

Aérodynamique

Anémométrie par fil chaud et film chaud

(Hot-Wire Anemometry)

SOMMAIRE

1. PRINCIPE ET CONDITIONS D'UTILISATION	5
1.1. Description des sondes	5
1.1.1. Fils chauds	5
1.1.2. Films chauds	5
1.2. Loi d'échange thermique	6
1.2.1. Principe physique	6
1.2.2. Forme générale	6
1.2.3. Forme simplifiée pour un fluide donné	7
1.3. Conditions d'utilisation	8
1.4. Nature des grandeurs effectivement mesurées	9
1.5. Mesures de champs de vitesses	10
2. MISE EN ŒUVRE	11
2.1. Le montage à intensité I constante	11
2.2. Le montage à température T constante	12
2.3. Étalonnage	13
3. EXPLOITATION ET APPLICATIONS	15
3.1. Traitement du signal	15
3.2. Exemples d'applications	16
3.2.1. Détermination de la vitesse du vent dans un massif montagneux	16
3.2.2. Reconstitution d'incidents aéronautiques	17
3.2.3. Optimisation des rendements	18
3.2.4. Simulation des conditions environnementales	18
3.2.5. Amélioration du confort	19
3.2.6. Application à la biomécanique :	21
4. COMMENT CHOISIR UN CAPTEUR ?	22
4.1. Connaître le milieu expérimental	22
4.2. Les différents types de sondes	22
4.2.1. Généralités	22
4.2.2. Construction des sondes	23
4.3. Les sondes à fil	23
4.3.1. Les sondes à fil miniature	23
4.3.2. Les sondes à fil plaqué or	23
4.3.3. Les diverses sondes à fil	24
4.3.4. Sonde de température	24
4.4. Les sondes à film :	24
4.4.1. Sondes à film avec détecteur cylindrique (fiber-film probes)	25
4.4.2. Sondes à fibres fendues	25
4.4.3. Sondes en fibres à triple fentes	25
4.4.4. Sondes à film avec capteurs non cylindriques	26
4.5. Quelques exemples de sondes (fils et films)	26
4.5.1. Sondes à fil et fibre avec capteur cylindrique	26
4.5.2. Sondes à film avec capteur non cylindrique	27
4.6. Supports de sondes	29
4.7. Tableau récapitulatif	29
4.8. Quelques prix (référence DANTEC / année 2000)	30

INTRODUCTION

L'anémométrie à fil ou film chaud est une technique de mesure permettant de déterminer la vitesse instantanée d'un fluide (gazeux ou liquide) s'écoulant autour d'une sonde (le fil chaud) placée au sein de l'écoulement. Depuis son invention par L. V. King vers 1914, cet anémomètre a subi de nombreuses améliorations qui en font un appareil performant et fiable. L'idée de base est de ramener la mesure de la vitesse du fluide à celle d'une mesure de résistance électrique.

Les appareils qui sont traditionnellement désignés comme anémomètres à fil chaud forment en fait une classe plus large que l'on pourrait appeler anémomètres thermiques. Le principe de ces appareils est de chauffer, par effet Joule, un élément (fil ou film) dont la résistance dépend de la température. Cet élément, placé dans un écoulement de fluide, est refroidi par convection ; sa température, donc sa résistance, est alors liée en premier lieu à la vitesse du fluide, mais aussi à sa température et aux caractéristiques physiques de ce fluide régissant le transfert thermique entre l'élément et le milieu environnant.

Les anémomètres à fil ou film chaud vont donc permettre de déterminer les caractéristiques de vitesse locale d'un fluide.

Ce principe peut être mis en œuvre de façon très différente suivant le type d'information recherchée. En effet, pour des mesures courantes en réglage de climatisation, la robustesse et la fidélité sont plus importantes que la sensibilité et la réponse rapide, alors que, si l'on veut déterminer les caractéristiques d'un écoulement turbulent, on cherche au contraire une sensibilité maximale et une très bonne réponse en fréquence. Les appareils proposés dans le commerce se classent dans l'une ou l'autre de ces deux catégories. Les instruments ne nécessitant pas de réponse rapide sont évidemment beaucoup plus faciles à mettre en œuvre que les appareils destinés à la mesure de la turbulence qui, surtout ces dernières années, ont été utilisés dans des configurations où de nombreux capteurs fonctionnent simultanément.

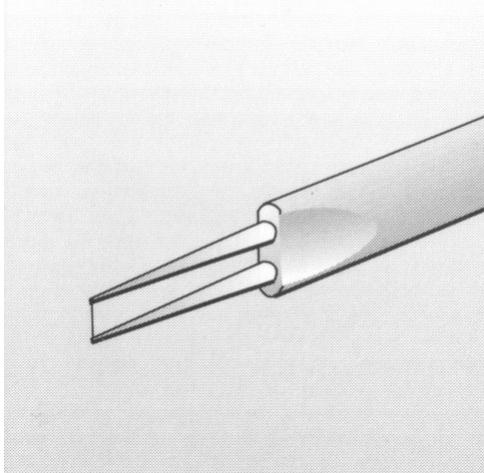
PRINCIPE ET CONDITIONS D'UTILISATION

Comme pour de nombreux appareils de mesure, les capteurs proprement dits sont les éléments les plus importants de l'appareil. C'est le fluide et le type de mesures qui définissent le capteur.

1.1. Description des sondes

1.1.1. Fils chauds

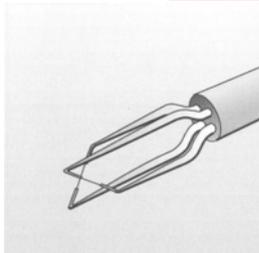
Des fils métalliques fins sont utilisés pour les mesures dans les gaz en particulier si une réponse rapide (jusqu'à 50 kHz) est souhaitée. Ces fils sont en platine, en platine rhodié ou encore en tungstène, leur diamètre est de l'ordre de 5 μm .



Le fil est généralement soudé sur des dents (fig. 1); il peut être protégé par une gaine métallique sur une partie de sa longueur (la partie gainée n'est pas sensible, car très peu résistante). Pour des mesures de fluctuations transversales, des fils croisés sont utilisés (fig. 2). La longueur du fil est fonction de la taille des structures turbulentes que l'on désire détecter (0,2 à 5 mm).

Pour des mesures industrielles, en génie climatique par exemple, qui nécessitent une plus grande solidité et pour les quelles la réponse en fréquence n'est pas primordiale (de l'ordre du 10ème de hertz) les fils utilisés sont plus longs et protégés soit par une gaine métallique isolée électriquement de ces fils, soit par un film très mince de quartz.

1.1.2 Films chauds



Les mesures dans les liquides, qui sont souvent conducteurs, ou les mesures dans des écoulements diphasiques (liquide, vapeur...) nécessitent que l'élément chauffant soit isolé électriquement et soit relativement peu chauffé (10 à 20 °C au dessus de la température du fluide pour éviter l'apparition de bulles). On peut donc utiliser des films métalliques recouverts d'une fine couche de quartz.

De nombreuses formes de films existent dans le commerce coniques, cylindriques, plans, sphériques...

1.2. Loi d'échange thermique

1.2.1. Principe physique

Dans le cas du fil chaud, la mesure de vitesse est réalisée par mesure de la résistance d'un fil conducteur chauffé par effet Joule et placé dans l'écoulement à étudier. La puissance électrique P nécessaire pour chauffer et maintenir le fil à la température T_f , supérieure à celle du fluide à étudier, est égale à la quantité de chaleur Q dissipée dans l'écoulement par unité de temps. Q est alors fonction :

- De la vitesse effective du refroidissement exercée par le fluide U_e ,
- De l'écart de température fil/fluide $\Delta T = (T_f - T_a)$,
- Des propriétés physiques du fluide,
- Des propriétés physiques du fil et de son orientation par rapport à l'écoulement.

Le transfert d'énergie entre le fil et le fluide peut être réalisé par conduction, rayonnement ou convection (forcée, mixte ou naturelle). Si la température du fil n'excède pas 300°C et que la vitesse du fluide n'est pas trop faible, le mode de refroidissement par convection forcée est le phénomène prépondérant. Ce mode de transfert de chaleur est caractérisé par un nombre sans dimension appelé nombre de Nusselt (Nu).

