

Principe d'un anémomètre à déphasage

par Cédric MULET-MARQUIS

Département mesures physiques
Institut universitaire de technologie (IUT) - 86100 Châtellerault
cedric.mulet.marquis@univ-poitiers.fr

LA PREMIÈRE IMAGE que l'on se fait d'un anémomètre est le plus souvent celle d'un dispositif avec des pales ou des coupelles tournant plus ou moins vite selon la vitesse du vent. Nous présentons dans cet article un anémomètre sans pièces mobiles basé sur le déphasage entre les tensions aux bornes d'un émetteur et d'un récepteur d'ultrasons.

INTRODUCTION

Il existe différents types d'anémomètres. Le plus courant est celui où le vent met en rotation des coupelles ou des pales. La vitesse de rotation des coupelles ou des pales est proportionnelle à la vitesse du vent. On pourra consulter [1-2] pour la fabrication d'un tel anémomètre.

L'anémomètre à fil chaud utilise la variation de résistance d'un fil métallique avec la température : plus le vent souffle fort sur le fil chaud, plus il est refroidi et plus sa résistance diminue.

La figure 1 montre deux exemples d'anémomètres à pales et un anémomètre à fil chaud.



Figure 1 - Exemples de sondes d'anémomètres. **1** Anémomètre à fil chaud (la résistance est au bout de la flèche) ; **2** et **3** Anémomètre à pales.

L'anémomètre laser utilise la variation de fréquence entre un faisceau laser émis en direction de l'atmosphère et rétrodiffusé vers l'appareil par les particules en suspension, et un autre faisceau laser de référence.

L'anémomètre à tube de Pitot utilise la différence entre la pression statique et la pression dynamique, pressions qui sont reliées par la relation de Bernoulli. Des problèmes sur les anémomètres à tube de Pitot ont sans doute en partie causé la disparition en mer d'un avion d'Air France assurant la liaison entre Paris et Rio en 2009.

L'anémomètre auquel nous allons nous intéresser utilise la variation de temps de propagation, c'est-à-dire le déphasage pour des tensions périodiques, entre un émetteur et un récepteur d'ondes acoustiques (dans notre cas, des ultrasons). Voyons plus précisément comment il fonctionne.

1. PRINCIPE

Intéressons-nous à un émetteur et un récepteur d'ondes acoustiques sinusoïdales de période T , séparés par une distance D , et situés l'un en face de l'autre. En absence de vent, le temps mis par l'onde sonore pour aller de l'émetteur au récepteur est $t_0 = \frac{D}{c}$ où c est la vitesse du son.

Imaginons à présent que le vent se mette à souffler de l'émetteur vers le récepteur en ligne droite à la vitesse V (pour simplifier le raisonnement, nous écartons volontairement le cas où le vent soufflerait de biais). Le cas où le vent soufflerait en sens inverse se déduit en changeant le signe de V .

L'onde acoustique se déplace toujours à la vitesse c par rapport au fluide. Comme ce fluide est en mouvement par rapport à l'émetteur, le temps mis par l'onde acoustique pour aller de l'émetteur au récepteur est maintenant $t_1 = \frac{D}{V+c} = \frac{D}{c} \times \frac{1}{1 + \frac{V}{c}}$.

Comme nous allons nous intéresser à des vitesses petites par rapport à la vitesse du son, nous avons $t_1 \cong t_0 \times \left(1 - \frac{V}{c}\right)$. La différence $\Delta t = t_1 - t_0$ des deux temps de propagation vaut donc $\Delta t = -t_0 \frac{V}{c}$ soit $\Delta t = -\frac{D}{c} \times \frac{V}{c}$. Le déphasage résultant est

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta t}{T} = -2\pi \frac{D}{cT} \times \frac{V}{c}.$$

Comme le produit cT est égal à la longueur d'onde λ , nous obtenons finalement

$$\Delta\varphi = -2\pi \frac{D}{\lambda} \times \frac{V}{c}. \quad (1)$$

En visualisant conjointement la tension aux bornes de l'émetteur et celle aux bornes du récepteur, nous verrons la différence de phase entre ces deux courbes varier en présence d'un flux d'air.

Remarquons qu'il n'y a pas d'effet Doppler à prendre en compte ici puisque la distance entre l'émetteur et le récepteur est fixe (on pourra lire [3] pour une étude de l'effet Doppler). La fréquence de l'onde reçue est identique à celle de l'onde émise. Pour le dire autrement, l'effet du vent est de décaler en bloc les instants de réception des maxima, par exemple, mais pas d'allonger ou de diminuer la durée entre ces instants.

