveloppe

Duffait Expériences d'électronique p.215

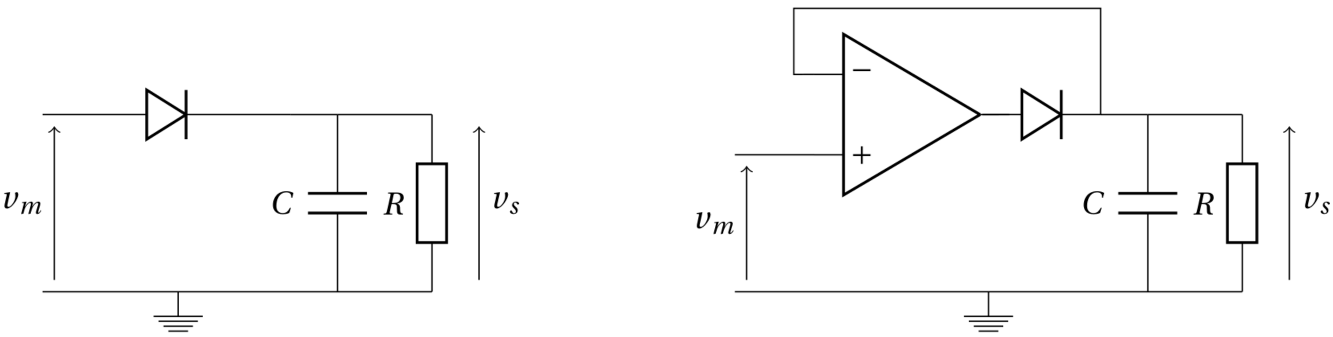
Deux possibilités s'offrent à nous. le premier est le détecteur naif. Si on veut s'affranchir du seuil à 0.6 V de la diode, on peut faire le montage à diode sans seuil qui utilise un OA. Moi je fais le simple parce que c'est suffisant pour les grandes amplitudes quitte à mettre en évidence la déformation du signal.

Le temps caractéristique $\tau = RC$ du détecteur d'enveloppe doit respecter les conditions suivantes :

- $\tau >> 1/f$, sinon le signal en sortie du détecteur de crête suit les oscillations de la porteuse, alors que nous voulons suivre l'enveloppe.

- Mais, pour que cela fonctionne, il faut que la boite soit accordée avec le diapason de sorte que la fréquence de résonance des deux coïncide Cela permet à l'énergie d'être transférée intégralement du diapason à la boite.

D'autres considérations sur ce couplage et le fonctionnement d'un diapason sont évoquées dans l'annexe5.1 C'est pourquoi, la taille de la boite doit être très précise.



(a) Avec simple diode. (b) Avec diode sans seuil.

Figure 2: Figue issue du poly de Jeremy Ferrand

- $\tau < 1/f$, sinon le signal en sortie n'accroche pas les oscillations lentes de l'enveloppe.

Il y a donc un compromis à réaliser. Cela est d'autant plus facile que les fréquences de la porteuse et du signal informatif sont éloignées. Ici, on aura peu de soucis.

Experience :

Bein, faire le montage a. Si la sortie est nulle essayer d'amplifier. Si ça ne marche toujours pas, essayer le b.

utiliser un fréquencemètre pour mesurer la fréquence δf de l?enveloppe.

Ce qui nous intéresse, c'est ce δf.

ATTENTION : Vérifier que l'amplitude des crêtes soit toujours supérieure à $0,7\ V$, sinon la tension de sortie du détecteur de crête est nulle à cause du seuil de la diode. Auquel cas, il faut soit amplifier, soit faire le montage sans seuil.

REMARQUE : les diodes signal 1N4148 ou 1N4107 peuvent déformer le signal si on travaille à trop haute fréquence. Ne pas dépasser 100 kHz. Évolution du montage : on rappelle le montage de détection avec diode sans seuil. Ce montage permet de s'affranchir de la tension de seuil de la diode et donne donc un meilleur résultat lors de la démodulation.

2.3 Incertitudes :

Directement celle donnée par le fréquencemètre.