1.2.2. Forme générale

L'étude en similitude des équations des écoulements monophasiques et continus, ou une analyse dimensionnelle appropriée, donne un nombre de Nusselt Nu qui peut s'écrire :

$$Nu = f(Re, Pr, Gr, Ec, l/d, (\theta - \theta_a)/\theta_a, \varphi, \psi) \quad (1)$$

Avec	Re	nombre de Reynolds,
	Pr	nombre de Prandtl,
	Gr	nombre de Grashof,
	Ec	nombre d'Eckert (on peut aussi employer le nombre de Mach),
	l/d	rapport de la longueur du fil à son diamètre,
	$(\theta - \theta_a)/\theta_a$	coefficient de surchauffe (θ température de l'élément, θ_a température du fluide, exprimées en Kelvins)
	φ, ψ	angles définissant la direction de la vitesse par rapport aux fils et aux broches.

Les nombres de Grashof et d'Eckert correspondent respectivement à des phénomènes liés à des vitesses faibles et à des vitesses élevées, inférieures à 1 m/s pour le premier et supérieur à 100 m/s pour le second. L'influence de ces paramètres ne peut donc se faire sentir en même temps ; on peut même considérer que, dans la plupart des cas pratiques, la loi d'échange correspond à une loi d'échange de convection forcée en fluide incompressible, pour laquelle aucun de ces deux paramètres n'intervient. Les lois d'échange dépendent, bien entendu, de la forme du capteur, c'est pourquoi elles sont, le plus souvent, déterminées par un étalonnage préalable dans les conditions d'utilisation.

Pour les éléments cylindriques dont l'axe est placé perpendiculairement à la vitesse, une des loi les plus utilisées est celle de Kramers (pour les gaz diatomiques et l'air) dont le domaine de validité

s'étend jusqu'à $Re = 70$:

$$Nu = 0,42Pr^{0,2} + 0,57Pr^{0,33}Re^{0,5} \quad (2)$$

Dans la plupart des cas, les échanges par rayonnement sont faibles par rapport aux échanges par convection. Dans un écoulement isotherme, pour un montage à température constante, les échanges par rayonnement sont constants et ne perturbent donc pas les mesures.

1.2.3. Forme simplifiée pour un fluide donné

Comme le nombre de Nusselt est proportionnel au flux de chaleur et donc à la puissance électrique RI^2 , si R est la résistance électrique du fil à la température T_f , i le courant électrique circulant dans le fil, on peut écrire l'équation à l'équilibre thermique :

$$Q = R.i^2 = \pi.k.L.Nu.(T_f - T_a) \quad (3)$$

D'autre part, comme le nombre de Reynolds est proportionnel à la vitesse du fluide, pour un fluide donné et un capteur donné, la relation (2) peut être transformé en :

$$RI^2 = (R - R_0).(A + BU_{eff}^n) \quad (4)$$

Avec R résistance du fil chaud,
 R_0 résistance du fil à la température de référence,
 i intensité du courant passant dans le fil,
 U_{eff} vitesse effective de refroidissement du fil,

$$A = 0,57 \frac{\pi k L}{\alpha R_0} Pr^{0,33} \left(\frac{D}{\nu} \right)^{0,5}$$

B
 L longueur du fil (m),
 α coefficient de résistance ($\Omega.m^{-1}$)
 D diamètre du fil (m).

Cette relation (4) est connue sous le nom de **Loi de King** et permet d'expliquer relativement simplement le fonctionnement des anémomètres à fil chaud. Pratiquement, les constantes A et B sont déterminées par un étalonnage. La valeur de l'exposant n (fixé à 0,5 par L.V. King) pouvant varier en fonction de la plage de vitesse (voir Collis et Williams) et de la nature du fluide. Il fait également l'objet d'une détermination expérimentale par étalonnage.

Dans le cas où le fil est en platine, le rapport $(R-R_a)/R_a$ est quasiment égal à $(\theta-\theta_a)/\theta_a$, ce rapport est donc aussi appelé coefficient de surchauffe, même lorsque l'égalité n'est pas rigoureuse. Pour les fils utilisés dans l'air, cette surchauffe est de l'ordre de 0,3 à 0,8, la limite étant liée à la tenue en température de la sonde. Pour les films dans l'eau, elle est inférieure à 0,1 pour éviter les phénomènes de vaporisation et d'électrolyse.

Notons enfin que la loi d'échange peut-être modifiée par un « vieillissement du capteur », dû par exemple au dépôt de corps étrangers sur l'élément sensible.

La forme de la loi de King ($n=0,5$) montre que l'on peut lier la vitesse U_{eff} soit à une mesure de résistance lorsque le courant passant dans le fil est maintenue constant, c'est le montage à intensité constante (§ différents montages de mesure), soit à une mesure de courant maintenant la température du fil constante : c'est alors le montage à température constante (§ différents montages de mesure).

1.3. Conditions d'utilisation

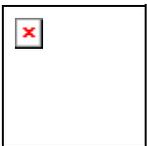
La loi d'échange régit le mode de transfert d'énergie entre le fil et le fluide qui l'entoure. Celle proposée par Kramers est vérifiée pour grand nombre de gaz et de liquides dans une large gamme de Reynolds correspondant à un transfert de chaleur par convection forcée. En pratique, on peut en effet considérer que cette loi reste valable pour :

$$0,5 < \text{Re} < 70$$

ce qui pour fixer un ordre d'idée donne pour un fil de 5 microns de diamètre et dans de l'air à 20°C les vitesses effectives de refroidissement suivantes :

$$3,7 \text{ m.s}^{-1} < U_{\text{eff}} < 259 \text{ m.s}^{-1}$$

Cependant la dépendance de Nu en fonction de $\text{Re}^{1/2}$ est mal établie pour les petites valeurs du nombre de Reynolds ($\text{Re} < 0,5$) en raison, notamment, de l'apparition d'un transfert de chaleur par convection mixte voire naturelle. Collis et Williams ont proposé les lois suivantes mieux adaptées aux différentes configurations d'écoulement rencontrées autour d'un cylindre :



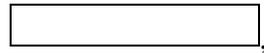
Avec : T_{film} température de film définie par la moyenne des températures du fil et du fluide

1.4. Nature des grandeurs effectivement mesurées

En première approximation, la vitesse effective de refroidissement du fil U_{eff} est la composante de la vitesse du fluide normale au fil U_N (fig. 4). On s'est cependant aperçu que la composante de la vitesse parallèle au fil, ainsi que le blocage du fil dû aux broches et au corps de la sonde, devaient être pris en compte pour des mesures précises. On peut écrire :

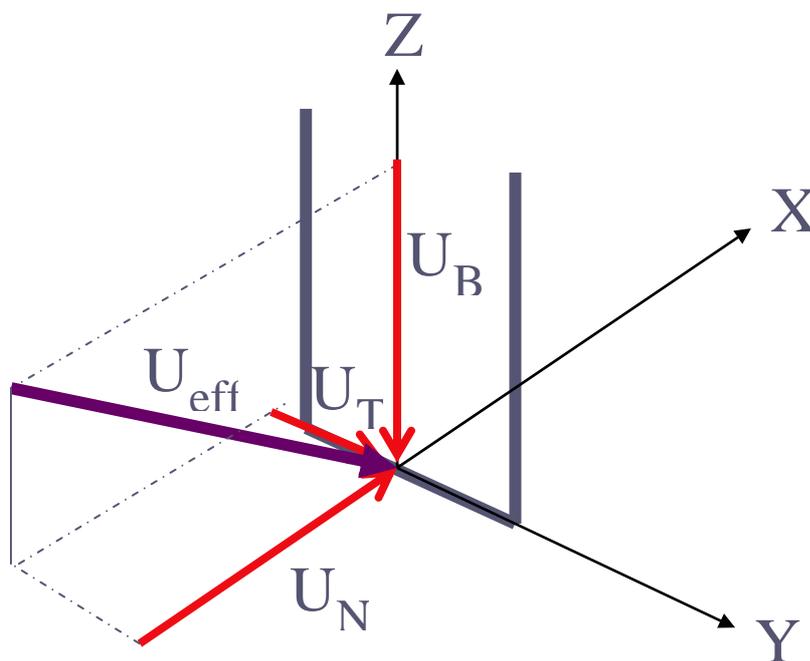
(5)

Avec



- Q module de la vitesse instantanée,
 U_N composante normale au fil dans le plan des broches,
 U_T composante tangentielle au fil,
 U_B composante binormale,

p et q sont des paramètres qui tiennent compte, d'une part, du refroidissement longitudinale du fil et, d'autre part, de l'effet des broches et du blocage de l'écoulement par la sonde. À condition que les angles d'incidence ne soient pas trop grands (20° à 30°), ces coefficients peuvent être considérés comme constants, p est compris entre 0 et 0,2 suivant la valeur du rapport l/d et q est voisin de l'unité. Ainsi, dans le cas le plus simple où le fil est normal à la vitesse, la vitesse effective de refroidissement est, à peu de chose près, égale à la vitesse ($Q=U_N \approx U_{eff}$).



