

Turbulence et anémométrie à fil chaud

Geneviève Comte-Bellot

Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique
École Centrale de Lyon
36 avenue Guy de Collongue,
69134 Ecully-Cedex, France

Tous les fluides de notre environnement quotidien, comme l'air plus particulièrement, présentent, un jour ou l'autre, des mouvements désordonnés. Une brise douce et légère peut devenir un vent violent et dévastateur pendant un orage. Une traversée en avion de Paris à New-York, à une altitude de 10 000 mètres où le *Jet Stream* apparaît avec plus de 100 km/h, peut familiariser tout un chacun avec l'irrégularité de l'air extérieur aux travers des secousses ressenties et de l'annonce de l'hôtesse "veuillez attacher vos ceintures, nous traversons une zone de turbulence" .

Et voici le mot clé lancé... celui de "Turbulence". Les aérodynamiciens parlent de turbulence, c'est-à-dire de fluctuations de vitesse ou de température, depuis plus d'un siècle, non seulement dans l'atmosphère mais aussi dans de nombreux dispositifs industriels comme les ventilateurs, les éoliennes, les échangeurs thermiques ou les chambres de combustion. La turbulence est parfois indésirable du fait des fortes contraintes mécaniques et des bruits intenses qu'elle engendre lorsque les écoulements sont rapides comme les jets des réacteurs d'avion. En regard, la turbulence est souvent bénéfique car le brassage qu'elle assure permet de redynamiser des zones de vitesse lente, ou d'apporter du fluide froid dans des zones trop chaudes. Pour ce qui concerne la dispersion des polluants dans l'atmosphère, les rivières, voire les océans, elle n'est possible que par l'agitation qui caractérise la turbulence.

Le phénomène de turbulence est toutefois complexe, car régi par une dynamique non linéaire. Ainsi, dès qu'une perturbation existe à la fréquence f , des harmoniques supérieures apparaissent aux fréquences $2f, 3f...$ comme aussi des sous-harmoniques aux fréquences $f/2, f/3...$. Les dimensions des structures vont de même couvrir un spectre très large, les plus grandes pouvant être de 100 km dans l'atmosphère et les plus petites, compatibles avec la viscosité du fluide, inférieures à 1 mm. Ces échelles extrêmes sont connues sous le nom d'échelle de corrélation pour les plus grandes, et d'échelle de Kolmogorov pour les plus petites [1].

Pour réaliser des mesures sur cette vaste étendue d'échelles, la méthode la mieux adaptée est celle de l'anémométrie à fil chaud car le capteur offre tout à la fois une bonne finesse spatiale et une bonne résolution temporelle. Moulinets, girouettes, ou thermocouples ne sont pas suffisants. Les données obtenues sont aussi indispensables à la mise au point des simulations et des prédictions numériques que l'on doit absolument conduire actuellement, pour augmenter le rendement de nos équipements et améliorer nos conditions de vie.

L'anémométrie à fil chaud a conquis une place de choix car elle permet tout à la fois la mesure des fluctuations de vitesse et celle des fluctuations de température. Une équipe de chercheurs français, Huguenard, Magnan et Planiol [11], s'est même illustrée dès 1926 par une étude très complète de l'irrégularité des vents près des sols. De nombreux développements ont ensuite été apportés à la technique, et cet historique est décrit au travers de nombreuses synthèses, par Corrsin [10], Kovaszny [12] ou Comte-Bellot [4][5] par exemple.

1 - Principe

Un fil métallique très fin, de 2 à 10 microns de diamètre et court, de 2 à 10 mm de long, est réalisé en un métal noble, en platine ou tungstène qui présente une meilleure tenue mécanique (figure 1). Le fil est monté sur de fines broches et placé à l'endroit où les mesures sont souhaitées. Un fil simple permet de mesurer une composante de vitesse et une sonde à fils croisés deux composantes de vitesse. Les sondes peuvent également être alignées sur une antenne pour des mesures multi-points.