Pour éviter les ambiguïtés sur la valeur de la vitesse, la valeur de $\Delta\varphi$ doit être comprise entre -2π et 2π . Cela impose une vitesse maximale égale en valeur absolue à

$$V_{\max} = \frac{\lambda}{D} \times c \quad (2)$$

Remarque 1

Sur le même principe, on peut imaginer un thermomètre. L'annexe détaille quelques calculs.

Remarque 2

Plutôt que d'utiliser des ondes sinusoïdales et une émission en continu pour mesurer le déphasage entre l'émetteur et le récepteur, il est possible d'émettre par salves et de mesurer la variation du décalage temporel entre l'émission et la réception des ondes acoustiques lorsqu'il existe un flux d'air. Des essais ont été réalisés avec cette deuxième méthode, mais n'ont pas été concluants (voir le début de la partie 3).

2. DESCRIPTION DU MONTAGE

2.1. Fréquence des ondes acoustiques

Pour savoir dans quelle gamme de fréquences travailler, utilisons la formule (1). Si l'on souhaite avoir une valeur minimale pour $\Delta\varphi$ d'environ 5° , soit 0,1 rad, pour une vitesse de l'ordre du mètre par seconde ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), il faut avoir $\frac{D}{\lambda}$ au moins égal à 5 (ce qui donnerait d'après la formule (2) une valeur maximale mesurable d'environ $70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ soit $250 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$). Pour avoir un montage qui ne soit pas trop encombrant, il faut donc travailler avec de faibles longueurs d'onde. Nous nous placerons donc dans le domaine des ultrasons, dans notre cas à une fréquence de 40 kHz (c'est la fréquence de travail des émetteurs et récepteurs dont nous disposons).

2.2. Canalisation du flux d'air

Pour créer le flux d'air, un petit ventilateur alimenté en tension continue (par exemple un ventilateur récupéré sur un vieil ordinateur hors d'usage) est utilisé. Le flux d'air est canalisé en plaçant l'émetteur et le récepteur d'ultrasons dans un tube fabriqué avec deux feuilles de papier au format A3 accolées l'une derrière l'autre. Une petite échancrure le long du tube permet de déplacer l'émetteur et le récepteur, comme

illustré sur la figure 2. En absence du tube, l'expérience est moins facile (entre autres à cause de la rapide diminution de la vitesse du flux d'air généré par le ventilateur et de l'absence de protection contre les flux d'air extérieurs à l'expérience).



Figure 2 - Tube en papier utilisé pour canaliser le flux d'air généré par un ventilateur. Le récepteur peut être déplacé dans le tube en couissant dans l'échancrure. L'émetteur, non visible sur la photo, est aussi placé dans ce tube.

2.3. Amplification de la tension aux bornes du récepteur d'ultrasons

La tension aux bornes du récepteur d'ultrasons est amplifiée avec un montage amplificateur inverseur utilisant un amplificateur opérationnel et représenté sur la figure 3.

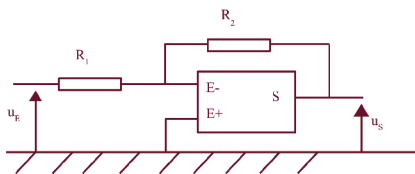


Figure 3 - Montage amplificateur inverseur à amplificateur opérationnel utilisé pour amplifier la tension aux bornes du récepteur. Comme il est d'usage, l'alimentation +15 V/-15 V de l'amplificateur opérationnel n'est pas représentée.

La relation entre la tension d'entrée u_e et la tension de sortie u_s s'écrit

$$u_s = -\frac{R_2}{R_1} u_e.$$

Nous aurons besoin d'une amplification de quelques fois. Une valeur de R_1 de quelques kilohms ($k\Omega$) jusqu'à quelques dizaines de kilohms environ (dans le

montage utilisé $R_1 = 33 \text{ k}\Omega$), et une valeur de R_2 de quelques dizaines de kilohms à quelques centaines de kilohms (dans le montage utilisé $R_2 = 330 \text{ k}\Omega$) donnent de bons résultats pour des amplifications de quelques fois à quelques dizaines de fois.

Ces valeurs de résistances sont bien entendu indicatives. Chacun doit les adapter en fonction des caractéristiques du récepteur d'ultrasons. On vérifiera en particulier que l'impédance du récepteur est faible devant l'impédance d'entrée du montage inverseur. Faute de quoi, la tension aux bornes du récepteur, quand celui-ci est relié à l'amplificateur, est notablement plus faible que la tension à vide en sortie du récepteur lorsque celui-ci n'est pas relié à l'amplificateur.

