

Anémomètre à fil chaud à température constante: (F4DXU)

Rappels théoriques :

Le Fil chaud est un capteur de mesure de la vitesse de l'écoulement d'un fluide. Ce fil chauffé est placé dans un écoulement, à l'équilibre, la puissance électrique P nécessaire pour le chauffer à une température T supérieure à la température du fluide est égale à la quantité de chaleur Q dissipée dans l'écoulement.

La quantité de chaleur transférée du fil au fluide est alors fonction des paramètres suivants : vitesse du fluide, écart de température entre le fluide et le fil, propriétés physiques du fil, orientation, dimensions de ce dernier, nature et propriétés du fluide considéré.

Le refroidissement du fil peut se faire par conduction, rayonnement, convection forcée ou libre. Généralement, la température du fil étant inférieure à 300°C, le rayonnement peut-être négligé. Le refroidissement par conduction est minimisé par la miniaturisation et la conception du capteur. La convection libre n'étant importante que pour de faibles vitesses, la convection forcée étant liée à la vitesse du fluide, c'est elle qui reste prépondérante. Le nombre sans dimension qui caractérise le transfert de chaleur est le nombre de Nusselt (Nu) qui dépend de 6 autres nombres sans dimension

$$Nu = f(Ma, Kn, Tf/Ta, Gr, Pr)$$

$$Re = \frac{Vd}{\nu}$$

V : vitesse normale au fil

D : diamètre du fil

ν : viscosité cinématique

Ma : nombre de Mach

Kn : nombre de Knudsen qui n'intervient qu'au faibles pressions

Tf/Ta : rapport des températures du fil et du fluide (T°c ambiante)

$$Pr = \frac{\nu}{h}$$

: nombre de Prandtl qui définit la nature de l'écoulement et peut, dans le cas des gaz, être souvent assimilé à une constante et h qui est la diffusivité thermique du fluide.

Gr : nombre de Grahof qui donne l'influence des forces de pesanteur sur l'écoulement et l'échange thermique, il n'intervient qu'aux faibles vitesses.

Nu est exprimé par la relation suivante : $Nu = \frac{cd}{k}$

: coefficient de transfert de chaleur

k : conductibilité thermique du fluide

La loi de Kramers sur les transferts de chaleur et la plus utilisée pour l'air et les gaz diatomiques.

$$Nu = 0,42Pr^{0,2} + 0,75Pr^{0,33} Re^{0,5}$$

Elle s'applique dans un domaine étendu de nombre de Reynolds : $0,01 < Re < 10000$

La quantité de chaleur cédée par le fil au fluide par unité de temps est : $Q = \alpha \pi d l (T_f - T_a)$

Avec : T_f = température du fil et T_a = température ambiante de l'écoulement.

Et en faisant intervenir Nu : $Q = \pi k l Nu (T_f - T_a)$

A l'équilibre thermique, la quantité de chaleur perdue par unité de temps est égale à quantité de chaleur produite par unité de temps par le courant électrique dans le fil : $Q = RI^2$

La loi de variation du fil en fonction de la température suit la loi : $R = R_0 (1 + \alpha (T_f - T_a))$

ou R_0 est la résistance du fil à la température de référence et le coefficient de résistivité en température du fil (0,36%/°C pour le tungstène/platine)

on peut écrire :

$$RI^2 = \pi k l \frac{R - R_0}{\alpha R_0} Nu \quad \text{ou encore} \quad \frac{RI^2}{R_0} = \frac{\pi k l Nu}{\alpha R_0}$$

En prenant la loi de Kramers on aboutit à la loi générale de King : $RI^2 / (R - R_0) = A + BV^{0,5}$

Dans la pratique, les coefficients A et B sont déterminés expérimentalement. Les fluctuations de vitesse de l'écoulement créent des variations de température du fil qui induisent des variations de la résistance de ce dernier. Le cœur d'un anémomètre à température constante est un pont de Wheastone dont l'une des branches est constituée par le fil. La tension de déséquilibre induite correspond à la mesure de la vitesse de l'écoulement. D'où :

$$U^2 / (R - R_0) = A + BV^{0,5}$$

donc :

