

RÉPUBLIQUE DU SÉNÉGAL



ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE THIÈS

GC.0677

PROJET DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGÉNIEUR DE CONCEPTION

TITRE Conception et réalisation
d'un anemometre
à fil chaud

DATE : JUIN 86

AUTEUR : Momath BA
DIRECTEUR : A. WOLSKI
CO-DIRECTEUR : D. BEDARD

à Sidiki Kane
qui n'est plus.

REMERCIEMENTS

Je remercie Monsieur A. Wolsky, directeur de ce projet pour sa compréhension et son aide. Ma sincère gratitude à Monsieur R. Prince pour tout le matériel et tous les documents qu'il a bien voulu mettre à ma disposition, pour tout l'effort qu'il a fourni pour que ce projet aboutisse.

Enfin toute ma reconnaissance à Monsieur Bédard (C.E.R.E.R) pour la disponibilité dont il a fait montre.

#

Sommaire

Ce présent rapport traite d'un sujet proposé par le C.E.R.F.R. consistant à concevoir et réaliser un anémomètre à fil chaud.

Cet appareil à asservissement électronique doit remplacer l'anémomètre électromécanique et permettre en plus de l'évaluation de vitesses de vent, la mesure de turbulence d'un écoulement.

On fera une étude théorique de la loi de transfert de chaleur entre le fil chaud et le fluide, un choix du mode opératoire du filament, une conception d'un circuit électronique approprié, une analyse des résultats obtenus grâce à l'appareil ainsi réalisé.

On peut dire, et c'est prévisible, que la réponse du fil anémométrique aux variations de vitesse de vent n'est pas linéaire, c'est pourquoi on trouvera, aussi dans ce rapport, la conception et la réalisation d'un linéarisateur anémométrique à circuits intégrés.

¶

TABLE DES MATIERES

Dedicaces	i
Remerciements	ii
Sommaire	iii
Introduction	1

A. ETUDES THEORIQUES

1. Échauffement du fil	3
2. Réponse du fil chaud à une vitesse variable	5
2.1 principe de mesure	5
2.2 formules de calcul	6
2.3. résultats de mesure.1	7
2.4. résultats de mesure.2	9
2.5. interprétation des résultats	11
3. Variation du courant dans un fil soumis à un vent constant	
3.1 principe de mesure	13
3.2 formules de calcul	14
3.3 résultats des mesures	14

4. Echange de chaleur entre le
fil chaud et le fluide 17

5. Mode d'opération de l'anémomètre

5.1 Montage à intensité constante 27

5.1.1 principe de fonctionnement 27

5.1.2. dérivation mathématique 30

de la sensibilité à intensité
constante : S_I

5.2. Montage à résistance cte.

5.2.1 Montage à résistance constante 33

5.2.2 dérivation mathématique 34

de la sensibilité de l'anémomètre
à résistance constante. S_T

5.3. Choix du mode d'opération 35

B- CONCEPTION DU TRANSDUCER

1. Résumé des contraintes 37

2. Type de senseur et température
de fonctionnement 38

3. Circuit du transducteur 41

3.1 fonctionnement du circuit de mesure 43

3.2 Analyse et dimensionnement

3.2.1 le transistor T_1 45

3.2.2. Le pont de wheatstone	47
3.2.2.1 sensibilité	48
3.2.2.2 compensation des grandeurs d'influences	49
3.2.3 L'amplificateur différentiel A ₁	50
3.2.4 système de régulation de tension	51

C. REALISATION DE L'ANEHOMETRE à température constante

1. Liste des composants	53
2. Mesures et courbes de calibration	55
3. Analyse des résultats et recommandations	58
3.1 détecteur de pics	62
3.2 convertisseur tension fréquence	63

D. Conception et Réalisation d'un Anémomètre à Température constante

1) Critères de conception	65
2) les amplificateurs log. et antilog.	68
3) Circuit linéarisateur	70
3.1 test des 2 circuits log.	72
3.2 test du circuit antilog	73
3.3 analyses	74

E - MESURE DE VITESSE AVEC
ANEMOMETRE MUNI DU LINEARISATEUR . . .

- | | |
|--------------------------|----|
| 1. principe de mesure | 76 |
| 2. tableau des résultats | 77 |
| 3. Interprétations | 80 |

F - CONCLUSION 81
‡
RECOMMANDATIONS

ANNEXES .
anémomètre à hélices 86
(calibration)

~H

INTRODUCTION

Le but de ce projet est de concevoir et réaliser un anémomètre pour la mesure de la vitesse du vent.

Le type de senseur est un fil chaud de faible diamètre que l'on peut chauffer électriquement et dont la résistance est variable avec la température.

Placé dans un écoulement, cet élément est refroidi par convection forcée. Sa température, et donc sa résistance, dépendent de la vitesse et de la température du fluide incident.

Cette approche par rapport au senseur électromécanique permet d'obtenir une fiabilité, et une sensibilité accrues, ce qui fait que ce type d'anémomètre peut être employé dans plusieurs domaines : mesure du vent en soufflerie, en météo, pour l'enregistrement du gisement éolien, du flux incident sur un capteur solaire ...

L'anémomètre à fil chaud est aussi un appareil de choix pour l'étude expérimentale, en fonction du temps et de l'espace, des grandeurs locales d'un écoulement turbulent, car il peut suivre des phénomènes très rapidement variables avec le temps grâce à sa bonne réponse en fréquence. En plus il n'est pas encombrant et n'apporte que de faibles perturbations au mouvement préexistant dans le fluide à l'endroit où on le place.

Le circuit comporte en plus du senseur, un circuit électronique associé qui est à la fois un organe d'amplification et d'asservissement.

Il est conçu pour un fonctionnement, avec une tension continue (9V) avec une pile, ou sur le secteur à l'aide d'un adaptateur.

Les mesures peuvent être affichées en utilisant un mouvement d'Arsonval, ou un affichage à cristaux liquides. La calibration est faite, à l'aide d'un anémomètre à hélice (un ou deux), les mesures étant prises dans une gaine de soufflerie.

L'élaboration d'un tel instrument ne peut être sans difficultés compte-tenu de nombreux phénomènes physiques qui influent sur les mesures, et de la non-linéarité de la réponse du fil chaud aux variations de vitesse du vent.