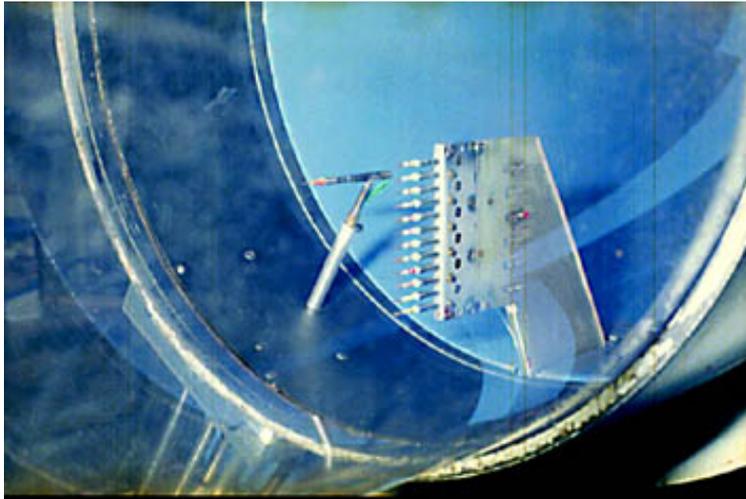
Dans le cas d'un fil droit unique, la sensibilité du fil à la composante normale de la vitesse ne permet pas de déterminer le sens de cette composante, ni sa direction dans un plan perpendiculaire au fil ; il importe donc que le sens de la vitesse normale soit connu, si l'on ne souhaite pas un signal de sortie « redressé ».

On peut montrer comment un fil incliné d'un angle φ par rapport à l'écoulement est sensible à la fois à la fluctuation longitudinale u et aux fluctuations transversales v et w de la vitesse, du fait que la fluctuation normale un résulte de la composition de trois fluctuations (pour simplifier, nous avons

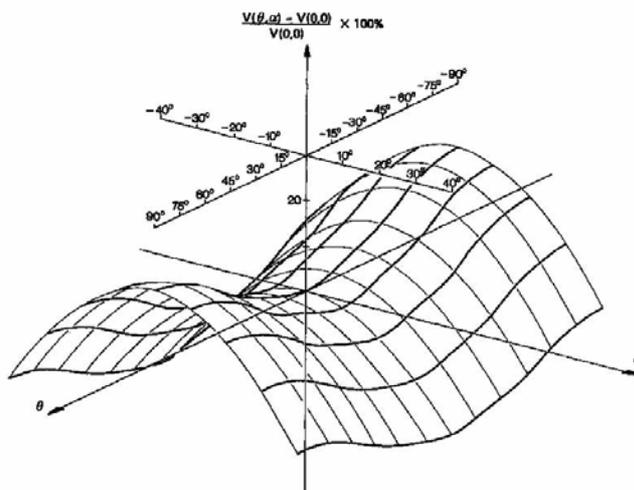
supposé que w , fluctuation dans la direction perpendiculaire au plan de la figure, était nulle : un résultat donc de la composition de u et v). enfin la loi de King montre clairement que, les variations de température du fluide induisant une variation de R_a , la réponse du fil en sera modifiée. On constate donc que plusieurs fils inclinés de façon différente sont nécessaire si l'on veut mesurer à la fois les composantes de la vitesse et la température. On peut noter qu'un fil très fin avec une surchauffe quasi nulle, n'est sensible qu'à la température.

1.5. Mesures de champs de vitesses

Pour mesurer des champs de vitesses on utilise des peignes de capteurs et l'on balaye le milieu que l'on désire étudier (voir application météorologique au §3.2).



Peigne de ca,



MISE EN ŒUVRE

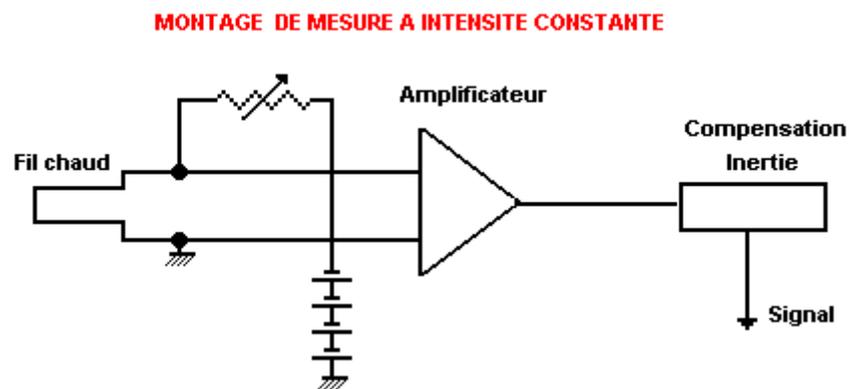
Deux types de montages sont utilisés pour mettre en œuvre ce type de capteur :

- Le montage à intensité I constante
- Le montage à température T constante

2.1. Le montage à intensité I constante

(CCA Constant Current Anemometry)

C'est le plus ancien montage utilisé pour la mesure de caractéristiques turbulentes.



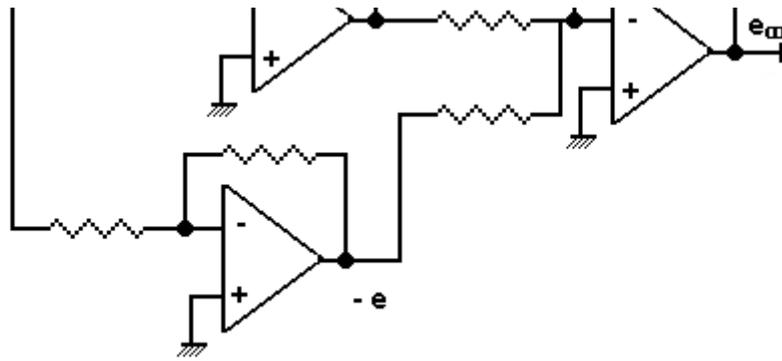
Fonctionnement : I est maintenue constant soit par une résistance ballast en série avec le fil soit par une source de courant.

La puissance thermique échangée est fonction de la vitesse, si cette dernière varie, il en est de même pour la température du fil. Sachant que la résistance du fil dépend de la température, la variation de tension à ses bornes est donc liée à la variation de vitesse du fluide.

Inconvénient de ce type de circuit : Inertie thermique

Une variation de la vitesse entraîne une variation de la résistance avec un certain retard. Le fil ou le film possède une certaine capacité calorifique qui induit une constante de temps thermique.

D'où l'association à ce type de montage d'un circuit de compensation. (voir exemple de circuit ci-après).



Avantage du circuit :

- Amélioration de la réponse en fréquence.

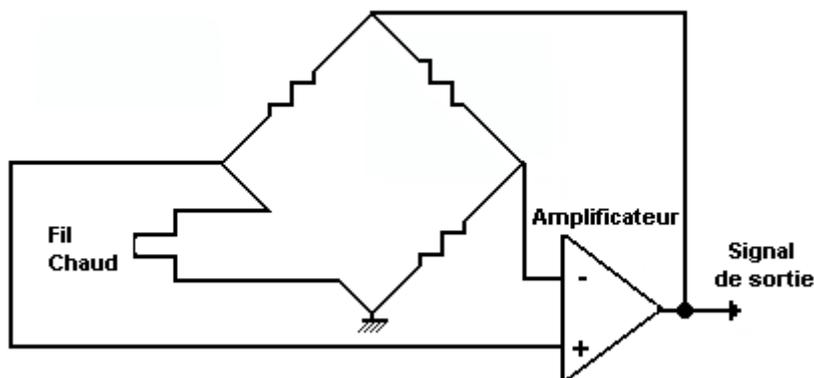
Inconvénients du circuit :

- La réponse du fil n'est pas en toute rigueur linéaire.
- Le circuit différentiateur peut poser problème en augmentant le bruit de fond.