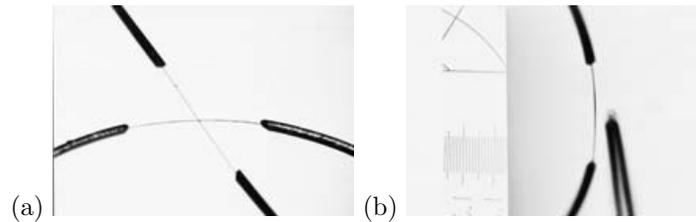


Figure 1 : Sonde à fils croisés en platine de diamètres $4 \mu\text{m}$, construits à partir de Wollaston (âme en platine et gaine en argent). La gaine est conservée aux extrémités pour permettre de souder les fils aux broches. Sur l'échelle micrométrique jointe, dix divisions entre 1,3 et 1,4 représentent 0,2 mm. (a) vue par un observateur situé sur la normale au plan moyen des deux fils. (b) vue par un observateur situé dans le prolongement de l'un des deux fils, lequel se trouve caché par la broche qui le supporte. © G. Comte-Bellot.

Le fil est chauffé par un courant électrique. En régime permanent, ou si les fluctuations de vitesse sont à basses fréquences, le fil obéit à un bilan thermique simple :

$$R_w I_w^2 = (T_w - T_a) F(U). \quad (1)$$

Dans le membre de gauche apparaît la puissance électrique apportée au fil par effet Joule, et dans le membre de droite la puissance thermique emportée par le fluide par convection forcée. Pour les notations, R_w est la résistance électrique du fil, I_w l'intensité du courant électrique dans le fil, T_w la température du fil, T_a la température de l'air incident, et $F(U)$ une fonction de la vitesse U normale au fil, fonction déterminée par étalonnage préalable. Tout fil métallique a une résistance électrique qui est une fonction linéaire de la température. Ainsi, notant R_w la résistance du fil à la température T_w et R_a la résistance du fil à la température T_a , l'équation ci-dessus peut être réécrite :

$$R_w I_w^2 = (R_w - R_a) f(U). \quad (2)$$

Si les fluctuations sont rapides, l'équilibre mentionné ci-dessus ne peut plus être réalisé car de la chaleur est conservée par le fil et va être cause d'inertie. Le bilan thermique doit donc être écrit sous la forme :

$$m_w c_w \frac{dT_w}{dt} = R_w I_w^2 - (T_w - T_a) F(U) \quad (3)$$

ou encore

$$\frac{m_w c_w}{\chi R_0} \frac{dR_w}{dt} = R_w I_w^2 - (R_w - R_a) f(U) \quad (4)$$

pour ne faire intervenir que des données du fil et ses variables électriques, m_w est la masse du fil, c_w la chaleur spécifique du matériau du fil, χ le coefficient qui lie résistance électrique et température

$R_w = R_0[1 + \chi(T_w - T_0)]$ et $R_a = R_0[1 + \chi(T_a - T_0)]$, avec R_0 la résistance électrique du fil à une température de référence, souvent $T_0 = 293K$. Enfin, $\chi \simeq 0.0037K^{-1}$ et $f(U) = F(U)/\chi R_0$.

2 - Mise en œuvre

Trois circuits électriques sont possibles pour le fonctionnement du fil chaud. Ils sont illustrés par la figure et leurs caractéristiques comparées dans plusieurs articles de synthèse [6][8].

Dans le montage (a), l'intensité du courant électrique I_w est maintenue constante grâce à une grande résistance ballast placée en série avec le fil. Ce sont alors les fluctuations de résistance du fil qui constituent le signal utile, et le signal de sortie effectif de l'anémomètre apparaît au sommet du pont. Sa partie continue permet de trouver la vitesse moyenne. Sa partie alternative, après traversée d'un circuit compensant l'inertie thermique du fil – circuit de type résistance-capacité pour augmenter l'amplitude et fournir une avance de phase, donne accès aux fluctuations de vitesse.

Dans le montage (b), la résistance du fil est maintenue constante, grâce à un circuit de contre-réaction qui maintient équilibré le pont de Wheatstone dans lequel le fil a été intégré. L'intensité du courant dans le fil devient alors fonction de la vitesse de l'écoulement et le signal de sortie de l'anémomètre est le voltage au sommet du pont. En première approximation, comme $dR_w/dt = 0$, on peut utiliser l'équation (1) pour obtenir la vitesse instantanée de l'écoulement. De nombreux détails sont fournis par Bruun [3].