Parmi les facteurs physiques on peut citer :
corrosion du fil, inertie thermique, température ambiante, humidité, fréquence de variation de la vitesse

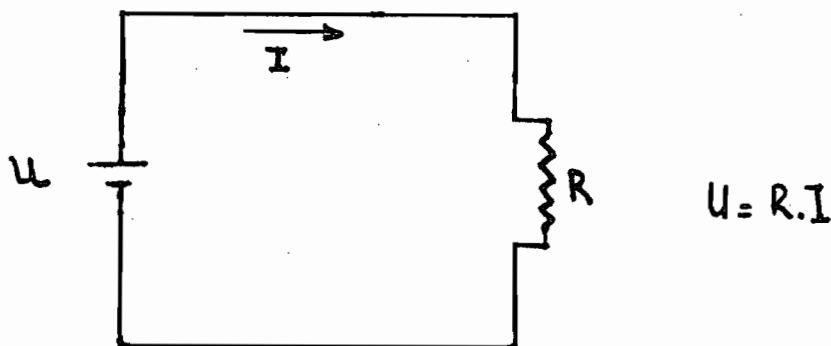
A₀ / ETUDES THEORIQUES

L'objectif de cette partie est, après analyse du comportement du fil chauffé, de concevoir un système électronique de commande qui le fera fonctionner suivant le mode que l'on aura jugé adéquat.

- Nous étudierons :
- l'échauffement dans le fil
 - réponse du fil chaud à une vitesse variable
 - Transfert de chaleur : fil - fluide
 - Mode d'opération
 - fonction de transfert
 - ...

1. Echauffement du fil.

On utilise tout simplement l'effet joule :



La résistance R (celle du fil) soumise à la tension U , et traversée par le courant I , est chauffée par effet joule avec une puissance : $Q = R \cdot I^2$

Comme le fil est exposé à l'ambiance, la chaleur dégagée va très vite atteindre une valeur d'équilibre, la température du fil aussi.

L'énergie totale fournie est composée de celle qui sert à maintenir le fil à la température d'équilibre et celle qui est cédée à l'environnement.

La résistance évolue lors du processus, on atteint aussi une résistance d'équilibre, qui correspond à la température d'équilibre.

La variation de la résistivité du fil est donnée par:

$$\rho_T = \rho_{T_0} [1 + a_1 (T - T_0) + a_2 (T - T_0)^2 + \dots]$$

ρ_T : résistivité à la température T

a_i : coeff. de température du fil au $i^{\text{ème}}$ degré

ρ et a_i dépendent de la nature du fil, du type... on peut trouver des valeurs de ρ et a_i pour un matériau donné (Cu, W, Al, ...) dans les catalogues.

La formule généralement utilisée est:

$$R_2 = R_0 (1 + \alpha t) \quad \text{ou} \quad R_{T_2} = R_{T_1} (1 + \alpha \Delta T)$$

$$\text{avec } R = \rho \frac{l}{S}$$

- ρ : la résistivité
- l : longueur du fil
- S : section du fil

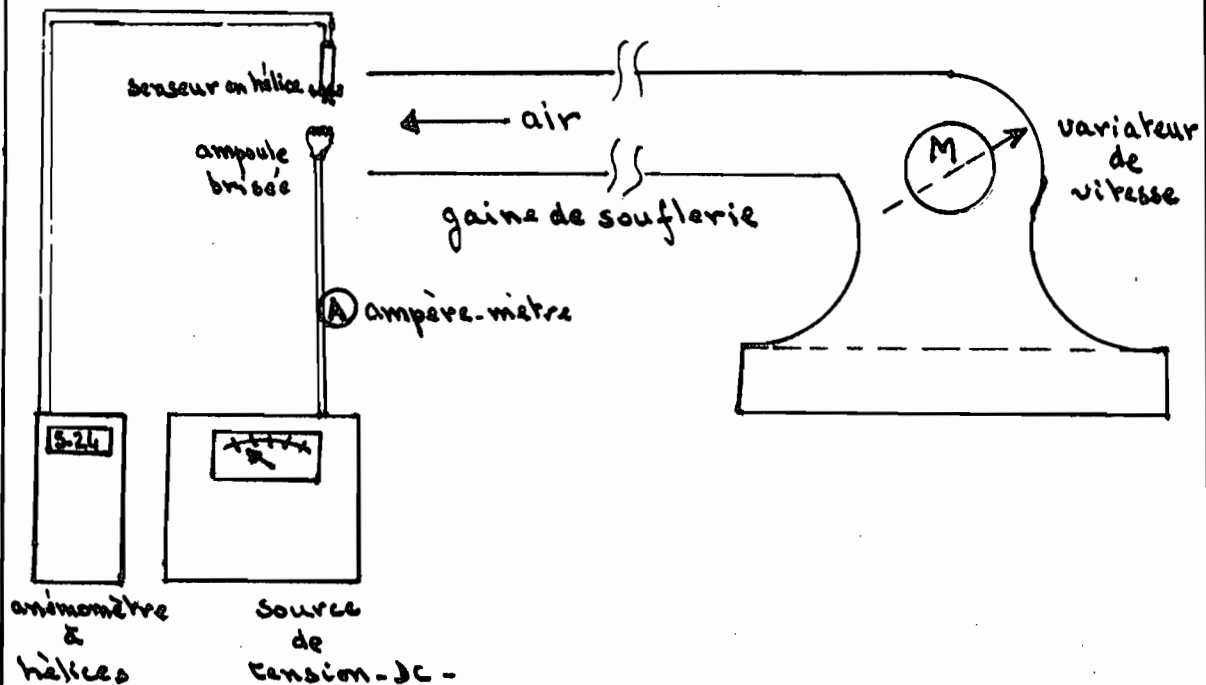
Nous pouvons dire que la température du fil dépend de l'ambiance et de la tension, et que la résistance varie linéairement avec la température.

2. Réponse du fil chaud à une vitesse variable.

Il s'agit de prendre des mesures à l'aide d'un anémomètre à hélices et de la gaine de la soufflerie, pour établir les courbes de réponse du fil chauffé.

Ceci devra permettre d'analyser succinctement le comportement du fil face à la variation du vent.

2.1 Principe de mesure



on réalise des mesures sur divers types d'ampoule en maintenant pour chaque mesure une tension constante mais suffisante pour porter le filament à une température proche du point rouge, entre cent (100) et deux cent (200) degrés celsius ($100-200\text{ }^{\circ}\text{C}$) pour un petit fil.