3 Instruments de musique : cavités résonnantes :Trombone de König

[Quaranta I] à « Sons (propagation libre des) », [Duffait CAPES] p.287

Comme cavité, on utilise le trombone de König :

On envoie à l'aide d'un haut-parleur une onde à l'entrée du trombone.
Une partie de l'onde parcourt la branche gauche du trombone de longueur fixe.

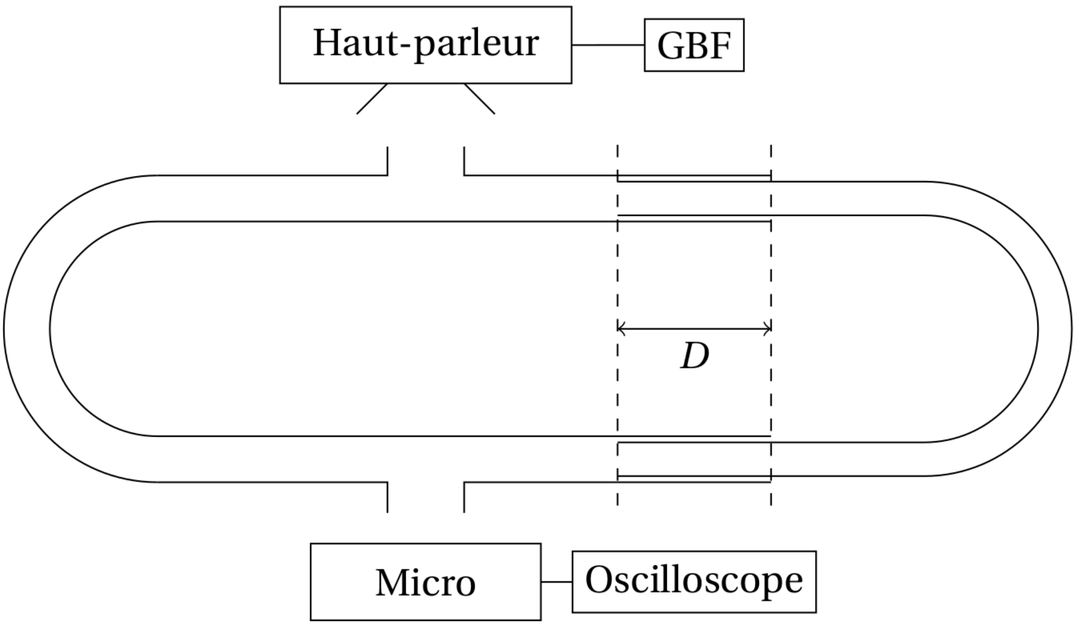


Figure 3: Figue issue du poly de Jeremy Ferrand

L'autre partie de l'onde parcourt la branche droite du trombone qui est mobile.
En déplaçant la coulisse d'une distance D, on faire varier la longueur de la branche de $2D$. Au niveau de la sortie, les deux ondes se rejoignent et interfèrent. Entre deux maxima ou deux minima successifs, alors qu'on bouge la coulisse, la différence de chemin acoustique a varié d'une longueur d'onde, soit $\lambda = 2D$.

Le trombone étant un système fermé, il peut également développer des ondes stationnaires et un phénomène de résonance à l'intérieur de celui-ci, mais cela n'empêche pas l'observation des interférences.

Experience :

Fixer des cornets P71.21 sur les embouchures du trombone de König P72.2. Placer un haut-parleur P74.29 alimenté par un GBF devant l'un des cornets du trombone. Placer un micro P74.37 (demandez-le aux techniciens) devant l'autre cornet, et le relier à un adaptateur P74.38 puis à un oscilloscope.

- Générer une onde de fréquence fixe avec le haut-parleur ($f = 1$ kHz par exemple).
- Déplacer la coulisse et relever les positions D n correspondant aux n maxima (ou minima) successifs. On pourra utiliser le mode Haute résolution de l'oscilloscope.
- Réaliser la régression linéaire de D_n en fonction de n et remonter au coefficient directeur $\frac{\lambda}{2}$.
- Puis, mesurer la fréquence f utilisée au fréquencemètre. Trouver alors la vitesse de phase du son dans l'air $c_\phi = f \times \lambda$.