2.4. Vue d'ensemble

L'ensemble du montage est sur la figure 4.

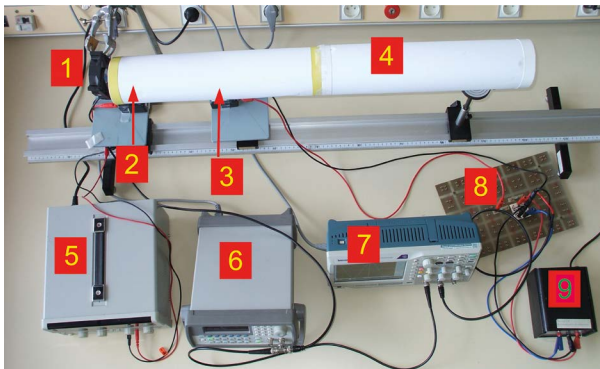


Figure 4 - Montage pour l'étude de l'anémomètre à déphasage. **1** Ventilateur ; **2** Émetteur d'ultrasons (la flèche indique la position de l'émetteur à l'intérieur du tube de papier) ; **3** Récepteur (la flèche indique la position du récepteur à l'intérieur du tube de papier) ; **4** Tube de papier pour canaliser le flux d'air généré par le ventilateur ; **5** Alimentation continue du ventilateur ; **6** GBF alimentant l'émetteur ; **7** Oscilloscope relié à l'émetteur en voie 1 et à la tension amplifiée du récepteur en voie 2 ; **8** Amplificateur inverseur à amplificateur opérationnel relié au récepteur ; **9** Alimentation + 15 V/- 15 V de l'amplificateur opérationnel.

2.5. Relation entre la tension U aux bornes du ventilateur et la vitesse V du flux d'air

L'estimation de la vitesse du vent n'est pas aisée. On peut sans grand risque donner un ordre de grandeur de $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (un petit morceau de papier lâché devant le ventilateur parcourt 1 m en plus de 0,1 s et en moins de 10 s). Nous disposons à l'IUT d'un anémomètre de petite taille (l'anémomètre 2 de la figure 1, l'anémomètre 1 à fil chaud n'a pas donné de résultats significatifs) qui pouvait être glissé dans le tube en papier. Comme les vitesses mesurées ne sont pas très éloignées des valeurs minimales

mesurables par l'appareil, que le flux varie dans le tube (en particulier avec la distance au centre), et que l'émetteur et le récepteur sont munis de petites grilles (cf. figure 2), il est difficile de savoir si les valeurs de vitesse de vent mesurées sont exactement représentatives. On peut penser qu'elles ont cependant au moins une valeur indicative.

Les mesures de la vitesse V du flux d'air en fonction de la tension U aux bornes du ventilateur ont été faites pour des distances entre l'émetteur et le récepteur d'ultrasons égales à $D = 30$ cm et $D = 60$ cm. L'anémomètre était positionné au niveau du récepteur. Les résultats sont dans le tableau 1.

U (V)	0	3	6	9	12
V ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), $D = 30$ cm	0	0,4	0,9	1,4	1,7
V ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), $D = 60$ cm	0	0,35	0,8	1,3	1,6

Tableau 1 - Relation entre la tension U aux bornes du ventilateur et la vitesse V du flux d'air dans le tube en papier, dans les cas $D = 30$ cm et $D = 60$ cm.

Les deux résultats sont très similaires. On obtient deux droites passant par l'origine quasiment identiques comme le montre la figure 5.

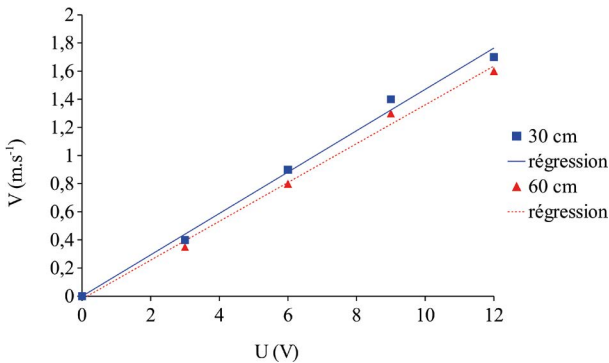


Figure 5 - Relation entre la tension U aux bornes du ventilateur et la vitesse V du flux d'air dans le tube en papier, dans le cas $D = 30$ cm (données en carrés bleus, droite de régression en trait plein bleu) et dans le cas $D = 60$ cm (données en triangles rouges, droite de régression en pointillé rouge).