Une température trop élevée accélèrera la corrosion du fil.

2.2 formules de calcul

La tension U , la vitesse v , l'intensité I , et la température ambiante T_a , ainsi que la résistance à T_a sont les valeurs à mesurer.

on en déduit par simple application des formules connues:

$$R = \frac{U}{I} \quad : \text{résistance du fil}$$

à partir de $R = R_a (1 + \alpha_a (T - T_a))$

on tire la température de fonctionnement T :

$$T = T_a + \frac{R - R_a}{\alpha_a \cdot R_a}$$

La puissance d'équilibre est donnée par:

$$P = R \cdot I^2 = U \cdot I$$

A une tension constante U , (R, I, T, P) dépendent de T_a et de v , et sont constantes pour une T_a et une v constantes.

Pour les mesures, on utilisera que des ampoules de tungstène (W) dont le coefficient de température est à peu près:

$$\alpha_{25^\circ\text{C}} \approx 4,37 \cdot 10^{-3} \quad (\text{voir page$$

2-3 ampoule de tungstène S1003 - $R_a = 1\Omega$ - $T_a = 24^\circ\text{C}$ - $U = 0,967\text{V} = \text{cte}$

V(m/s)	0	0,03	1,2	1,9	2,2	2,6	4,8	5,2	5,7	6,2	6,6	7,3
I(A)	0,270	0,270	0,293	0,317	0,323	0,333	0,375	0,377	0,383	0,386	0,389	0,393
P(W)	0,261	0,261	0,283	0,306	0,312	0,322	0,363	0,364	0,370	0,373	0,376	0,380
R(Ω)	3,58	3,58	3,3	3,05	2,99	2,90	2,58	2,56	2,52	2,50	2,49	2,46
T($^\circ\text{C}$)	615	615	550	493	480	459	385	382	372	367	365	358
$P - P_0$ (w)	0	0	0,022	0,045	0,051	0,061	0,102	0,103	0,109	0,112	0,115	0,119

8,5	9,9	10,7	11,5	13,2	14,6	15,3	16,2	17,3	18,7
0,397	0,402	0,404	0,406	0,409	0,411	0,412	0,414	0,415	0,415
0,384	0,389	0,381	0,393	0,395	0,397	0,398	0,400	0,401	0,401
2,44	2,40	2,39	2,38	2,36	2,35	2,35	2,34	2,33	2,33
353	344	342	340	335	333	333	331	328	328
0,123	0,129	0,130	0,132	0,134	0,136	0,137	0,139	0,140	0,140

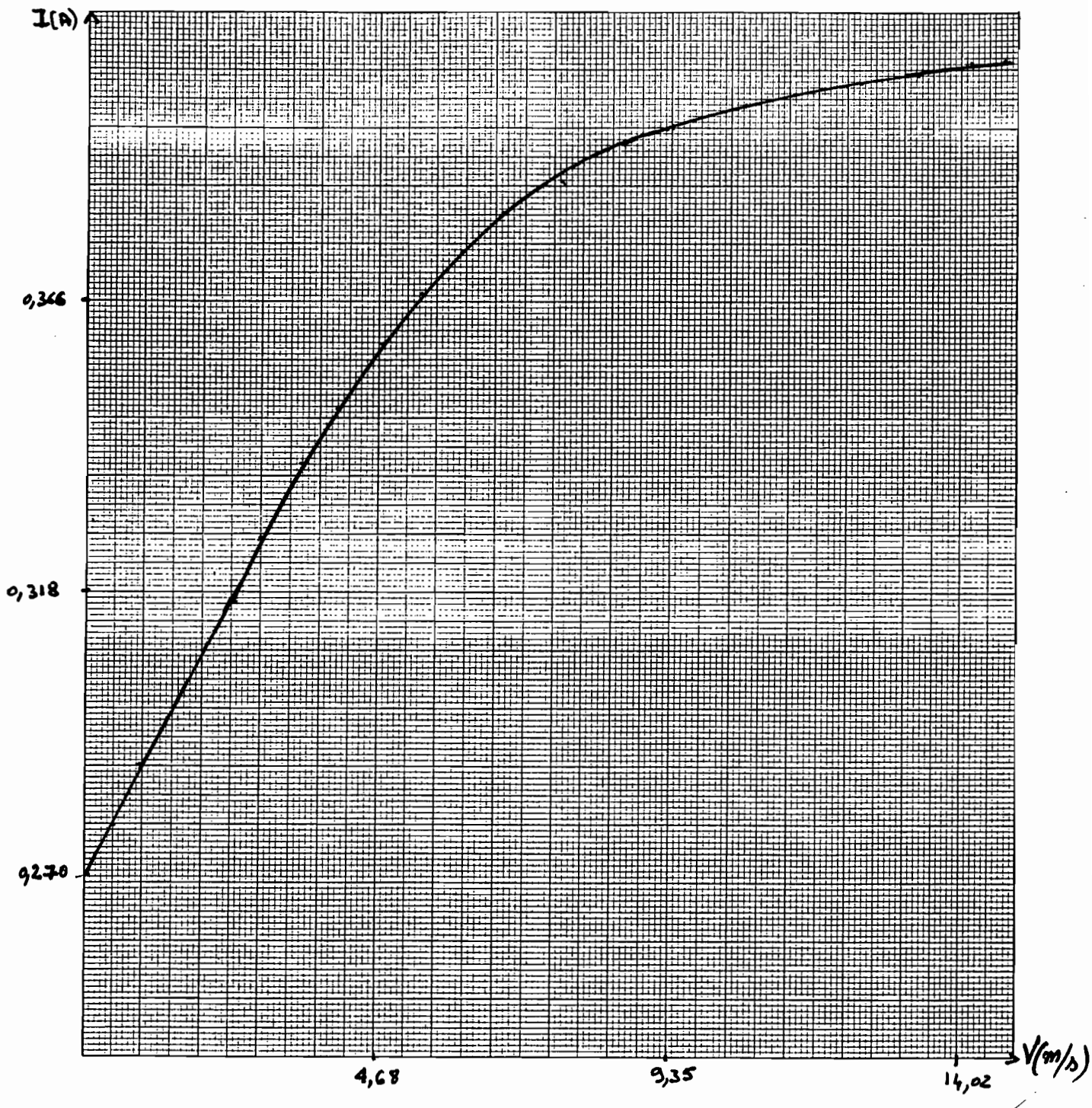


FIGURE 2.3.1

LÉGENDE: ampoule . S.1003 .