Dans le montage (c), le fil fonctionne à voltage V_w constant à ses bornes, soit $V_w = R_w I_w = \text{Cste}$. Ce montage est récent [13] et prometteur. La branche du haut fixe V_w et la branche connectée à l'ampli opérationnel réalimente le fil lorsque l'écoulement incident varie. Le voltage de sortie est grand, donc facilement enregistrable. L'inertie thermique du fil est corrigée soit par un circuit résistance-capacité intégré à l'anémomètre, soit lors du traitement des données, ce qui assure une bande passante constante. La constante de temps qui traduit l'inertie thermique du fil est aussi inférieure à celle du montage à courant constant. Des détails sont disponibles dans plusieurs articles [14] [7].

3 - Mesure conjointe des variances des fluctuations de vitesse et de température

L'équation(1) montre que la résistance R_w d'un fil chaud dépend de façon conjointe de la vitesse de l'écoulement incident au travers de $F(U)$ et de sa température explicitée par T_a . Dans le paragraphe qui précède, il était sous-entendu que l'écoulement incident était isotherme. Mais alors, que faire pour un écoulement qui présente à la fois des variations de vitesses et des variations de température ? Il revient à Corrsin [9] d'avoir apporté dès 1947 une réponse toujours utile actuellement. Corrsin a en effet montré que dans une réponse mixte, vitesse-température, les sensibilités du fil à ces variables ne sont pas proportionnelles et que leur différence est une fonction du coefficient de surchauffe du fil par rapport à la température de l'écoulement. Ce coefficient noté a_w est défini par $a_w = (T_w - T_a)/T_a$ qui est voisin de $(R_w - R_a)/R_a$. Ainsi à toute surchauffe a_w et à tout instant t on peut écrire :

$$\frac{e'(t)}{\bar{E}} = S'_u(a_w) \frac{u'(t)}{\bar{U}} + S_{\theta'_a}(a_w) \frac{\theta'_a(t)}{\bar{T}_a} \quad (5)$$

où \bar{E} est la partie moyenne du voltage de sortie de l'anémomètre, $e'(t)$ la partie fluctuante, \bar{U} la vitesse moyenne, $u'(t)$ la fluctuation de vitesse, \bar{T}_a la température moyenne de l'écoulement, et $\theta'_a(t)$ la fluctuation de température de l'écoulement, S'_u et $S_{\theta'_a}$ les coefficients de sensibilité à ces deux types

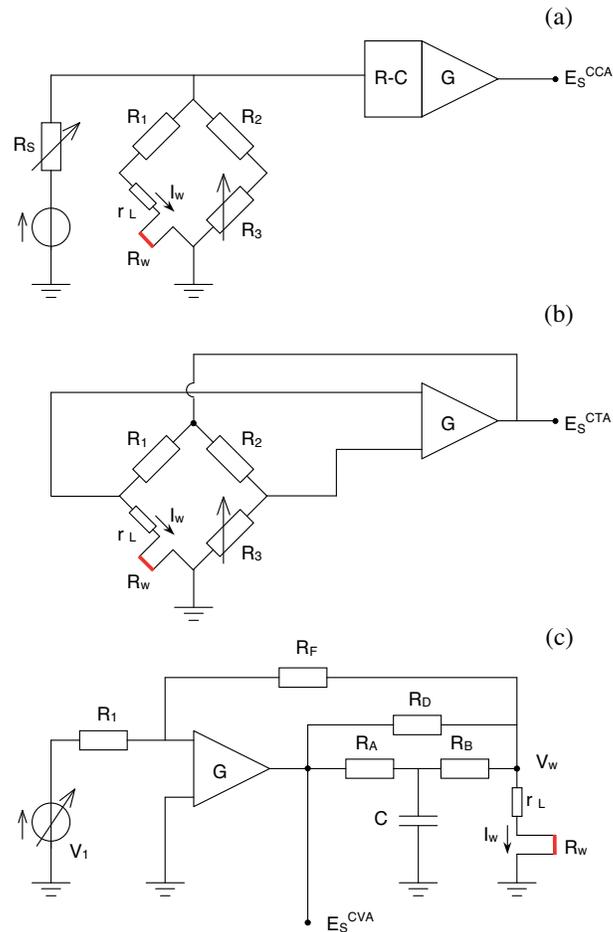


Figure 2 : Schémas de principe du circuit électrique dans lequel est inséré le fil chaud, repéré par sa résistance R_w , (a) anémomètre à courant constant, (b) anémomètre à température constante, (c) anémomètre à voltage constant, © Ch Bailly et G. Comte-Bellot/CNRS Editions.

de fluctuations. Bien évidemment, ces coefficients de sensibilité dépendent du type d'anémomètre choisi [1].