2.2. Le montage à température T constante

(CTA : Constant Temperature Anemometry)

MONTAGE DE MESURE A TEMPERATURE CONSTANTE



Le capteur constitue l'une des branches du pont de Wheatstone. Le courant nécessaire au maintien de l'équilibre est une fonction de la vitesse du fluide.

La température dans la sonde reste constante donc sa résistance aussi. Le montage permet donc de déterminer la variation de courant dans le fil

La constante de temps du montage à température constante τ_T peut être exprimée en fonction de la constante de temps du montage à intensité constante τ_I .

Généralement :

Cela traduit une réponse en fréquence beaucoup plus précise pour ce montage.

Ce montage est celui le plus usité de nos jours pour l'anémomètre, il est facile à mettre en œuvre et offre de bien meilleurs résultats que le montage à intensité constante.

2.3. Étalonnage

Les anémomètres délivrent une tension de sortie fonction de la vitesse du fluide au point où se trouve la sonde et de ses propriétés physiques. Cette fonction n'étant pas linéaire, il est nécessaire de la déterminer point par point.

Cependant, grâce aux progrès réalisés en traitement du signal ont vu cette opération relativement facilitée.

La courbe de la page suivante nous présente l'évolution de l'erreur relative aux mesures effectuées à l'aide d'une sonde de type fil chaud. La différence entre les valeurs théoriques (issues de la loi de King) et les valeurs expérimentales issues du fil chaud est assez importante pour des faibles valeurs de vitesse du fluide. Ce phénomène s'explique par la contamination des mesures effectuées par les phénomènes de convections naturelles que l'on ne peut compenser par l'électronique.

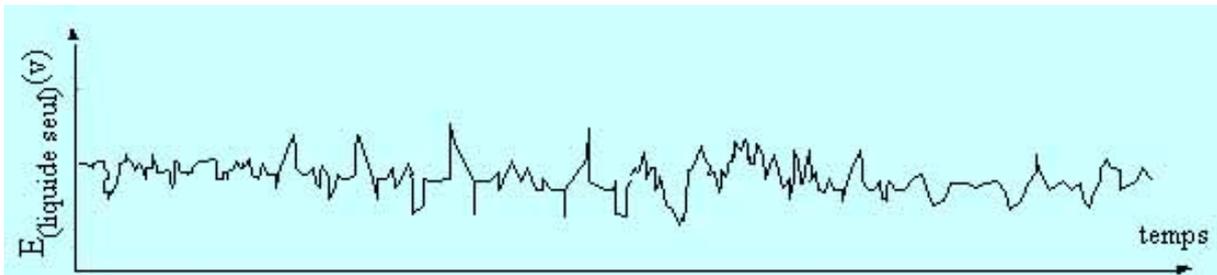


Cependant, pour des vitesses supérieures à 10m/s (dans le cas présent), l'erreur peut être compensée par des compensateurs qui nous permettent de s'abroger des écarts entre la loi de King et le comportement de la sonde. C'est de cette façon que l'on peut étalonner une sonde de façon à adapter sa réponse à la plage d'utilisation que l'on a choisi d'étudier.

Le procédé d'étalonnage est donc une étape importante dans le mode opératoire d'une mesure expérimentale, car la pertinence des valeurs de vitesses relevées en dépend directement.

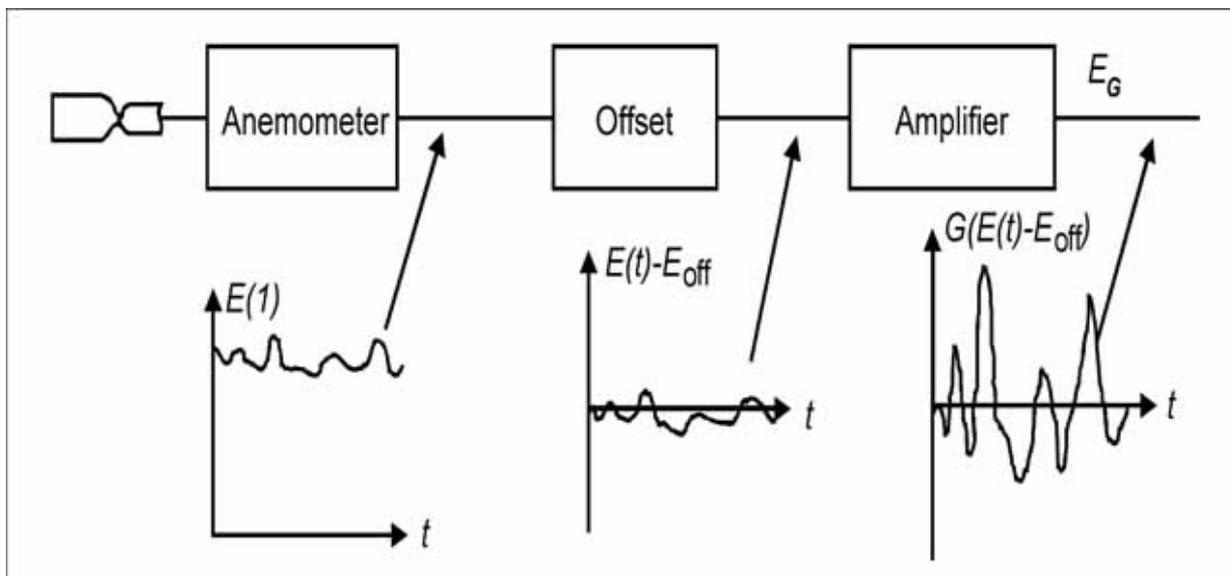
EXPLOITATION ET APPLICATIONS

3.1. Traitement du signal



Les signaux obtenus à la sortie des différents montages doivent subir un traitement afin d'être exploitables. Subséquemment on récupère une tension, fonction du temps (figure ci-dessus) que l'on passe dans plusieurs traitements (figure ci-dessous).

Tout d'abord on enlève la composante continue (offset), afin d'obtenir uniquement la réponse de la sonde dans le signal, ensuite on amplifie le signal pour pouvoir l'exploiter avec une meilleure résolution.

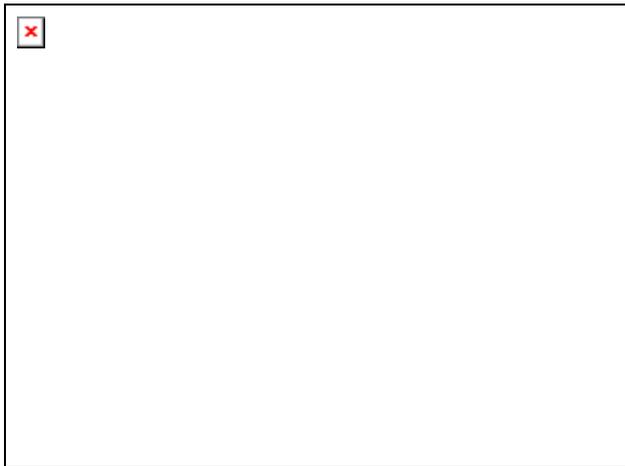


Enfin on traite informatiquement le signal obtenu afin de pouvoir convertir les valeurs de tension obtenues en valeurs de vitesse du fluide grâce à la Loi de King.

Les analyseurs utilisés sont des analyseurs multivoies qui échantillonnent les signaux pour donner un signal numérique. Le pas d'échantillonnage doit être judicieusement pour ne pas occulter une brusque variation de vitesse du fluide mesuré. Cela implique une réflexion préalable sur les conditions de l'expérimentation afin de faire ressortir les caractéristiques de l'écoulement que l'on veut mettre à jour par cette mesure.

Les mesures pluridimensionnelles posent également un problème que le traitement électronique du signal ne peut résoudre. Il s'agit du signal de référence afin de déterminer correctement les sens de la

vitesse mesurée.