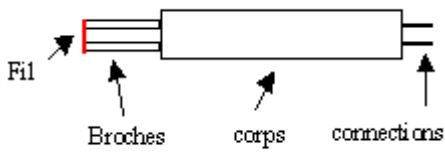
$$U^2 = A' + B'V^{0,5}$$

Elément de mesure :

Il existe 2 types de capteurs :

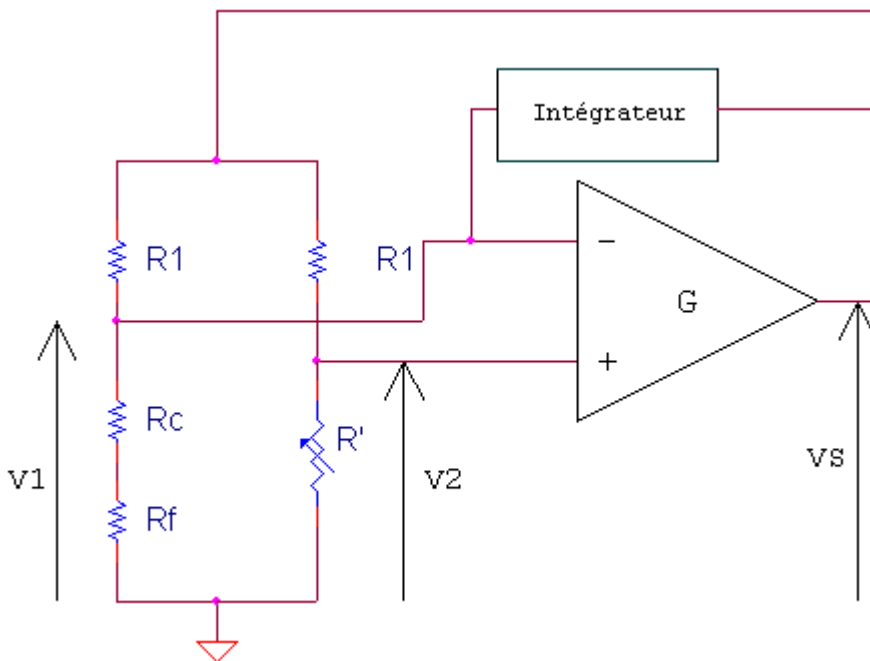
- L'élément sensible que l'on utilise en général pour la mesure est constitué d'un fil en tungstène platiné de 2,5µm ou 5µm de diamètre, les broches sont en cuivre et contiennent 2% de béryllium, les broches dans leur section la plus grande offrent un diamètre de 2/10^e de mm et sont écartées de 5/10^e environ.
- Le « film » quant à lui est constitué d'un dépôt de platine sur un support isolant en quartz.

L'anémomètre décrit plus loin n'utilisera que le fil. Les sondes à fil peuvent avoir différentes configurations ; On trouve principalement des sondes à 1, 2 ou 4 fils. Chaque élément mesurant une composante de la vitesse dans un plan qui lui est perpendiculaire.



Sonde à fil

Principe de fonctionnement de l'anémomètre (CTA) :



- avec : R_c = résistance du câble
- R_0 = résistance du fil à température ambiante
- R_f = résistance du fil à température de fonctionnement
- T_a = température ambiante
- T_f = température de fonctionnement du fil
- a = coefficient de surchauffe
- R_2/R_1 = rapport de pont

Il est constitué d'un pont de wheastone suivi d'une boucle de régulation constituée d'un amplificateur de différence à gain (G) et d'un intégrateur. Le rapport de pont k est en général compris entre 5 et 10 ce qui permet d'envoyer le maximum de puissance dans le fil mais la compensation de l'impédance du câble est plus complexe.