Ainsi, en opérant un seul fil chaud à différentes surchauffes a_w et en formant les valeurs quadratiques moyennes des signaux de sortie, on peut obtenir un système d'équations linéaires indépendantes où les inconnues sont les variances u'^2 et $\theta'_a{}^2$ et le double produit $u'\theta'_a$. Trois surchauffes au moins sont nécessaires pour la résolution du système, et une dizaine est conseillée pour une meilleure précision, ce qui est tout à fait possible avec les méthodes modernes d'acquisition de signaux et de résolution numériques des équations par Matlab. Cette méthode conduit ainsi à l'obtention des

intensités de turbulence, cinématique et thermique, aux spectres correspondants, et aux coefficients de corrélation entre vitesse et température. Cette méthode ne donne toutefois pas accès au signal temporel instantané. Pour cet objectif, on a recours à une autre approche.

4 - Mesure instantanée de la température - le fil chaud "froid"

Très peu chauffé, un fil métallique devient un thermomètre à résistance et n'est sensible qu'à la température. On montre aussi que les seuls types d'anémomètres utilisables sont ceux à courant constant ou à voltage constant. Même "froid" le capteur présente de l'inertie thermique. Pendant de nombreuses années seule une valeur moyenne de la constante de temps était évaluée et utilisée. Ce n'est que très récemment que Berson *et al* ont pu réaliser une correction instantanée [2]. Le contrôle de la méthode a été effectué dans l'écoulement pulsé existant dans un tube résonnant acoustique (vitesse ± 5 m/s). La réponse en fréquence est alors bien supérieure à celle des thermocouples même élaborés avec des fils fins.

5 - Deux exemples

Champ de vitesse en aval d'une centrale nucléaire

La figure 3 représente une maquette de centrale nucléaire placée dans la grande veine d'essais de la soufflerie de diffusion atmosphérique du Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique (LMFA) de l'Ecole Centrale de Lyon. La veine a une section de 4 m x 2 m et une longueur de 14 m. La centrale est située en bordure de la mer, simulée par une zone plane en avant de la maquette, et le vent arrive du large. Une sonde à fil chaud peut être automatiquement déplacée au-dessus des collines avoisinantes. Un exemple de signal recueilli est reproduit sur la figure. Une source d'éthane peut également être placée sur le bâtiment principal et des mesures de concentration permettent d'étudier la dilution assurée par la turbulence. Les travaux sont conduits en liaison avec Electricité de France.