Deux chosesà faire ressortir :

* D'abord, on a vu que l'on pouvait faire varier la longueur du tuyeau pour que notre fréquence excitatrice fixe soit celle d'un mode propre. Donc, la longueur d'onde des

modes propres est bien reliée à la longueur du tuyau.
Habituellement, on excite avec un Dirac (guitare/piano) et ce sont seulement les harmoniques qui sortent. On peut essayer de le faire avec l'oscillo pour l'aspect qualitatif.

* Ensuite, on a mesuré la vitesse de phase C'est un bonus appréciable qui nous permet de vérifier une conséquence de d'Alembert et de réutiliser la première expérience. Tout est lié !

3.1 Incertitudes :

Sources :

- sur f (la mesurer au fréquencemètre)
- sur D_n : graduation/ $\sqrt{12}$
- sur λ, donnée par le fit. (attention au facteur 2)

$$u(c_\phi) = c_\phi \times \sqrt{\left(\frac{u(f)}{f}\right)^2 + \left(\frac{u(\lambda)}{\lambda}\right)^2} \tag{2}$$

3.2 Commentaire éclairé : (ou du moins, espérons le !)

Cette fois-ci, on a mesuré la vitesse de phase et pas celle de groupe. On peut alors comparer à la première valeur de c obtenue. L'équation de d'alambert pour le son assure que ces deux sont égales.

4 Effet Doppler : Radar et détection synchrone

Jolidon p540 Utilisation pratique : radar routier[3]

On se souvient de l'ambulance dont la fréquence perçue de la sirène change en fonction de la vitesse relative;. En pratique, la police n'utilise pas ce phénomène dans le domaine audible pour des raisons de bruit (beaucoup de bruit dans l'audible). Ils préfèrent se placer à des fréquences plus élevées.

4.0.1 Principe :

Considérons un émetteur ultrasonore qui émet une onde à la fréquence f_e . Si cet émetteur se rapproche d'un récepteur à la vitesse v, la fréquence détectée par le récepteur f_p vaut, par effet Doppler :

$$f_p = \frac{C_{son}}{C_{son} - v} f_e \tag{3}$$

[3] Ils ont les caractéristiques suivantes :

- fréquence d'émission : 24, 125 GHz
- étendue de mesure : $10 - -300$ km h^{-1}
- Incertitude type : 1 km h^{-1}

Pour une vitesse v de l'émetteur de l'ordre de quelques cm/s, beaucoup plus faible que la vitesse du son c_{son} , on peut alors développer cette expression au premier ordre et exprimer l'écart en fréquence dû à l'effet Doppler :

$$\delta f = f_p - f_e \approx \frac{v}{C_{son}} f_e << f_e \tag{4}$$

Cet écart en fréquence est trop faible pour pouvoir distinguer f_e et f_p sur un oscilloscope. Nous allons alors réaliser une détection synchrone afin de mesurer δf . Le principe de la détection synchrone est détaillé dans [Jolidon] p.541, auxquels vous pouvez vous référer pour plus de détails.

Rappelons qu'elle consiste à multiplier le signal de fréquence inconnue f mesurée par un signal de fréquence connue f_r pour obtenir un signal contenant une composante harmonique à $\delta f = f - f_r$ et un autre à $f + f_r$

On accède ainsi facilement à l'écart en fréquence dû à l'effet Doppler.

4.0.2 Expérience : dispositif de mesure

Nous allons utiliser le dispositif Jeulin P73.23 , schématisé en figure 4.6. Le boitier Doppler par ultrasons permet d'obtenir directement le résultat de la détection synchrone, mais la qualité du signal émis est mauvaise, et il ne permet pas d'observer les étapes intermédiaires de la détection synchrone. **Nous ne l'utiliserons donc que pour contrôler la vitesse du moteur**.