3. RÉSULTATS OBTENUS

Des mesures ont été faites pour les distances entre l'émetteur et le récepteur d'ultrasons égales à $D = 30$ cm et $D = 60$ cm. La tension aux bornes du ventilateur a varié entre 0 et 12 V par pas de 3 V (les pales du ventilateur commencent à tourner à partir de 3 V). Le signe du déphasage est bien celui attendu dans les deux cas et on vérifie que ce signe change quand on change le sens du vent.

La mesure de la fréquence de la tension aux bornes du récepteur, ou plus simplement, le constat de l'absence de défilement des courbes du récepteur et de l'émetteur l'une par rapport à l'autre sur l'écran de l'oscilloscope, confirment l'absence d'effet Doppler dans cette expérience.

Remarque

Une émission par salves au lieu d'une émission en continu n'a pas donné de résultats concluants. La formule $\Delta t = -\frac{D}{c} \times \frac{V}{c}$ donne une variation du décalage temporel entre l'émission et la réception des ondes acoustiques de l'ordre de quelques microsecondes (μs) pour des distances de quelques dizaines de centimètres et des vitesses de l'ordre du mètre seconde (pour $D = 60 \text{ cm}$ et $V = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, on trouve $\Delta t = -5 \mu\text{s}$). Ce décalage en temps n'est pas négligeable devant la période de $25 \mu\text{s}$ d'ultrasons de fréquence 40 kHz , mais il l'est devant la durée de propagation (environ $1,8 \text{ ms}$ pour $D = 60 \text{ cm}$) et devant la durée du régime transitoire nécessaire pour atteindre une tension constante aux bornes du récepteur après le début de l'émission (régime transitoire de 1 ms en ordre de grandeur).

3.1. Difficultés

Le déphasage entre la tension aux bornes de l'émetteur d'ultrasons et celle aux bornes du récepteur peut être obtenu directement si l'oscilloscope possède cette fonction de mesure. Il s'obtient aussi à partir du décalage temporel entre les courbes. La valeur du déphasage pour une distance et une vitesse de vent données fluctue légèrement autour d'une valeur moyenne (variation de $\pm 1^\circ$ environ). Ces petites fluctuations rapides ne sont pas gênantes. Pour les atténuer, il est possible d'utiliser la fonction de moyennage disponible sur certains oscilloscopes (l'oscilloscope affiche une courbe qui est la moyenne d'un nombre réglable d'acquisitions).

D'autres variations de déphasage, plus importantes ($\pm 5^\circ$ voire plus), se produisent sur des échelles de temps plus longues (quelques minutes), même en absence de vent, et leur cause n'a pas pu être identifiée. L'émetteur et le récepteur sont fixés solidement, et il paraît peu probable que les variations de déphasage proviennent d'une variation de distance. Le tube protège l'émetteur et le récepteur de courants d'air parasites, et là encore cette explication paraît peu probable (des tests faits en mettant l'émetteur et le récepteur non pas dans un tube, mais dans une boîte fermée sans ventilateur ont montré la même variation de déphasage). Des variations de température (cf. annexe) ne sont pas à exclure, mais l'ordre de grandeur mesuré (de $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ à $\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ au maximum) ne semble pas être suffisant (il est cependant possible que des variations soient plus rapides que le temps de réponse du thermomètre).

Pour éviter de prendre en compte des mesures avec une dérive importante de la

valeur du déphasage sans vent, on procède de la manière suivante : la tension aux bornes du ventilateur est augmentée progressivement puis on la ramène à zéro. Si le déphasage pour un vent nul n'a pas varié par rapport au début des mesures (hormis les petites fluctuations rapides de $\pm 1^\circ$), les mesures sont conservées. Elles ne sont pas prises en compte dans le cas contraire.

3.2. Cas $D = 30 \text{ cm}$

La valeur absolue de la variation du déphasage $|\Delta\varphi|$ en fonction de la vitesse V du vent est dans le tableau 2. Le graphique représentant $|\Delta\varphi|$ en fonction de V est sur la figure 6.

$V \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$	0	0,4	0,9	1,4	1,7
$ \Delta\varphi \text{ (deg)}$	0	12	30	40	50

Tableau 2 - Résultats obtenus dans le cas $D = 30 \text{ cm}$ pour la valeur absolue de la variation du déphasage $|\Delta\varphi|$ en fonction de de la vitesse V du vent.