$$U = 0,967 \text{ V}$$

$$T_a = 24^\circ\text{C} , R_{24^\circ\text{C}} = 1 \Omega$$

2-4 ampoule de tungstène 6V-15W - $R_a = 0,953\Omega$ - $T_a = 25^\circ\text{C}$ - $U = 0,96\text{V} = \text{cte}$

V(m/s)	0	0,3	0,4	0,9	1,0	1,1	1,3	1,7	2,0	2,2	2,4	2,7
I(A)	1,01	1,07	1,08	1,12	1,13	1,14	1,15	1,17	1,20	1,21	1,22	1,24
P(W)	0,97	1,03	1,04	1,08	1,09	1,10	1,11	1,13	1,15	1,16	1,17	1,19
R(Ω)	0,95	0,90	0,89	0,86	0,85	0,84	0,836	0,82	0,80	0,795	0,79	0,78
T($^\circ\text{C}$)	25	14,4	12,9	6,92	3,91	2,90	2,10					
P-B(w)												

3,0	3,2	4,2	5,2	6,2	7,2	8,5	10	11,8	13,4	15,6	17,5	18,9
1,25	1,26	1,30	1,32	1,33	1,34	1,35	1,36	1,37	1,37	1,37	1,38	1,38
1,20	1,25	1,25	1,27	1,28	1,29	1,30	1,31	1,31	1,32	1,32	1,32	1,33
0,77	0,76	0,74	0,73	0,72	0,71	0,71	0,71	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70

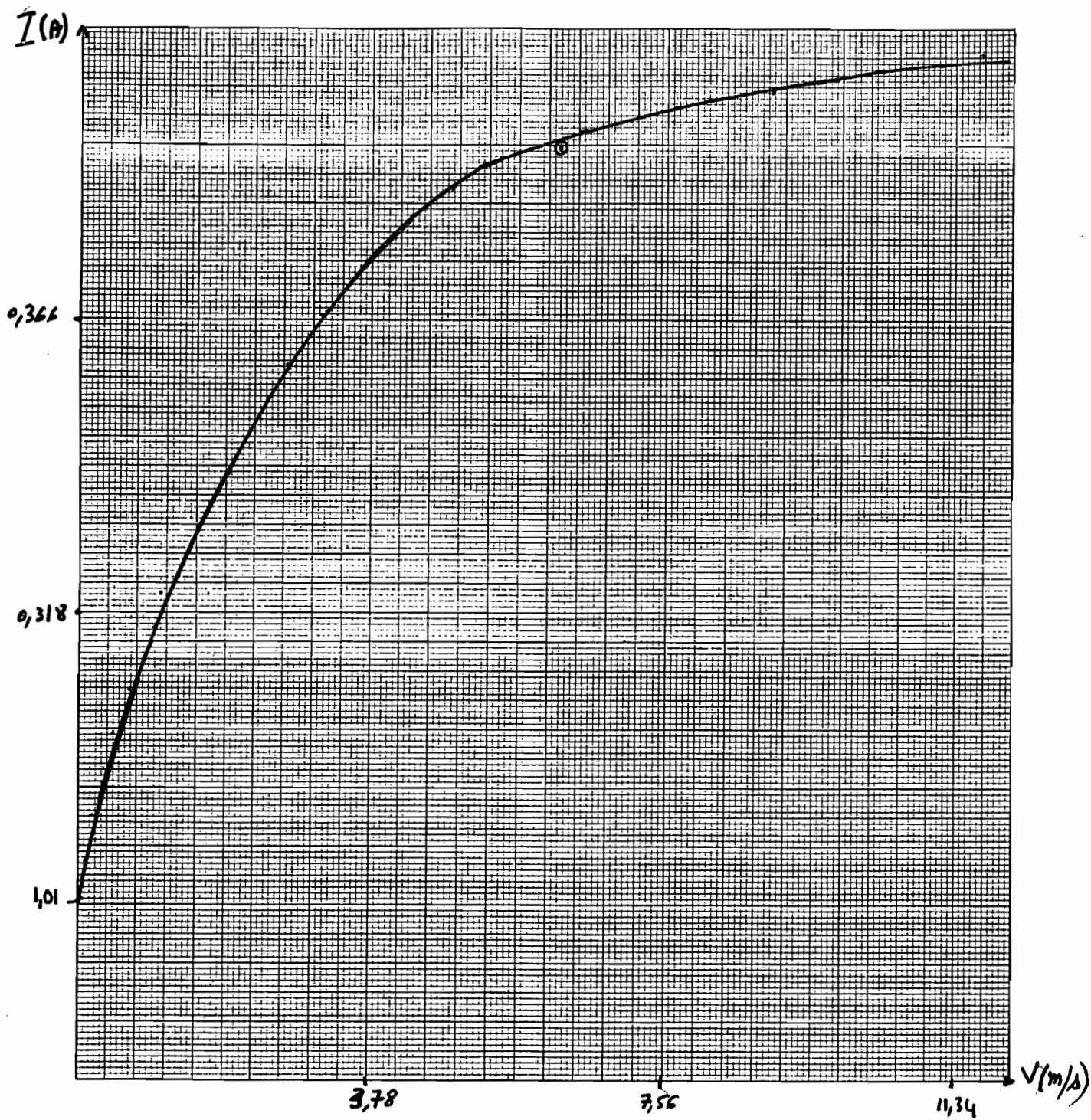


FIGURE 2.4.1

LÉGENDE: ampoule brisée de 6V - 15W

$$U = 0,962 \text{ V}$$

$$R_{25^{\circ}\text{C}} = 1,2$$

2-5 Interprétation des résultats

Les résultats pour ces deux types de filaments sont représentés sur les courbes $V(m/s) - I(mA)$, celles-ci montrent bien la caractéristique non-linéaire de la réponse du fil chaud, à une vitesse de vent variable. (fig 2.3.1 et fig 2.4.1)

Comme la tension a été maintenue constante lors de la prise des mesures, il en découle que l'allure de la courbe $V(m/s) - P(W)$ est identique à celle de $V - I$ alors que celle de $V - R$ en est l'inverse.