[3.2. Exemples d'applications](#)

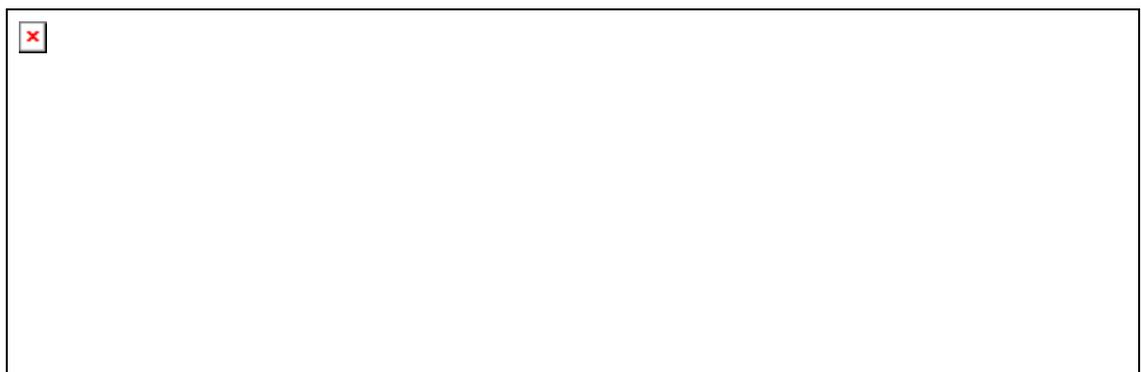
[3.2.1. Détermination de la vitesse du vent dans un massif montagneux](#)

Dans le cadre des études sur **la propagation des incendies de forêts** coordonnées par le CEMAGREF, Météo France a réalisé une simulation des vents de basses couches au-dessus du massif des Maures pour les situations des vents forts : Mistral et vent d'Est.

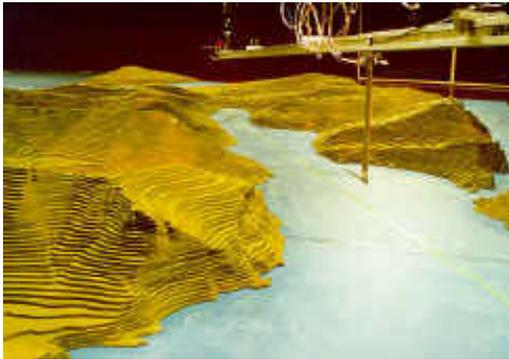
Les **écoulements atmosphériques** ont été ainsi reproduits dans une veine hydraulique du CNRM sur une maquette du massif à l'échelle 1/10000. Les mesures de vitesse réalisées par anémométrie film-chaud permettent de caractériser le vent à 30m au-dessus du relief en tout point de la maquette. Une interpolation des données tenant compte du forçage du relief sur l'écoulement restitue les mesures du vent sur une grille régulière au pas de 500m.

On obtient ainsi le champ de vitesse présenté sur la page suivante :

Les zones de survitesse sont situées au niveau des lignes de crêtes traverses au vent dominant.



3.2.2. Reconstitution d'incidents aéronautiques



L'analyse des conditions de vol du crash de 1996 entre les montagnes de Faroe fut possible en simulant l'avion par une sonde triaxiale anémométrique fil chaud, atterrissant à 4 m/s (200km/h à l'échelle 1) et soumise à des vents de 1.3 m/s (20 m/s échelle 1).

La sonde a permis de découvrir des turbulences énormes générées par les fjords qui bordaient l'aéroport.

Soumis à de telles perturbations, l'avion n'avait que de minces chances d'atterrir sain et sauf.

3.2.3. Optimisation des rendements



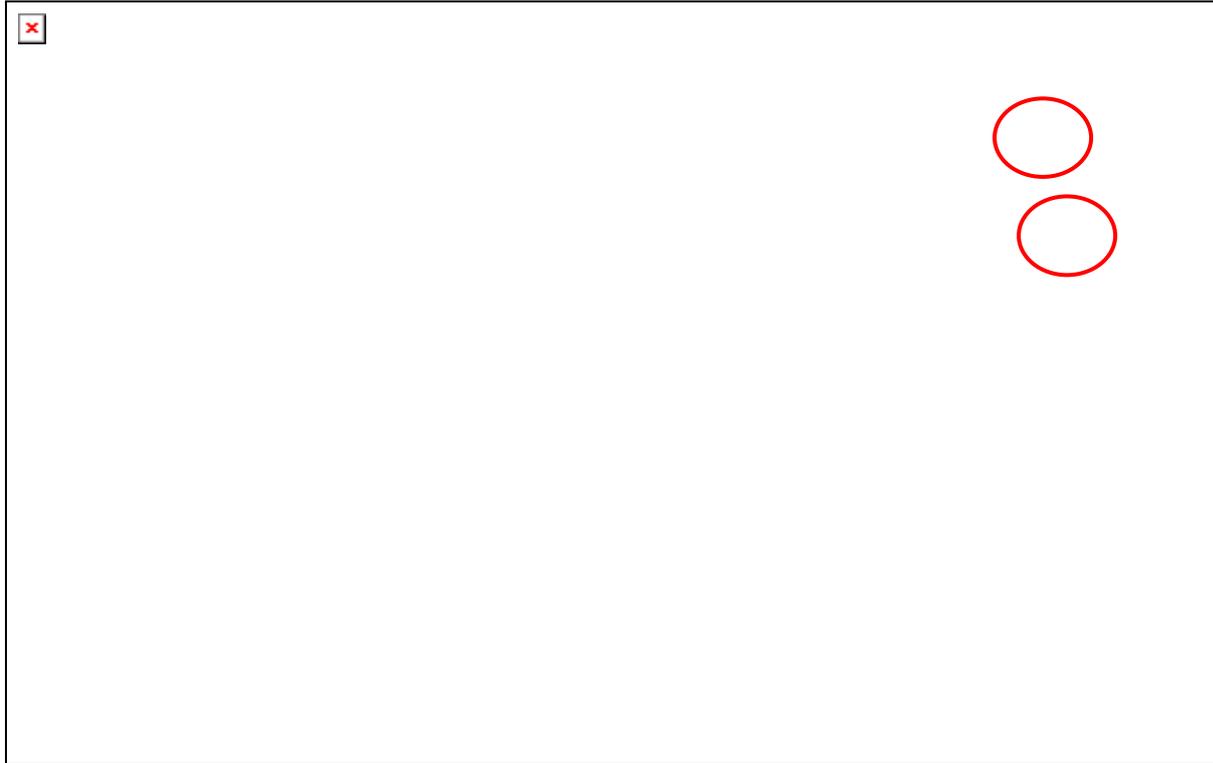
Cette éolienne produisant de l'électricité doit être le plus efficace possible. On utilise donc une méthode à fil chaud pour déterminer le sens optimal du vent et augmenter ainsi son rendement.

3.2.4. Simulation des conditions environnementales



Cette photo nous montre une maquette de bateau prête à être testée accompagnée d'un système de calibrage des sondes.

Il s'agit d'analyser les turbulences autour de la structure du bateau lorsqu'il est soumis aux actions des vents et aux forces des vagues.



Le

flux autour d'un nouveau pont danois a été analysé grâce à des sondes de la société Dantec en effectuant une étude d'anémométrie par fil chaud.

3.2.5. Amélioration du confort

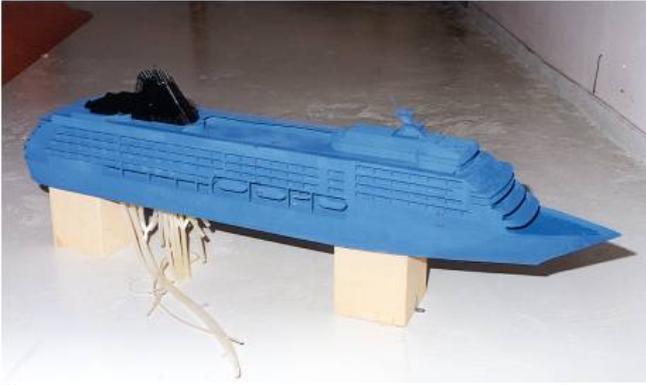
Ceci est une application demandée par Pininfarina : la maquette du véhicule est passée en soufflerie et l'analyse se fait par la méthode du fil chaud.

Cette application porte sur l'étude des turbulences sur le pont arrière d'un bateau de croisière dues au profil des cheminées.

Un modèle à l'échelle 1 :125 est placé en soufflerie. Une sonde est placée à proximité du pont du bateau et mesure la vitesse du vent sur le pont.

On peut ainsi valider le profil des cheminées ou encore déterminer l'emplacement du restaurant à

ciel ouvert.



Les logiciels actuels sont de plus en plus perfectionnés et permettent l'analyse du flux autour d'une aile d'avion complète dans un milieu à haute vitesse.