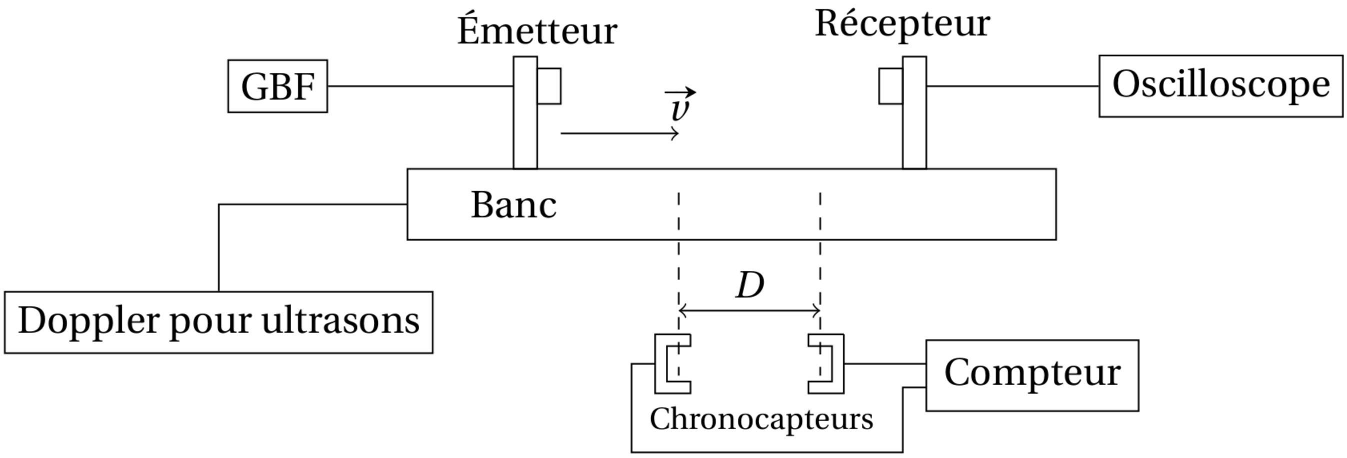


Figure 4: Figue issue du poly de Jeremy Ferrand

Experience :
Alimenter le moteur du banc P73.23 à l'aide du boitier "Doppler par ultrasons" P73.23. Placer l'émetteur ultrasonore P73.23 sur la partie mobile du banc P73.23, et l'alimenter par une tension sinusoïdale de quelques volts à l'aide d'un GBF. Placer le récepteur P73.23 sur la partie fixe à droite du banc et observer le signal à ses bornes sur un oscilloscope. Comme précédemment, chercher la fréquence de résonance des transducteurs (autour de 40 kHz) pour vous y placer.

Nous allons mesurer la vitesse v du banc en mesurant le temps ΔT mis pour parcourir une distance D séparant deux capteurs.

Experience :

- c de telle sorte que la petite languette de la partie mobile du banc passe dans les fourches au cours du déplacement. Séparer les deux fourches d'une distance $D = 20$ cm mesurée précisément à la règle ou au palmer.
- Placer deux chronocapteurs à fourche P96.27 le long du banc
- Relier les fils Signal et Masse du premier capteur aux bornes Départ d'un chronocompteur P96.26, réglé sur Ouverture, et les fils du second capteur aux bornes Arrêt réglé sur Ouverture. Sélectionner le mode chrono. Relier les deux fils Alimentation aux bornes rouges 3,5 V. Faire avancer l'émetteur vers le récepteur en contrôlant la vitesse et le sens du déplacement avec le boîtier (les câbles d'alimentation de l'émetteur ne doivent pas être tendus au cours du déplacement sinon ils risquent de ralentir le banc).
- Mesurer le temps ΔT entre le passage des deux fourches pour en déduire la vitesse du banc $v = D/T$ (quelques cm/s).
- Mesurer la fréquence f_p du signal reçu par le récepteur. Elle doit être voisine de 40 kHz. Zut ! comment mesurer la différence de fréquence plus facilement ?

Le décalage en fréquence δf dû à l'effet Doppler est de l'ordre de quelques Hz. Il n'est pas mesurable de façon directe à l'oscilloscope, d'où l'intérêt de la détection synchrone.