Il faut remarquer que pour maintenir un équilibre entre la chaleur otée au fil et l'énergie qui y est introduite, le courant augmente (non linéairement) avec la vitesse de refroidissement.

Mais cette augmentation du courant ne pouvant se faire indéfiniment, celui-ci finit par atteindre un certain seuil (asymptote des courbes), et devient indifférent à l'augmentation de vitesse, le fil a atteint un régime de saturation qui résulte du fait que l'énergie qui y est introduite est insuffisante pour le chauffer à une température sensible. Pour augmenter l'intensité de seuil il faut augmenter la puissance disponible c'est-à-dire la tension U .

Dans la zone de saturation du filament, les règles de calcul déjà établies ne peuvent plus s'appliquer car la condition d'équilibre d'énergie (input - output) n'est plus valable, ceci se traduit par les aberrations des dernières mesures,

notamment, de la température du filament. En effet celui-ci est nu-refroidi, l'énergie de chauffage devenant insuffisante, la sensibilité insignifiante.

Cette analyse nous permet de dire que pour mesurer la vitesse sur une plage importante, il faut disposer d'un circuit permettant constamment d'assurer le fil en énergie suffisante pour le maintenir à une température sensible.

Une solution moins sophistiquée consisterait, surtout pour la zone de non sensibilité, à diminuer la quantité d'énergie enlevée au fil, en réduisant le coefficient de transfert de chaleur de celui-ci au moyen d'un revêtement adéquat (mélange résine-quantz-celle...), mais la calibration d'un tel système serait des plus incertaines, et les résultats les moins fiables.

3 - Variation du courant dans un fil soumis à un vent constant.

On a, un peu plus haut étudié la réponse du fil chaud à un vent de vitesse variable, en maintenant à ses bornes une tension constante.

Il s'agit maintenant de voir la variation du courant face à un vent constant, mais avec une tension variable aux bornes du fil.

Il faut tout de suite dire que, contrairement à ce que l'on pourrait penser, cette expérience n'a rien de semblable à celle qui étudie $u = f(I)$, où la résistance R est une constante (résistance du commerce).

En effet dans cette dernière, il n'y a rien de nouveau la courbe $u = f(I)$ est linéaire.

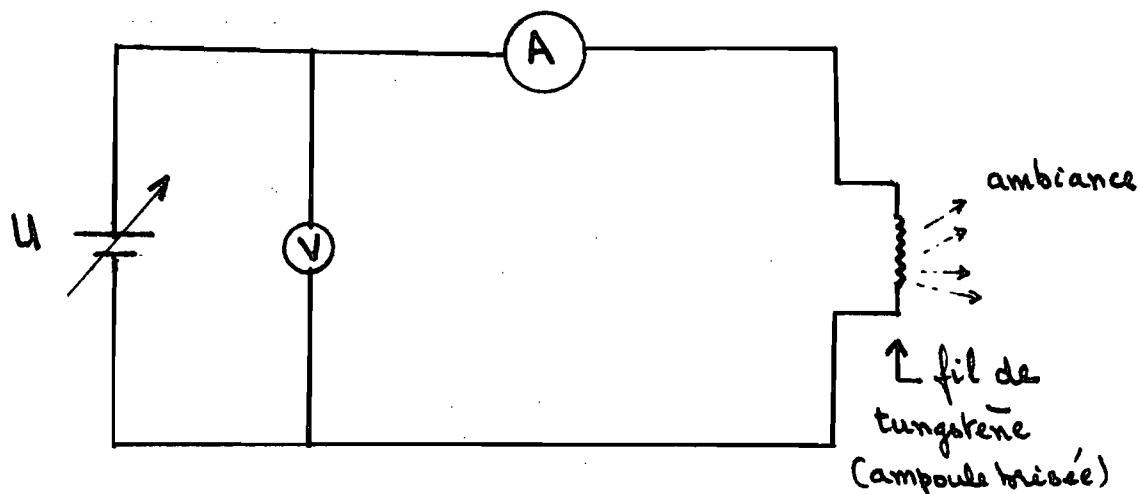
Toute la différence entre ces deux expériences est que une résistance fixe, conventionnelle, dissipe une quantité de chaleur insignifiante par rapport à celle que le fil chaud transmet à l'ambiance. La résistance du fil est pour cette dernière raison dépendante de la tension.

3.1 - Principe de mesure.

on utilise une ampoule brisée soumise à une tension variable et à l'ambiance du laboratoire qui en toute fin pratique, a une température

et une vitesse de circulation de l'air que l'on peut supposer constantes.

Le schéma du montage est comme suit :



3.2 Formules de calcul

La tension et le courant lus par le volt-mètre et l'ampère-mètre permettent de calculer avec les mêmes formules de calcul que précédemment la résistance R , la puissance P et la température du fil T .

3.3 . Résultats des mesures

(voir tableau ci - après).

La courbe des résultats (fig. 3.3.1) montre la non-linéarité de la fonction de transfert .

Ceci confirme bien les prévisions .

3-3 ampoule de tungstène 220V-40W - $R_{25^{\circ}\text{C}} = 37\Omega$ - $T_a = 25^{\circ}\text{C}$ - vitesse constante (ambiante de labo)

U (V)	1,01	1,50	1,73	2,88	3,45	3,96	4,98	5,56	6,01	6,51	7,57	8,00
I (mA)	26,2	37,9	41,9	62,7	70,4	76,3	86,7	92,2	96,1	100,2	107,3	110,8
R (Ω)	38,55	39,58	41,77	45,93	49,00	51,90	57,44	60,30	62,54	64,97	70,55	72,00
P (W)	0,026	0,057	0,072	0,181	0,243	0,302	0,432	0,513	0,577	0,652	0,81	0,89
T ($^{\circ}\text{C}$)	34,6	41	54	80	99	117	151	169,5	183	198	232	241
$\frac{\% \Delta P}{\Delta U}$ ($\frac{\text{W}}{\text{V}}$)	2,6	6,33	6,52	9,48	10,9	11,6	12,7	14,0	14,2	15,0	14,9	18,6

8,48	9,01	9,51	10,00	10,50	12,07	14,51	12
113,4	115,3	116,9	120,8	122,1	124,7	126,9	128,4
74,80	78,14	81,35	82,78	86,00	88,77	90,70	93,4
0,96	1,04	1,11	1,21	1,28	1,38	1,46	1,54
259	279	299	308	328	345	357	374
14,6	10,2	14,0	20,4	14,0	17,5	18,2	16,3