3.2.6. Application à la biomécanique :

L'anémométrie à fil chaud est aussi présente dans la recherche médicale puisque nous avons trouvé l'exemple d'un montage comprenant un cœur artificiel relié à différentes artères et dans lesquelles on faisait circuler un fluide aux propriétés physico-chimiques similaires à celle du sang. L'utilisation d'anémomètres à fil chaud dans les artères permet de définir les vitesses instantanées du fluide et par la suite s'avère être un outil indispensable au dimensionnement des valves cardiaques implantées chez les malades.

COMMENT CHOISIR UN CAPTEUR ?

4.1. Connaître le milieu expérimental

Le fil ou le film est sensible aux caractéristiques suivantes de l'écoulement :

- La vitesse U et son angle ϕ avec la normale au fil.
- La température.
- Concentration éventuelle des constituants du fluide.

Pour le choix de capteurs adaptés, une certaine connaissance préalable de la structure et du type de l'écoulement est nécessaire. Ainsi que les principales caractéristiques des capteurs.

TYPE	NATURE	REGIME	TEMPERATURE
Écoulement Monophasique Ou Multiphase	Liquide Ou Gaz	Laminaire Ou Turbulent	Constante Ou non

4.2. Les différents types de sondes

4.2.1. Généralités

Depuis de nombreuses années l'anémométrie à fil chaud était l'outil le plus employé dans la recherche en mécanique des fluides. Ses qualités indiscutables ont été supplantées depuis quelques années par l'anémométrie à laser Doppler. Mais dans de nombreuses situations de recherches actuelles, la continuité du signal d'un anémomètre à fil chaud reste un avantage.

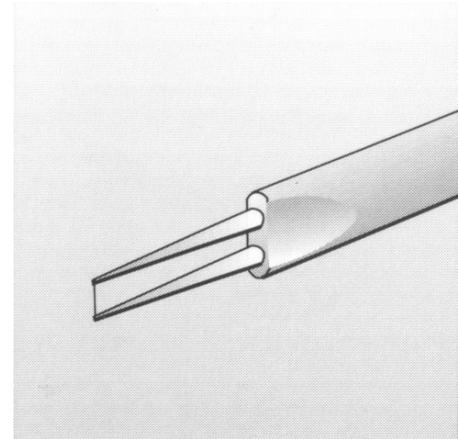
Il existe maintenant des systèmes d'automatisation des procédures :

Réglage des sondes et optimisation,
Compensation de température,
Calibrage,
Gestion de données.

Ce nouveau concept combine les avantages de l'anémométrie à fil chaud avec la puissance et la convivialité de l'ordinateur.

4.2.2. Construction des sondes

En général, une sonde est composée des éléments suivants :



le détecteur, formant l'élément chauffant (fil ou film),
les dents, servant de support au détecteur et l'alimentant en courant,
le corps de sonde qui tiennent les dents
le connecteur est le raccord électrique.

Les sondes peuvent avoir un, deux ou trois détecteurs pour mesurer dans des directions différentes.

Le détecteur peut être soit un fil mince tendu entre deux dents ou un mince film de métal déposé sur un coque d'isolant électrique. Les détecteurs à fil sont utilisés dans les gaz et les liquides non-conducteurs, tandis que les détecteurs à film sont principalement conçus pour l'emploi dans l'eau et autres liquides conducteurs.

Les matières du détecteur sont sélectionnées pour fournir une sensibilité au flux maximum avec un minimum d'inertie thermique. La taille du détecteur est sélectionnée afin de minimiser les perturbations du flux.

4.3. Les sondes à fil

Les fils sont employés comme détecteurs dans des sondes pour des mesures dans l'air et autres gaz depuis des vitesses de quelques cm/s jusqu'à des vitesses supersoniques. En outre, ils peuvent être utilisés dans des liquides non-conducteurs à de faibles vitesses.

Les détecteurs à fil ont une haute sensibilité au flux et la plus haute réponse en fréquence. Par contre, leur résistance mécanique est limitée et ils sont assez sensibles à la contamination par particules.

Les dents sont faites d'acier inoxydable et sont effilées. Elles offrent une pointe d'environ 0.1 mm de diamètre auquel les fils sont attachés.

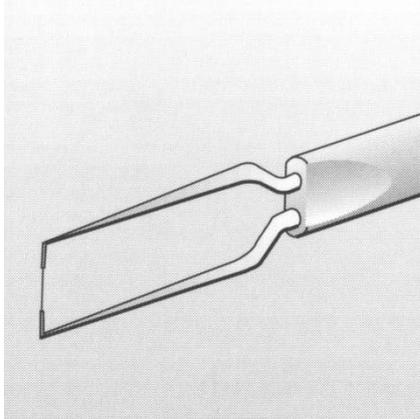
4.3.1. Les sondes à fil miniature :

Les sondes à fil miniature mesurent 5 μm de diamètre, 1.25 mm de long (fig. 3). Les fils sont soudés directement aux dents et toute la longueur du fil sert de détecteur.

Ce type de sonde est généralement recommandé pour des mesures dans une ou deux directions de flux avec peu de turbulences. L'exactitude des mesures de turbulence peut être réduite à cause de l'interférence des dents. Par contre, la construction plus rigide les rend plus convenable pour des applications à hautes vitesses sans risque d'auto vibration.

4.3.2. Les sondes à fil plaqué or :

Le fil en tungstène plaqué au platine mesure 5 μm de diamètre et 3mm de long. Aux extrémités, il est plaqué à l'or (de 15 à 20 μm d'épaisseur) pour obtenir une longueur active de 1.25 mm au milieu du fil (Fig. 4). Ils sont conçus pour des mesures dans des flux très turbulents dans une, deux ou trois directions.

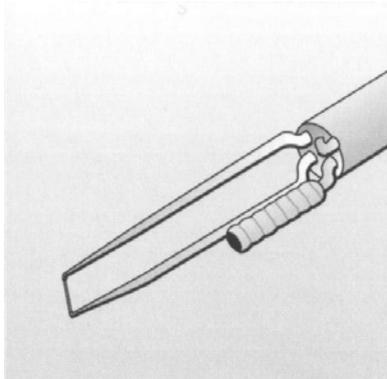


Le placage sert à définir exactement la longueur sensible et à réduire la chaleur dissipée par les dents. Il en résulte une température plus uniforme le long du fil que dans le cas des fils miniatures. Un autre avantage est la diminution des interférences des dents au point de mesure grâce à leur espacement plus important. Ceci pour accroître l'exactitude des mesures dans les hautes turbulences. Les caractéristiques de l'or conviennent parfaitement pour cette application (bonne conductibilité électrique, faible conductibilité thermique).

4.3.3. Les diverses sondes à fil :

Pour les applications jusqu'à 750°C, on utilisera une sonde à fil de 10 μm de diamètre, 2.2 mm de long, et un fil sensible en platine rhodium. Les dents sont en alliage de nickel chrome, et offrent un coefficient de variation de résistance en fonction de la température (ohm/K) proche de zéro. Dans ce cas, les variations de température des dents ne causeront pas de changements de résistance qui pourraient être interprétées comme des variations de vitesse du fluide. On choisit l'alliage de platine rhodium, pour son grand coefficient de réponse, 0.16%/K, même si sa résistance mécanique n'est pas très importante.

4.3.4. Sonde de température :



Pour des mesures de variation rapide de températures, une sonde à fil de 1 μm de diamètre, avec un détecteur de 0.4 mm de long en platine est disponible. Le fil est soudé aux dents d'acier inoxydable. Il est employé avec un anémomètre à courant constant et fonctionne comme une sonde à fil froid avec un courant de mesure d'une fraction de mA

4.4. Les sondes à film :

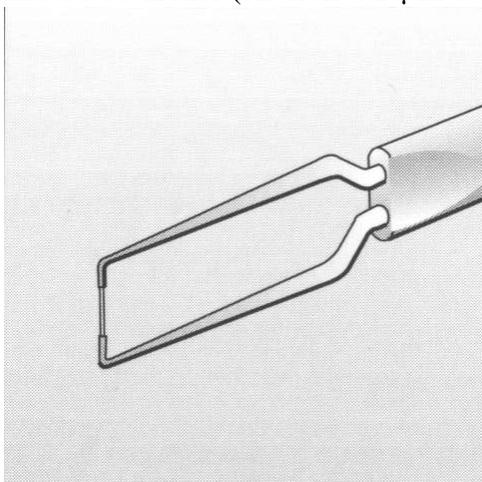
Les sondes à film sont employées pour les mesures dans des liquides à faible et moyennes vitesses et

dans les gaz. Ils sont considérablement plus rugueux que les sondes à fil et moins sensibles à la contamination. Les détecteurs sont des films de nickel placés sur des couches de quartz de formes différentes. Ils sont déposés par électrolyse, par cette technique le film se forme de façon continue, il en résulte un film d'une épaisseur homogène, d'une grande pureté et qui présente une bonne adhérence sur les matrices.