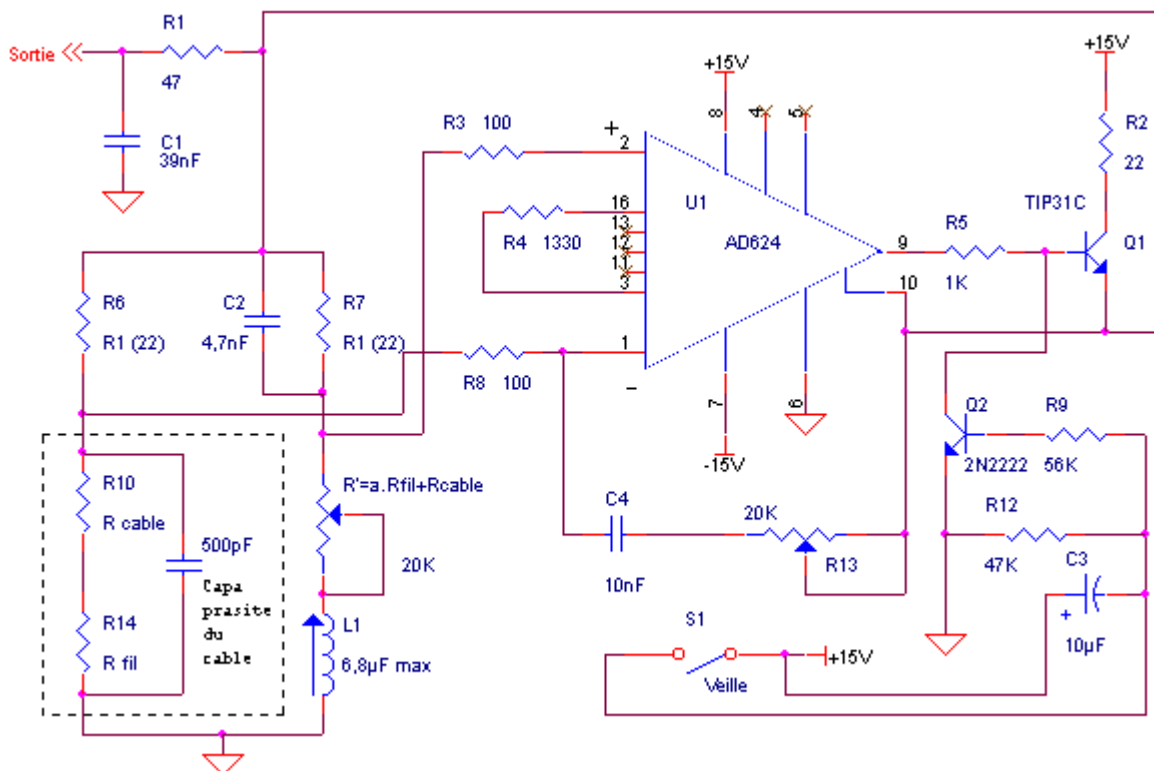
Condition de réglage : $R' = k.(a.R_0 + R_c)$ avec $a = \frac{R_f}{R_0} = 1 + \alpha.(T_f - T_a)$ pour que le pont de Wheastone soit déséquilibré et que la tension V_s ne soit pas nulle. Dans ces conditions, le fil reçoit de l'énergie et peut atteindre la température de fonctionnement déterminée par a .

A l'équilibre : $R' = k.(R_c + R_f)$, ceci est vrai à condition qu'un intégrateur soit inclus dans la boucle de régulation pour supprimer le traînage de V_s . En effet, si $R' = k.(R_c + R_f)$, la différence $V_2 - V_1$ est nulle et donc V_s est nulle et le fil ne reçoit aucune énergie. En réalité, V_s n'est pas nulle et V_2 n'est pas égale à V_1 , le système ne suit pas totalement la consigne (traînage).

Pour une vitesse d'écoulement d'environ 200m/s, la bande passante de l'anémomètre atteint les 100 kHz et augmente avec la vitesse alors qu'elle n'est que de quelques kHz sans régulation de température. A cette fréquence le câble coaxial de liaison entre l'anémomètre et le fil se comporte « essentiellement » comme une capacité, il est nécessaire de prévoir une cellule de compensation du câble dans le pont de Wheatstone pour ne pas limiter la bande passante du système et le slew-rate. Cette compensation est plus simple à réaliser avec un rapport de pont $k = 1$. Dans un cas extrême, la résistance R' peut être connectée au pont par l'intermédiaire d'un câble identique en caractéristique et longueur au câble qui alimente le fil.

Tous les pôles des éléments actifs qui constituent l'anémomètre doivent se situer en dehors de la bande passante de l'anémomètre ; si cette condition n'est pas satisfaite, le système devient instable, entre en oscillation et le fil est détruit par fusion.