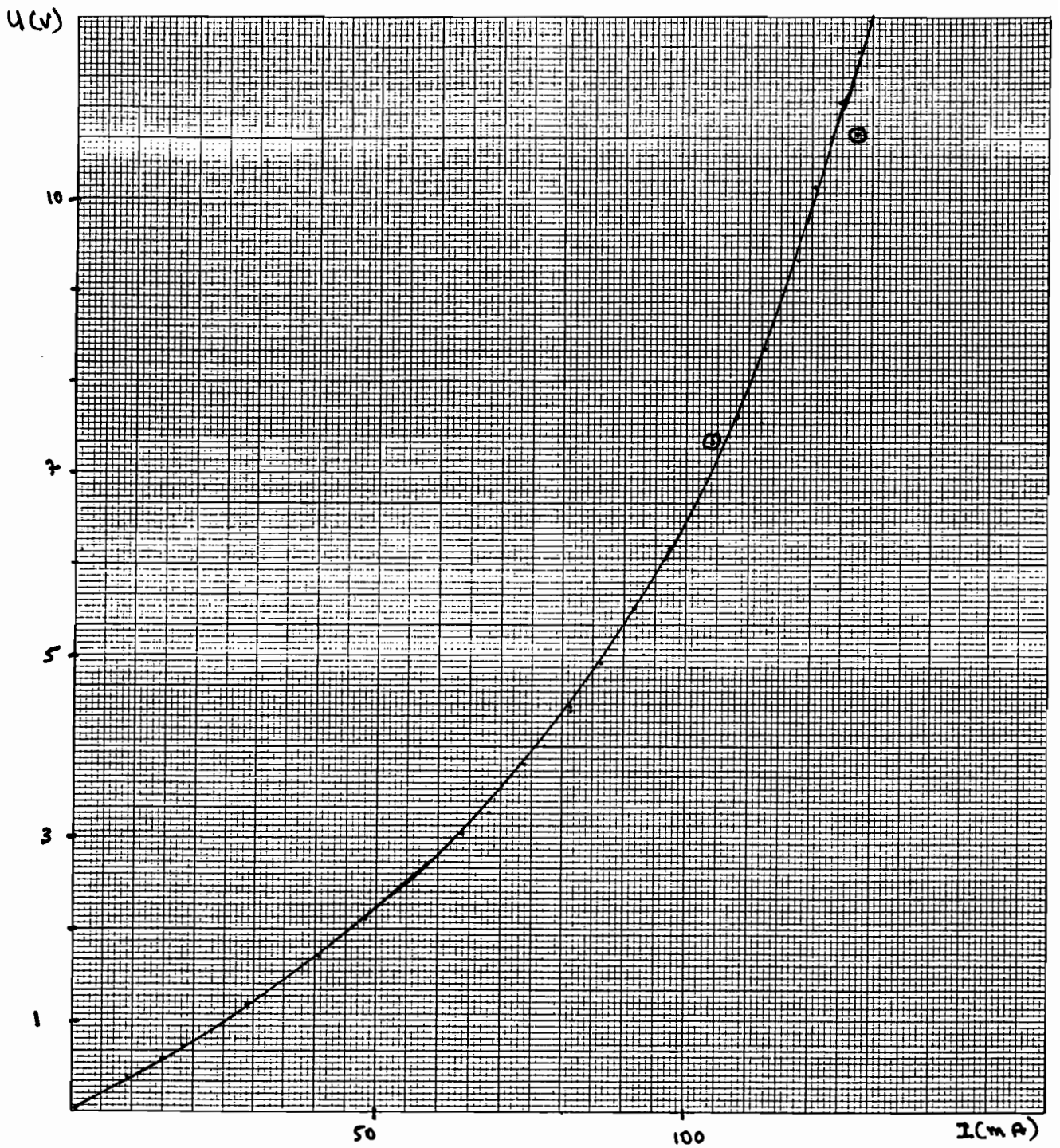


FIGURE 3.3.1

LÉGENDE: ampoule 220V (40W)

$$R_{\text{sec}} = 37\Omega$$

4. Echange de chaleur entre le fil chaud et le fluide

Lorsqu'on place, dans un écoulement, un fil porté, par effet joule, à une température supérieure à celle de l'écoulement, il se produit un échange de chaleur entre ces deux éléments.

Cet échange est fonction des propriétés physiques du fluide, de sa vitesse et de l'écart de température entre l'élément chauffé et le fluide.

La température d'équilibre du fil qui constitue le capteur est déterminée par la mesure de sa résistance: elle est fonction de la puissance joule dissipée et de la vitesse du fluide qu'il s'agit de déterminer.

Le métal utilisé pour la réalisation du capteur doit avoir un coefficient de température de la résistance élevé, on utilise à cet effet un fil très fin de platine ou de tungstène.

La puissance joule P_j dissipée dans une résistance à la température T_w , de valeur $R(T_w)$, et traversée par un courant continu I , a pour expression :

$$P_j = R(T_w) \cdot I^2 \quad (4.1)$$

(T_w - w est utilisé pour indiquer le tungstène qui a été utilisé)

En admettant que les échanges thermiques se font uniquement par convection forcée du fluide, à la température T_a , la puissance échangée peut s'écrire :

$$P_c = h \cdot S_\ell \cdot (T_w - T_a) \quad [4.2]$$

où h : coefficient d'échange thermique,
 S_ℓ : surface latérale du capteur,

Pour un fil cylindrique de diamètre D et de longueur l :

$$S_\ell = \pi \cdot D \cdot l \quad [4.3]$$

A l'équilibre thermique : $P_c = P_J$

$$\text{soit : } R(T) \cdot I^2 = h \cdot \pi \cdot D \cdot l \cdot (T_w - T_a) \quad [4.4]$$

Pour tenir compte des divers paramètres entrant en jeu, on pose de façon générale :

$$h = \frac{k \cdot Nu}{D} \quad [4.5]$$

où :

k : conductance thermique du fluide

D : diamètre du fil

Nu : nombre de Nusselt

Le nombre de Nusselt est fonction de plusieurs paramètres :

$$Nu = f(Re, Pr, \frac{T_w}{T_a}, Kn)$$

où :

Re : nombre de Reynolds $\rightarrow Re = \frac{VD}{\nu}$ [4.6]

Pr : nombre de Prandtl $\rightarrow Pr = \frac{\nu}{\alpha}$ [4.7]

Kn : nombre de Knudsen $\rightarrow Kn = \frac{\lambda}{D}$ [4.8]

$\frac{T_w}{T_a}$: rapport de température, tenant compte des variations de propriétés dans le fluide environnant.