Les films ont un fort coefficient de variation de résistance en fonction de la température (ohm/K) et sont très stables mécaniquement et électriquement. Les films sont protégés par une pellicule de quartz, de respectivement 0.5 μm et 2 μm pour des applications dans l'air et dans l'eau. Cette couche empêche l'électrolyse dans les liquides et l'oxydation dans les gaz.

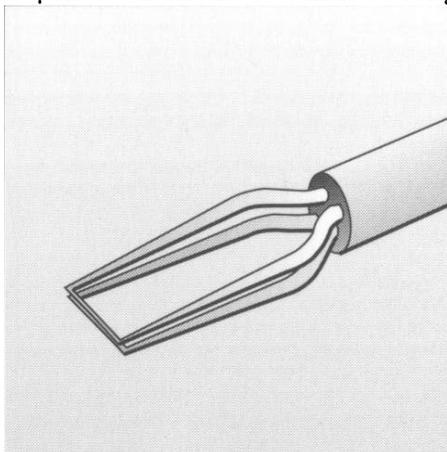
4.4.1. Sondes à film avec détecteur cylindrique (fiber-film probes)

Elles ont un film sensible très fin cylindrique et peuvent être utilisées pour remplacer les sondes à fil dans les applications sur des liquides ou des gaz où des sondes plus robustes sont nécessaires. Les détecteurs sont des fibres de quartz de 70 μm de diamètre, 3mm de long et sont recouverts d'une fine pellicule de nickel (environ 0.1 μm d'épaisseur) (fig. 6). Les extrémités sont cuivrées et plaquées à l'or. La fibre est soudée au bout des dents.



4.4.2. Sondes à fibres fendues

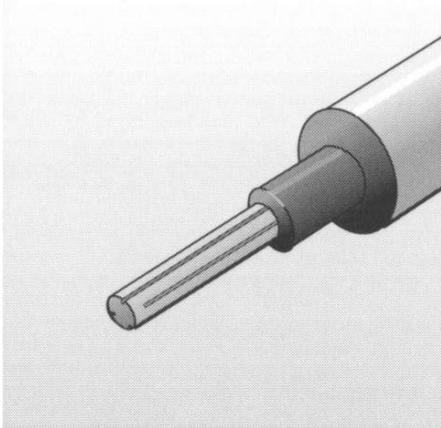
Les sondes à fibres fendues ont deux films de nickel parallèles, déposés sur la même fibre de quartz, 200 μm de diamètre et 3 mm de long (fig. 7). Les extrémités sont cuivrées et plaquées à l'or, laissant



1.2 mm de longueur sensible. Le film est protégé par une couche de 0.5 μm de quartz. Les fibres fendues sont utilisées pour des mesures de vitesses instantanées et des flux de gaz bi-directionnels. Elles peuvent remplacer les sondes à double détecteur par fibres dans les flux à faibles fluctuations, lorsqu'une haute résolution spatiale est nécessaire ou lorsque l'angle d'attaque est supérieur aux $\pm 45^\circ$ acceptées par les sondes conventionnelles en X.

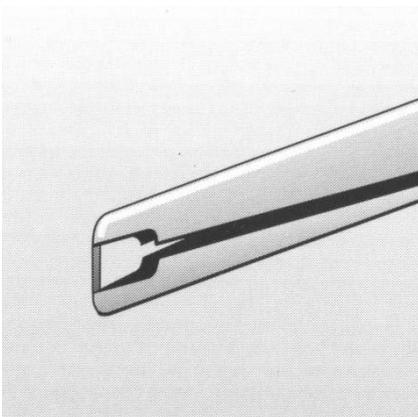
-
-
-
-

4.4.3. Sondes en fibres à triple fentes



Les sondes en fibres à triple fentes sont constituées de trois films de nickel déposés sur un diamètre de 400 μm , les fibres de quartz mesurent 6 mm de long, chacune couvre une circonférence de 120°. La fibre est collée sur une extrémité de tube en acier inoxydable monté dans le corps de sonde.

4.4.4. Sondes à film avec capteurs non cylindriques :



Ces sondes comportent un film de nickel déposé sur une matrice de quartz de forme aérodynamique différente : cônes, disques, sphères... Le détecteur est défini comme une ligne ou un anneau. Deux têtes d'argent transmettent le courant des câbles, normalement attachées au corps de sonde, vers l'élément sensible. L'élément sensible est protégé par une couche de quartz (0.5 μm dans les gaz et 2 μm dans les liquides), tandis que les têtes sont protégées par une couche de laque.

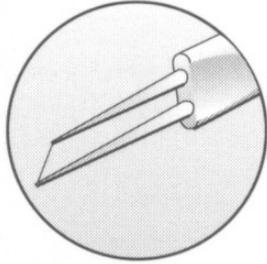
4.5. Quelques exemples de sondes (fils et films) :

4.5.1. Sondes à fil et fibre avec capteur cylindrique

(a) Dents droites, capteur perpendiculaire à l'axe de la sonde

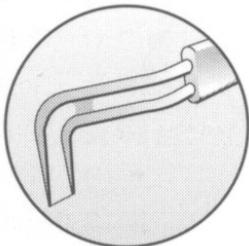
Mesure de la moyenne et des fluctuations de vitesse d'un flux de courant libre mono directionnel. Montée avec l'axe de la sonde parallèle à la direction du flux

(b) Dents droites, capteur à 45° par rapport à l'axe de la sonde



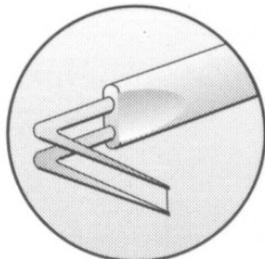
Mesure de la vitesse moyenne et de la fluctuation des flux bi et tri dimensionnels. Elle doit être montée avec l'axe de la sonde parallèle à la direction moyenne du flux.

(c) Dents à angle droit, capteur parallèle à l'axe de la sonde



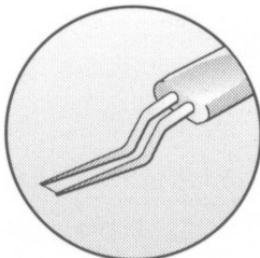
Mesure de la vitesse moyenne et de la fluctuation des flux dans des endroits inaccessibles, comme un tube par exemple. Montée avec l'axe de la sonde perpendiculaire à la direction du flux.

(d) Dents à angle droit, capteur perpendiculaire à l'axe de la sonde

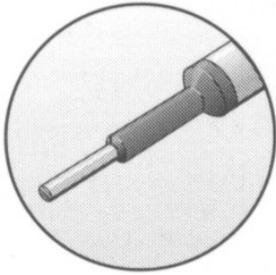


Utilisée dans les mêmes applications que (c), mis à part le fait que le capteur est perpendiculaire à l'axe de la sonde. Cette sonde est donc utilisable pour des mesures de la couche limite. Montée avec l'axe de la sonde perpendiculaire à la direction du flux.

(e) Dents décalées, capteur perpendiculaire à l'axe de la sonde



Conçue pour l'emploi dans la couche limite. La forme de cette sonde permet des mesures proches d'un plan solide sans perturbations dues au corps de sonde, qui reste hors de la couche limite. Montée avec l'axe de la sonde perpendiculaire à la direction du flux.



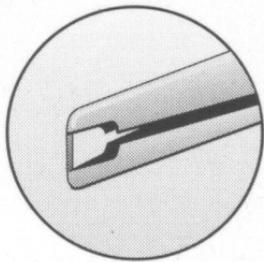
(f) Sondes à acier revêtu

Mesure des variations lentes de vitesse dans les flux de gaz et d'eau. Elle convient parfaitement pour les mesures dans les tubes et les flux bi directionnels, pour lesquels on s'intéresse à l'amplitude et pas à la direction. Montée avec le capteur perpendiculaire à la direction du flux.