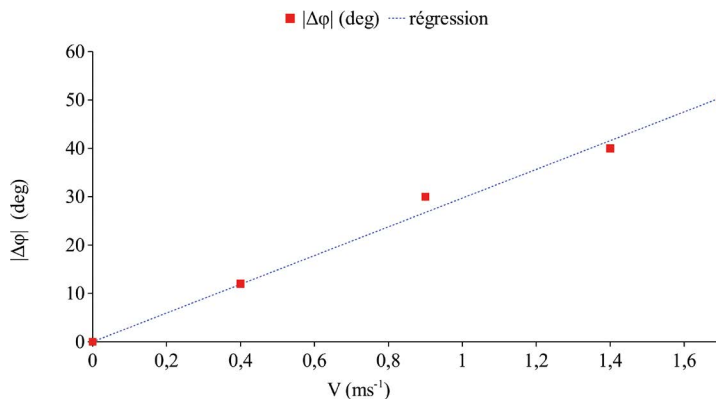


Figure 6 - Représentation de $|\Delta\varphi|$ en fonction de la vitesse V du vent dans le cas $D = 30 \text{ cm}$. Les points expérimentaux sont les carrés rouges, la droite de régression est en pointillé bleu.

La pente de la droite représentant $|\Delta\varphi|$ en fonction de la vitesse V est d'environ $30 \text{ deg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}$, soit environ $0,5 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}$. D'après la formule (1), la pente attendue est $2\pi \frac{D}{\lambda c}$. Pour $D = 30 \text{ cm}$, $\lambda = 8,5 \text{ mm}$ et $c = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, la pente attendue est de $0,65 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}$. Compte tenu de la forte incertitude sur la valeur de la vitesse, le résultat obtenu expérimentalement peut être considéré comme satisfaisant.

Remarque

Si l'on ne dispose pas d'un anémomètre permettant d'obtenir la relation entre la

tension U aux bornes du ventilateur et de la vitesse V du vent, on pourra tracer $|\Delta\phi|$ en fonction de U à la place de $|\Delta\phi|$ en fonction de V . On vérifie que $|\Delta\phi|$ croît avec U .

3.3. Cas $D = 60$ cm

Les résultats numériques sont dans le tableau 3 et le graphique sur la figure 7. Le comportement est le même que dans le cas $D = 30$ cm : une proportionnalité entre le déphasage et la vitesse du vent. La pente de la droite représentant $|\Delta\phi|$ en fonction de la vitesse V est d'environ $60 \text{ deg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}$, soit environ $1 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}$. D'après la formule (1), la pente attendue est de $1,30 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}$. Ici aussi, compte tenu de la forte incertitude sur la valeur de la vitesse, le résultat obtenu expérimentalement peut être considéré comme satisfaisant.

$V \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$	0	0,35	0,8	1,3	1,6
$ \Delta\phi \text{ (deg)}$	0	31	54	82	96

Tableau 3 - Résultats obtenus dans le cas $D = 60$ cm pour la valeur absolue de la variation du déphasage $|\Delta\phi|$ en fonction de la vitesse V du vent.

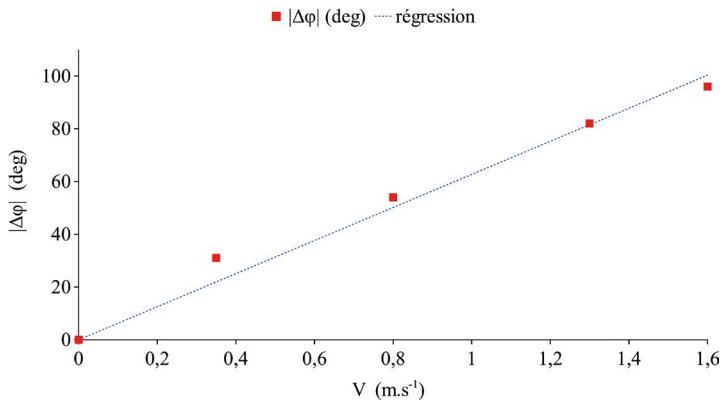


Figure 7 - Représentation de $|\Delta\phi|$ en fonction de la vitesse V du vent dans le cas $D = 60$ cm. Les points expérimentaux sont les carrés rouges, la droite de régression est en pointillé bleu.