V : vitesse du fluide

ν : viscosité cinématique

α : diffusivité thermique

λ : libre parcours du gaz

Il n'est pas nécessaire de tenir compte de tous ces paramètres dans la loi de transfert.

- Pr : est presque constant pour tout gaz dans l'ordre de grandeur de la température d'opération (100-200°C)

- K_n : pour que l'écoulement soit continu, il est nécessaire d'avoir $K_n < 0,015$; quand il y a cette continuité, K_n est négligeable.
- Le nombre de Mach (M) n'est pas introduit dans la loi de transfert (Nu), parce que nous avons entièrement négligé le changement de densité associé à de grandes vitesses, ce qui n'est pas le cas dans cette étude.
- Nous négligeons la convection libre en ne tenant pas compte du "fluide buoyancy" qui n'est nécessaire que pour des vitesses en dessous de 5 cm/s .
- Il n'y a pas de radiation suffisante aux températures de fonctionnement du fil.

La vitesse V du fluide intervient dans l'expression du coefficient d'échange thermique h .
 Diverses formulations empiriques ont été proposées, la plus utilisée est la formule de King :

$$\text{formule de King : } h = a + b \sqrt{V} \quad [4.6]$$

où : a et b sont des constantes pour un fluide et un capteur donné.

Remplaçons h par sa valeur dans l'équation [4-4], on obtient :

$$R(T_w) \cdot I^2 = (a + b\sqrt{V}) \cdot \pi \cdot D \cdot l \cdot (T_w - T_a) \quad [4-7]$$

Posons :

$$A = a \cdot \pi \cdot D \cdot l = a \cdot S_f$$
$$B = b \cdot \pi \cdot D \cdot l = b \cdot S_f$$

ce qui donne :

$$R(T_w) \cdot I^2 = (A + B\sqrt{V}) (T_w - T_a) \quad [4-8]$$

En ce qui concerne le nombre de Nusselt Nu , les caractéristiques physiques sont généralement prises à la température T_f du film à l'interface capteur - fluide.

$$T_f = \frac{T_w + T_a}{2} \quad (\text{température moy. du fluide}) \quad [4-9]$$

Pour l'air Collis et Williams ont trouvé ce qui reste des paramètres de l'équation de transfert :

$$Nu = (A + B Re^n) \left(\frac{T_w + T_a}{2 T_a} \right)^{0,17} \quad [4-10]$$

avec : $n = 0,45$; $A = 0,24$; $B = 0,56$ si $9,02 < Re < 44$

ou : $n = 0,51$; $A = 0$; $B = 0,48$ si $44 < Re < 150$

- si $T_a = \text{constante}$

Alors $\frac{T_w}{T_a} = \text{constante}$, si la pression est uniforme et si le facteur de température ne varie pas considérablement, on suggère :

$$R_{(T_w)} \cdot I^2 = (A + B \cdot V^{0,45})(T_w - T_a) \quad [4.11]$$

A et B sont des constantes dépendant des caractéristiques du filament et on peut les déterminer par calibration.

Le transfert de chaleur est influencé par plusieurs autres facteurs non considérés dans la dérivation ci-dessus, ce sont :

- la non-uniformité de la température du fluide près du fil chaud.
- les rapides variations en intensité et en direction de la vitesse de turbulence près du fil.
- la variation de la température et des propriétés physiques du fil dans la direction moyenne de l'écoulement, etc...

Il faut dire qu'à toute fin pratique, on peut ne tenir compte de ces derniers facteurs d'influence que si l'anémomètre est utilisé pour mesurer la turbulence du fluide. Autrement on peut négliger leurs effets.

- Si $T_a \neq$ constante

on suggère :

$$\frac{R_{(T_w)} \cdot I}{\pi \cdot l \cdot (T_w - T_a)} = 0,24 K \left(\frac{T_f}{T_a} \right)^{0,17} + 0,56 K \left(\frac{T_f}{T_a} \right)^{0,17} \left(\frac{V \cdot D}{\nu} \right)^{0,45} \quad [4.12]$$

(Collis & Williams)

Pour un gaz à pression constante : $\beta \cdot T_a =$ constante
 Pour l'air et des gaz similaires, les variations de propriétés concernent généralement la viscosité dynamique $\mu (= \nu \cdot \rho)$ et K - que Collis et Williams trouvent approximativement proportionnelles à $T_a^{0,76}$.

$$(\mu, K \sim T_a^{0,76})$$

En comparant [4.12] avec les formules générales ci-haut, on peut écrire :

$$A \sim K \left(\frac{T_f}{T_a} \right)^{0,17} \sim T_a^{0,76} \left(\frac{T_f}{T_a} \right)^{0,17}$$

$$B \sim K \cdot \left(\frac{T_f}{T_a} \right)^{0,17} \cdot \left(\frac{\beta}{\mu} \right)^{0,45} \sim T_a^{0,76} \cdot \left(\frac{T_f}{T_a} \right)^{0,17} \cdot \frac{\beta^{0,45}}{(T_a^{0,76})^{0,45}}$$

ce qui donne $B \sim (\beta \cdot T_a)^{0,45} \cdot T_a^{0,31} \cdot \left(\frac{T_f}{T_a} \right)^{0,17} \cdot T_a^{-0,342}$

$$\beta \cdot T_a = \text{cte} \Rightarrow B \sim T_a^{-0,032} \cdot \left(\frac{T_f}{T_a} \right)^{0,17}$$

Collis & Williams trouvent pour la valeur typique $\frac{T_w}{T_a} = 1,7$ que $\frac{T_f}{T_a} = \frac{1 + T_w/T_a}{2} \sim T_a^{-0,6}$

Remplaçons cette dernière équation dans celles de

A et B.

on trouve :

$$A \sim T_a^{0,76} (T_a^{-0,6})^{0,17} \sim T_a^{(-0,6 \cdot 0,17 + 0,76)}$$

$$B \sim T_a^{-0,032} (T_a^{-0,6})^{0,17} \sim T_a^{(-0,6 \cdot 0,17 + (-0,032))}$$

ce qui donne enfin :

$$A \sim T_a^{0,658} \quad [4.13]$$

$$B \sim T_a^{-0,134} \quad [4.14]$$

On voit que, ces valeurs, et en particulier A, varient avec T_a , cette conclusion est importante à deux points de vue :

1) - La calibration dépend fortement de la température de la température du fluide. Ainsi tout fonctionnement dans des conditions de température moyenne du fluide différente de celle de la calibration, rend celle-ci mauvaise ou à la rigueur nécessaire de correction.