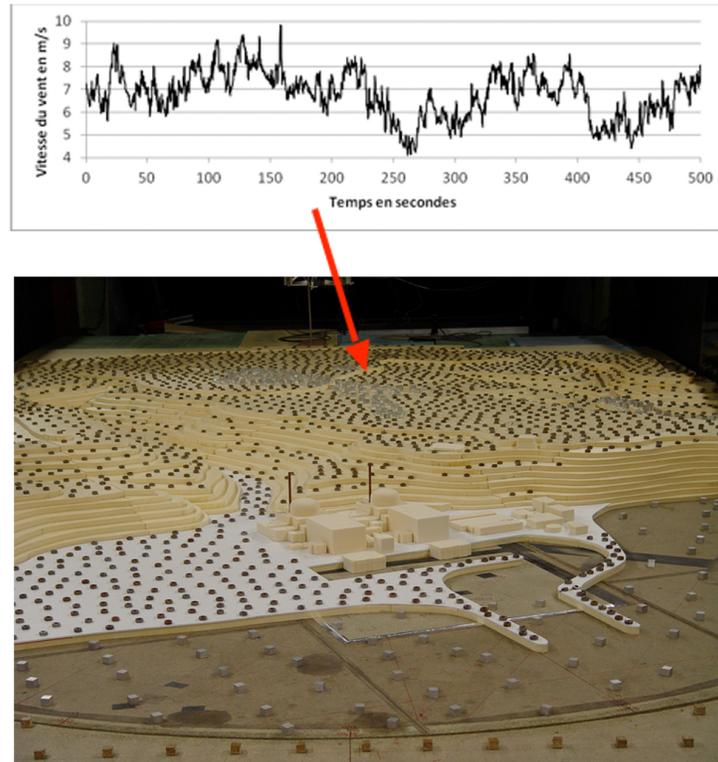


Figure 3 : Étude, dans la soufflerie de diffusion atmosphérique du LMFA, de la maquette du site de la Centrale nucléaire de Penly. Le signal montré en partie haute représente la vitesse du vent à 1500 m des bâtiments, capté par un anémomètre à fil chaud situé à l'extrémité de la flèche rouge © P. Méjean/EDF.

Turbulence thermique au-dessus d'une grille chauffante

La figure 4 illustre les panaches thermiques qui se développent au-dessus d'une grille chauffante de grande dimension, envergure 1,2 m, longueur 4 m, maille 10 cm et de puissance électrique 64 kW. Un chariot permet le déplacement d'un fil froid selon les trois directions X, Y, Z . À environ 1,60 m au-dessus de la grille, les panaches conduisent à une turbulence thermique, c'est-à-dire à des irrégularités de température visibles sur les deux signaux temporels (a) et (b). Le champ de turbulence ainsi créé est utile à l'étude de la propagation des ondes acoustiques dans un milieu où la célérité du son varie de façon aléatoire. La modification des ondes acoustiques en termes de phase et d'amplitude est détectée par une antenne de microphones alignés suivant l'envergure Y . L'antenne est déplaçable dans la direction X pour modifier la distance entre la source et les microphones de réception, la distance parcourue dans le milieu aléatoire étant un paramètre important pour l'estimation des nuisances sonores. Les résultats servent de données de base pour la validation de modèles de propagation dans l'atmosphère, autour des aéroports, des voies de TGV ou des autoroutes.

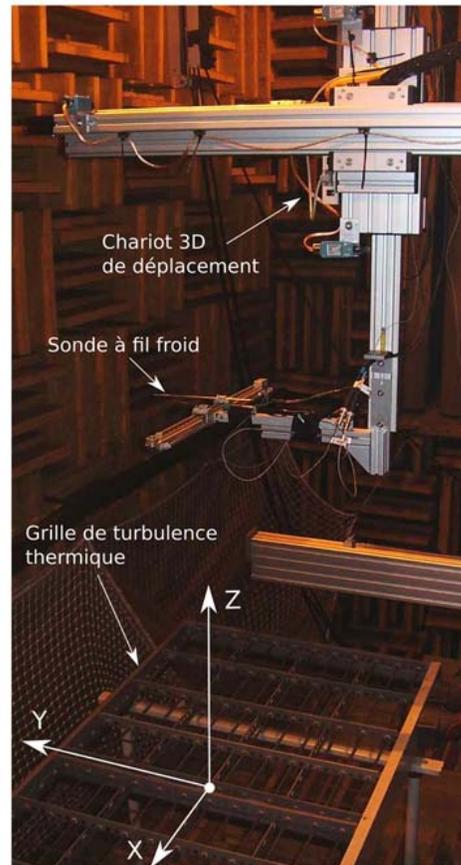
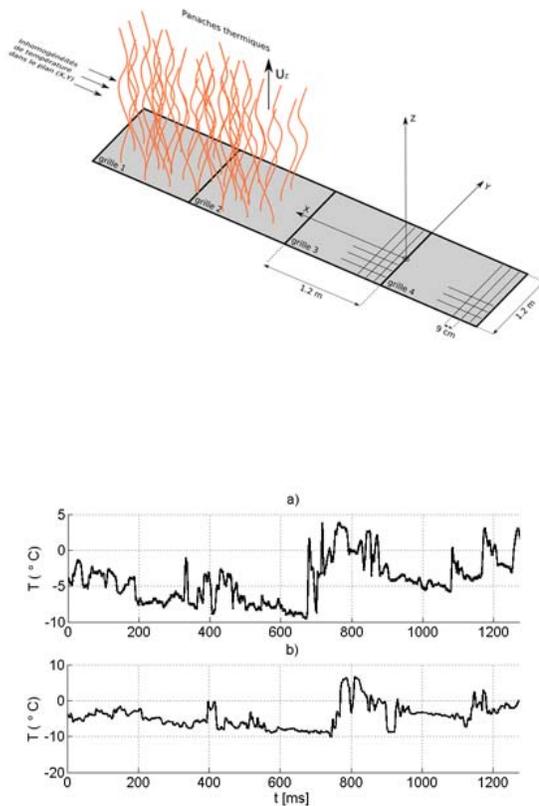