4.1 Expérience : Détection synchrone

Experience :

- À l'aide d'un multiplieur P41.15, multiplier le signal reçu par le récepteur avec la tension du GBF. Filtrer le signal en sortie du multiplieur par un filtre passe-bas[a] d'ordre 4 P41.21 réglé sur 10 Hz et alimenté en ±15 volt.
- Pour différentes vitesses v, mesurer la fréquence δf des oscillations (fréquencemètre ou oscilloscope) à la sortie du filtre, qui correspond au décalage en fréquence dû à l'effet Doppler.
- Utiliser le mode Défilement de l'oscilloscope et maintenir le signal affiché sur l'écran avec le bouton Run Stop pour réaliser la mesure (δf est de l'ordre du Hz).
- Tracer δf en fonction de v , puis réaliser une régression linéaire et remonter à la vitesse du son dans l'air c_{son} à l'aide du coefficient directeur.

[a] Pour ceux qui n'aiment pas les boites noires : Un simple filtre passe-bas RC de fréquence de coupure 10 Hz est suffisant pour la mesure de δf.

Il peut alors être sympathique de tracer une courbe $\delta f(v)$ et de vérifier la formule précédente :

$$\delta f = f_p - f_e \approx \frac{v}{C_{son}} f_e << f_e \tag{5}$$

Fiter donc $\delta f(v) = a \times v$

Je propose de comparer $\alpha = a \times c_{son}$ à f_e mesurée au fréquencemètre.
c_{son} est par exemple obtenue dans la partie 1 et 3.

4.2 Incertitudes :

Mesure de $v = \frac{D}{\Delta T}$:
Source :

- mesure de ΔT C'est le dernier digit du compteur je pense.
- la mesure de longueur D : $+1mm/\sqrt{12}$ (lecture à la règle.

$$u(v) = v \times \sqrt{\left(\frac{u(D)}{D}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta T)}{\Delta T}\right)^2}$$

Mesure de δf et puis de f_e :
Sources :

- Les deux au fréquencemètre.

$$u(\alpha) = \alpha \times \sqrt{\left(\frac{u(c_{air})}{c_{air}}\right)^2 + \left(\frac{u(a)}{a}\right)^2}$$

Conclusion

On s'est intéressé à quelques unes des applications dans l'air[4]. Cependant, le son peut se propager dans d'autres milieux matériels) comme le solide. Le son se propage aussi dans les liquides.

5 Annexe

5.1 Réflexions sur le diapason et conséquences

Quand on a parlé de diapason, on a en fait ici étudié **le diapason et sa caisse**[5] La caisse est en fait une cavité résonnante censée n'amplifier que le fondamental du diapason. Comme elle a un plus faible facteur de qualité, c'est d'avantage elle que l'on a étudiée ici que le diapason[6]

[4]Une très belle application est l'utilisation de la vitesse du son comme thermomètre **primaire** (pas besoin de Ref, la loi physique suffit). Ce qu'on fait parfois dans les cryostats d'ailleurs. On utilise un tube de Kundt (Jolidon p 529)

[5]Son facteur de qualité est tel que :

$$\frac{1}{Q_{ensemble}} = \frac{1}{Q_{boite}} + \frac{1}{Q_{diapason}} + \frac{1}{Q_{couplage}} \tag{6}$$

où $Q_{diapason}$ est celui du diapason (très élevé), Q_{boite}, celui de la cavité résonnante $\lambda/4$, et $Q_{couplage}$ qui quantifie l'efficacité du transfert d'énergie entre les deux. On considère un transfert sans pertes : $Q_{couplage} = +\infty$. Pour remonter à $Q_{diapason}$, il faut faire de même avec le diapason sans la boite. Mais le signal du micro est faible et il faudrait l'amplifier...

[6]Pourquoi fixe-ton le diapason par un pied ? Pourquoi est-il symétrique ?
Un diapason est constitué de deux oscillateurs que sont chacun de ses bras mécaniques. Ces deux oscillateurs sont bien entendu couplés. Le diapason lui-même résonne pour deux fréquences qui correspondent à un mode symétrique et un antisymétrique, légèrement décalés en fréquence l'un de l'autre.
En fixant la position du pieds (poignée) du diapason, on impose un 0 au milieu. On sélectionne alors le mode antisymétrique. On n'a plus qu'une seule fréquence et on peut s'accorder.

seul. Cette cavité est de longueur $\lambda/4$ par rapport à la longueur d''onde du diapason pour ne résonner que pour le fondamental de la fréquence du diapason.