4.5.2. Sondes à film avec capteur non cylindrique

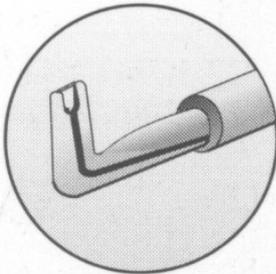
(g) Sondes à film, droite

Une sonde à but général pour mesurer les moyennes et fluctuations de vitesses dans des flux mono directionnels. Montée avec l'axe de la sonde parallèle à la direction du flux.



(h) Sondes à film, angle droit, film parallèle à l'axe de la sonde

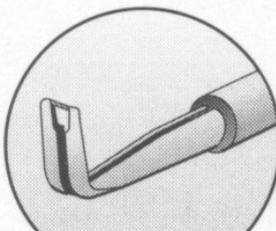
Mesure de la vitesse moyenne et de la fluctuation des flux dans des endroits inaccessibles, comme un



tube par exemple. Montée avec le corps de sonde perpendiculaire à la direction du flux.

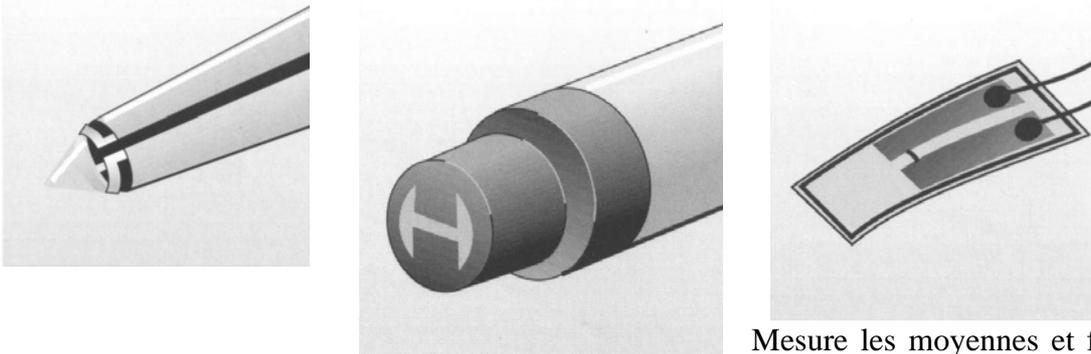
(i) Sondes à film, angle droit, film perpendiculaire à l'axe de la sonde

Mesure de la vitesse moyenne et de la fluctuation des flux dans des endroits inaccessibles. Le



capteur à 90° permet des mesures proches d'un plan fixe. Montée avec le corps de sonde perpendiculaire à direction du flux.

(j) Sondes coniques



Mesure les moyennes et fluctuations de vitesses dans des flux mono directionnels. Montée avec le corps de sonde parallèle à la direction du flux.

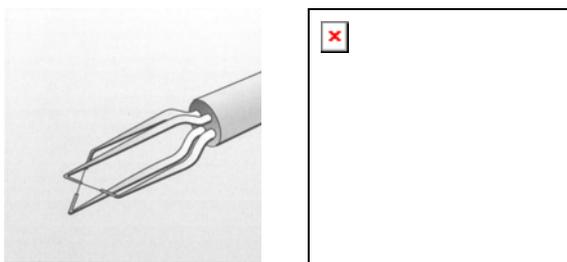
(k) « flush-mounting » sondes

Mesure du gradient de vitesse dans les couches limites laminares ou turbulentes. Détermine les points de transition et de séparation. Montée dans un trou du plan sur lequel s'écoule le flux, il faut placer la surface sensible à fleur du plan. Le capteur est orienté perpendiculairement à la direction du flux.

(l) Détermine les points de transition et de séparation et peut mesurer le gradient de vitesse et le transfert de chaleur. Elle est collée directement sur le plan. Le capteur est orienté perpendiculairement à la direction du flux.

(m) Sonde omnidirectionnelle

Mesure l'amplitude des champs de flux à faible vitesse de direction inconnue, principalement dans les flux tridimensionnels isothermes. Si le flux se réchauffe, il faut prendre des précautions pour compenser les variations de température. Montée avec le corps de sonde perpendiculaire à la direction du flux prédominant



Il existe également des sondes à deux capteurs qui combinent des orientations de sondes vues précédemment.

4.6. Supports de sondes

Les supports de sonde servent également de connecteur électrique entre la sonde et le câble, ils donnent en même temps une fixation mécanique à la sonde. Ils dépendent principalement du nombre d'élément sensible de la sonde, pour voir quelques exemples, se référer en annexes.

-

4.8. Quelques prix (référence DANTEC / année 2000) :

Une sonde avec support de sonde :	700 f
Un système d'acquisition analogique à une voie programmable limitée à 10 KHz:	9 000 f
Un système d'acquisition de laboratoire (logiciel de traitement inclus)	
Châssis comprenant 6 voies de mesures :	60 000 f
Chaque voie :	26 000 f
Carte analogique/digitale (interface PC) :	de 6 000 à 10 000 f
Le logiciel de traitement des données sur PC :	4 000 f
Un module d'étalonnage :	96 000 f

CONCLUSION

L'anémomètre à fil chaud reste l'instrument de mesure de base pour les études d'écoulements turbulents, en raison de son coût relativement modeste si on le compare à l'anémomètre laser. L'anémomètre laser est utile lorsque les intensités de turbulence sont grandes (de l'ordre de 30%) ; d'autre part, il a l'avantage de ne pas nécessiter d'étalonnage. Cependant, l'anémomètre laser mesure des vitesses de particules dans l'écoulement qui doit donc êtreensemencé ; pour cette même raison, le signal fourni n'est pas continu, et les petites structures turbulentes peuvent éventuellement être mal détectées.

De plus, en utilisant un système de type laser Doppler et le synchronisant avec les données acquises grâce à l'anémométrie par fil chaud, il est désormais possible d'obtenir directement des mesures de concentrations de flux.

Les techniques basées sur la visualisation (vélocimétrie par images de particules), qui nécessitent elles aussi un ensemencement, sont plus complémentaires que concurrentes de l'anémométrie à fil chaud et de l'anémométrie laser, car elles fournissent des informations plus spatiales que temporelles.

L'anémométrie à fil chaud est aujourd'hui présente dans de nombreux domaines expérimentaux, de par le fait de sa mise en œuvre aisée et de la fiabilité de ses mesures. S'il apparaît que son principe de fonctionnement est assez simple, il ne faut pas néanmoins oublier que les opérations de traitement de signal sont lourdes et nécessitent un investissement matériel assez onéreux qui relève significativement le prix d'exploitation de cette méthode. Cependant l'anémométrie par fil chaud se révèle bien moins coûteuse que les autres méthodes plus récentes.

CONTACTS

Gerard GRENAT <Grenat@onera.fr>
J.-B. Cazalbou <cazalbou@ensica.fr>
chassain <chassain@ensica.fr>
Jean-Luc Battaglia <jlb@lept-ensam.u-bordeaux.fr>
Pierre Paranthoen <Pierre.Paranthoen@coria.fr>
olivier fudym <ofudym@usach.cl>
gerard dury <gerard_dury@nomade.fr>
olivier fudym <ofudym@usach.cl>
Claude Rozé <roze@coria.fr>
Bertrand Aupoix <bertrand.aupoix@onecert.fr>
Frederic Moisy <moisy@fast.u-psud.fr>
Roger Borenes <roger.borenes@supaero.fr>

SITES INTERNET

<http://www.lab-systems.com>
<http://www.dantecmt.com>
<http://www.deltalab.fr>
<http://www.tsi.com>
<http://www.limsi.fr/RS98FF/MECA98FF/DYF98FF/dyf10/>
<http://perso.club-internet.fr/gatt/BTSCIRA/cours/MITA.htm>
<http://www.angelfire.com/ak/cvpage/cv.html>
<http://www.le-moteur-moderne.fr/Pages/fichesfr/sciA01fr.html>
<http://www.ensica.fr/2/2303fr.htm>
<http://www.commedia.univ-poitiers.fr/meca/metrologie/SYNT.HTML>
<http://www.enstimac.fr/recherche/ener/moyens/labo/metro.html>
http://www.supaero.fr/labos/AERO/moyens_essais.htm
<http://indy2.imt-mrs.fr/boiron/home/mapage.html>
<http://www.ensm-douai.fr/fr/recherche/ener/energ moy.html>
<http://www.limsi.fr/Individu/loc/>
<http://www.imft.fr/EMT2/aubrun.htm>
http://www.fast.u-psud.fr/%7Emoisy/cours_imf.pdf