Schéma de principe :



$$G = 31$$

$$R' = a.R_{fil} + R_{cable}$$

$R_{fil} = 3$ à 10 ohms à température ambiante

$R_{cable} =$ environ 2 ohms pour 5 mètres (fonction du câble coaxial)

'a' peut avoir toutes les valeurs entre $1,05$ et $1,9$. en dessous de $1,05$ la boucle "n'accroche" plus, au dessus de $1,9$ c'est préjudiciable pour la durée de vie du fil, de plus le rayonnement du

fil évolue comme la puissance quatrième de la température ce qui à pour effet d'introduire des erreurs de mesure.

Note :

Si l'on choisi un coefficient de surchauffe 'a' *faible*, la mesure sera dans ce cas une mesure de *température* du fluide car le fil sera plus sensible à la température (thermomètre) qu'à la vitesse. A l'inverse, si 'a' est *élevé* le fil sera sensible à la *vitesse* (anémomètre). Il est a noter que quelque soit la valeur de 'a', il existe toujours une corrélation vitesse/température.

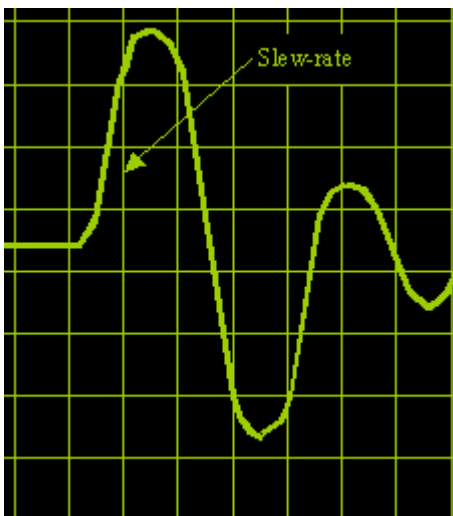
Procédure et Réglages :

Procédure:

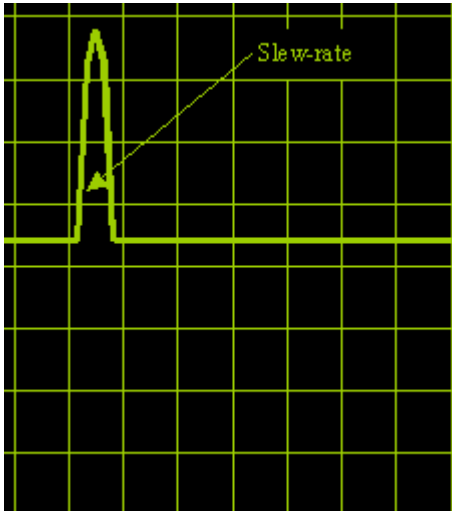
- Mesurer la résistance du câble coaxial (R_{cable}) mis en court-circuit à une extrémité.
- Mesurer la résistance du fil (R_{fil}) à la température ambiante.
- Choisir la valeur de 'a' en fonction des mesures à effectuer.
- positionner le capteur dans le dard d'un jet d'air (non turbulent).
- Mettre l'anémomètre en position veille et alimenter l'ensemble. L'anémomètre est prêt à fonctionner.
- A la jonction de R6 et de R_{cable} il faut injecter un signal carré de 100mV crête à crête à travers une résistance de 27 Kohm.

Réglages :

- Mettre l'anémomètre en marche et observer le chronogramme ci-dessous.



- Régler L1 pour augmenter au maximum le slew-rate sans déformer le pied de la première alternance.
- Régler R13 pour qu'il ne subsiste plus qu'une seule alternance (voir chronogramme ci-dessous).



On constate que sur ce chronogramme que le slew-rate et le temps de réponse sont fortement améliorés. L'anémomètre est réglé et prêt à l'emploi.

Applications

Ce type d'anémomètre est, de nos jours, encore très utilisé en aérodynamique dans les veines d'essais. Il est aussi utilisé sous forme de peigne de fils ce qui permet d'obtenir des mesures dans une tranche de la veine. Si l'on remplace le fil par une lampe incandescente qui sera préalablement débarrassée de son ampoule de verre on réalise un anémomètre météorologique qui aura des performances dynamiques plus faibles étant donné la taille du filament, mais quelle importance si c'est pour mesurer la vitesse moyenne du vent:!!

Bonne bidouille !! F4DXU