Figure 4 : Turbulence thermique au-dessus d'une grille chauffante dans la grande chambre anéchoïque du LMFA, thèse Édouard Salze ECL 2012–38.

Conclusion

La technique de l'anémomètre à fil chaud a considérablement progressé depuis un siècle grâce aux possibilités offertes par l'acquisition et le traitement rapide des signaux. Elle se révèle toujours complémentaire d'autres techniques comme la vélocimétrie par effet Doppler ou l'analyse d'images. Elle permet en particulier d'atteindre les fluctuations de température qui sont essentielles dans de nombreux cas rencontrés dans la nature ou dans les équipements industriels. Elle permet également d'opérer dans des milieux opaques, comme les métaux liquides. Néanmoins, pour citer une phrase de L. S. G. Kovasznyai, un pionnier des méthodes expérimentales : "Hot-wire turbulence research ... still has more the caprice of an art than the complete reliability of a convenient routine laboratory procedure" [12].

Références

- [1] Bailly Ch. & Comte-Bellot G., 2003, *Turbulence*, CNRS éditions, Paris.
- [2] Berson A., Poignand G., Blanc-Benon Ph. & Comte-Bellot G., 2010, Capture of instantaneous temperature in oscillating flows : use of constant-voltage anemometry to correct the thermal lag of cold wires operated by constant-current anemometry, *Rev. Sci.Instrum.*, 81, 015102.
- [3] Bruun H. H., 1995, *Hot wire anemometry*, Oxford Scientific Press.
- [4] Comte-Bellot G., 1976, Hot-Wire Anemometry, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 8, 209-231.
- [5] Comte-Bellot G., 1977, Hot-wire and hot-film anemometers - Space-time correlations, in *Measurement of Unsteady Fluid Dynamic Phenomena*, edited by Richard B. E., Hemisphere Publishing Corporation, USA, 123-162, et 261-290.
- [6] Comte-Bellot G., 1998, Hot-Wire Anemometry, Chap. 34 in *Handbook of Fluid Dynamics*, edited by R.W. Johnson, CRC Press, Boca Raton, Fl, USA, 34.1-34.29.
- [7] Comte-Bellot G. & Sarma G. R., 2001, Constant Voltage Anemometer Practice in Supersonic Flows, *AIAA J.*, 39 (2), 261-270.
- [8] Comte-Bellot G., 2007, Thermal Anemometry, Sections 5.2.1 - 5.2.7 in *Handbook of Experimental Fluid Mechanics*, edited by C. Tropea, A.L. Yarin & J. Foss, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, pp. 233-287.
- [9] Corrsin S., 1947, Extended Applications of the Hot-Wire Anemometer, *Rev. Sci. Instrum.*, 18 (7), 469-471.
- [10] Corrsin S., 1963, Turbulence: Experimental methods, in *Handbuch der Physik: Encyclopedia of Physics*, edited by S. Flügge, Springer-Verlag, VIII/2, 524-590.
- [11] Huguenard E., Magnan A. & Planiol A., 1926, Les appareils à fils chauds, *Rep. 32, Service Tech. Aéronaut.*, 66 p.
- [12] Kovaszny L.S.G., 1965, The Hot-Wire Anemometer, *Acta Techn. Hung.*, 50, 131-151.
- [13] Sarma G. R., 1998, Transfer function analysis of the constant voltage anemometer, *Rev. Sci. Instrum.*, 69 (6), 2385-2391.
- [14] Sarma G. R., Comte-Bellot G. & Faure Th., 1998, Software corrected hot wire thermal lag for the constant voltage anemometer featuring a constant bandwidth at the selected compensating setting, *Rev. Sci. Instrum.*, 69 (9), 3223-3231.