Remarque

Des mesures ont été faites pour une distance $D = 15$ cm. On observe ici encore une proportionnalité entre le déphasage et la tension aux bornes du ventilateur ou la vitesse du vent. La pente de la droite représentant $|\Delta\phi|$ en fonction de la vitesse V est par contre bien plus faible que celle attendue. On mesure une valeur d'environ $0,15 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}$ (plusieurs essais ont donné la même valeur, avec dans certains cas

démontage et remontage complet de l'expérience). Or on attend $0,33 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}$ par la formule $2\pi \frac{D}{\lambda c}$ et $0,25 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}$ en extrapolant les précédents résultats expérimentaux. L'origine de cette différence est probablement une différence entre la vitesse mesurée par l'anémomètre et celle effectivement à l'œuvre dans le montage. Pour $D = 15 \text{ cm}$, le récepteur n'est pas très loin de l'émetteur et de l'embouchure du tube de papier : on peut supposer que les turbulences dans le flux d'air se font plus sentir que dans les cas $D = 30 \text{ cm}$ et $D = 60 \text{ cm}$.

CONCLUSION

Le principe d'un anémomètre à déphasage a été présenté. La mise en évidence expérimentale du phénomène peut être faite avec des moyens simples : un émetteur et un récepteur d'ultrasons, un oscilloscope, un ventilateur et un tube en papier. En faisant varier la tension aux bornes du ventilateur, on montre que la variation de déphasage est d'autant plus importante que le vent généré est grand.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] R. Gouget, « Fabrication d'un anémomètre », *Bull. Un. Phys.*, vol. 94, n° 820, p. 170-172, janvier 2000.
- [2] V. Donius, « Mesure de la vitesse du vent : de la "belle physique" pour 0,50 euro au collègue », *Bull. Un. Phys.*, vol. 96, n° 843, p. 769-774, avril 2002.
- [3] R. Fleckinger, « Les décalages en fréquence : une préparation unifiée », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 110, n° 983, p. 459-468, avril 2016.

Annexe

Principe du thermomètre à déphasage

Nous partons du même dispositif expérimental que celui décrit dans la partie 2 : un émetteur et un récepteur d'ondes acoustiques sinusoïdales de période T , séparés par une distance D , et situés l'un en face de l'autre. Pour simplifier les calculs, nous supposons que les effets de la dilatation sont négligeables (la variation relative de distance est de quelques 10^{-5} par degré pour un métal, de quelques 10^{-4} pour le polypropylène, et la variation relative de la vitesse du son est de l'ordre de 10^{-3} par degré autour de 293 K). La distance D sera considérée comme constante.

À une température T_0 , la vitesse du son dans le gaz est $c_0 = \sqrt{\frac{\gamma R T_0}{M}}$ où γ est le rapport des capacités à pression et volume constant, R la constante des gaz parfaits et M la masse molaire du gaz. Le temps de propagation de l'onde sonore depuis l'émetteur jusqu'au récepteur est $t_0 = \frac{D}{c_0}$. Pour une température T_1 différente de T_0 , ce temps devient $t_1 = \frac{D}{c_1}$ avec c_1 la nouvelle vitesse du son. Écrivons $T_1 = T_0 + \Delta T$ et supposons que $\Delta T \ll T_0$. Nous avons alors $c_1 \cong c_0 \times \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta T}{T_0}\right)$.

La différence Δt des temps de propagation s'écrit dans ces conditions

$$\Delta t = t_1 - t_0 \cong -\frac{1}{2} \frac{D}{c_0} \frac{\Delta T}{T_0}.$$

La variation de déphasage entre les températures T_0 et T_1 est donc

$$\Delta \varphi = -\pi \frac{D}{\lambda_0} \times \frac{\Delta T}{T_0}.$$

Évaluons la sensibilité de ce thermomètre. Prenons $D = 20 \lambda_0$ (soit $D = 17$ cm pour une fréquence d'ultrasons de 40 kHz) et $T_0 = 293$ K (soit 20 °C). Nous obtenons :

$$\Delta \varphi = -0,2 \text{ rad} \cdot \text{K}^{-1} \Delta T = -12 \text{ deg} \cdot \text{K}^{-1} \Delta T.$$

Pour une variation de température $\Delta T = 1$ K, nous obtenons $\Delta \varphi = 12$ deg ce qui est facilement repérable.



Cédric MULET-MARQUIS

Agrégé de physique

Institut universitaire de technologie (IUT)

Département mesures physiques

Châtelleraut (Vienne)