2) - dans un écoulement où température et vitesse varient, la variation du transfert de chaleur ne peut être l'unique indice de la variation de la vitesse.

- Le premier problème peut être résolu en faisant une compensation de température ou en faisant des rectifications arithmétiques sur les résultats.
- Le deuxième quant à lui est minimisé par une température de fonctionnement aussi élevée que possible.

Le développement de la formule de King et les études de Collis & Williams ont permis de trouver des formules pratiques de mesure si l'anémomètre est utilisé aussi bien pour déterminer la vitesse du vent que pour mesurer la turbulence d'un fluide...

Néanmoins, ces formules ne sont toutefois valables ni pour les trop faibles vitesses où la convection naturelle complique le phénomène thermique, ni pour les trop grandes vitesses où les effets thermiques dus au frottement deviennent importants (inclure le nombre de Mach dans l'expression de Nu).

Même dans l'intervalle de vitesse où la formule le mieux, les valeurs A et B ne sont qu'approximativement constantes. Généralement, et en dépit des difficultés qu'elles impliquent, des calibrations directes (suivant T_a), donnant $R_{(Tw)} I^2$ en fonction de V , sont préférables à l'emploi de la loi de King et des dérivées de Collis & Williams.

Une calibration directe a l'avantage de prendre en compte les effets parasites, dynamiques et thermiques, qu'entraînent la limitation de la longueur du filament et les supports.

A ce propos, du fait que la résistance des supports qui maintiennent le filament est très faible, devant celle de ce dernier, leur température est plus basse que celle du film, ceci engendre un gradient de température aux extrémités.

Ce phénomène peut être minimisé en jouant sur le rapport L/D du senseur, il est indiqué que l'effet est faible pour $L/D > 200$.

Heureusement, que ce phénomène est éliminé par la calibration.

Il faut noter enfin que la température du senseur ne doit être ni trop élevée, cela causerait une accélération de l'oxydation, ni trop faible, car un coefficient de surchauffe $(\frac{T_w - T_a}{T_a})$ trop basse engendre une perte de sensibilité et une influence accrue de la température ambiante et des changements de propriétés relatifs à l'air environnant.

Il est ainsi souhaitable de fonctionner le senseur tel que:

$$100^\circ\text{C} < T_w < 300^\circ\text{C}$$

5. Mode d'opération de l'anémomètre

Deux types de montages sont utilisables pour l'anémomètre à fil chaud :

- 1 - le montage à intensité I constante
- 2 - le montage à température T constante

Il est nécessaire dans l'un ou l'autre de ces deux modes d'opération de pouvoir constamment le senseur en énergie suffisante pour le maintenir dans une plage de sensibilité quelque soient les fluctuations dans la vitesse à mesurer.

5.1 Montage à intensité constante

Le courant I qui traverse le fil est maintenu constant, soit au moyen d'une grande résistance en série avec le fil (source de tension continue stabilisée au travers d'une très grande résistance), soit par une alimentation par source de courant.

5.1.1 - Principe de fonctionnement

Le schéma de principe d'un tel montage est montré à la fig. 5.1.1, le circuit dont l'amplificateur opérationnel donne la tension aux bornes du senseur, est associé à un circuit de compensation de l'inertie thermique destiné à améliorer la rapidité de réponse.

Cette compensation est rendue nécessaire par le fait que le fil a une certaine capacité calorifique, d'où

résulte une constante de temps thermique.

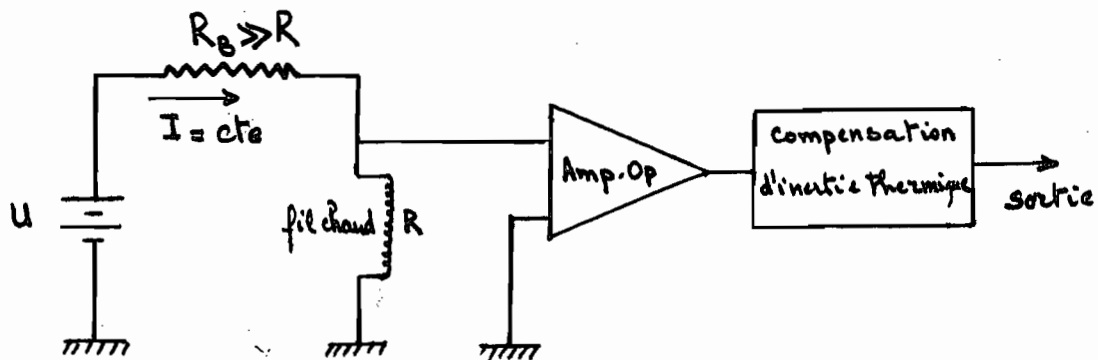


fig. 5.11: anémomètre à intensité constante.

On peut faire le dessin du circuit de compensation de l'inertie thermique en faisant l'analyse suivante :

Une fluctuation v de la vitesse V du fluide (de l'air) entraîne une variation u de la tension de mesure U aux bornes du fil, cette tension varie selon une loi générale de la forme :

$$U(t) = U_{\infty} (1 - \exp - \frac{t}{\tau}) \quad [5.1]$$

La valeur finale U_{∞} qui seule porte l'information relative à v , n'est atteinte qu'au bout d'un temps $t \gg \tau$; elle peut cependant être connue immédiatement car on peut écrire :

$$U_{\infty} = U(t) + \tau \cdot \frac{dU}{dt} \quad [5.2]$$

cette équation peut être traduite électriquement à l'aide d'un circuit comportant un sommateur,

un différentiateur, et pour une question de signe, un inverseur. Le circuit montré à la fig. 5.2, améliore notablement la réponse en fréquence dans le cas de petites fluctuations et de faibles surchauffes ($\frac{T_w - T_a}{T_a} < 0,5$)

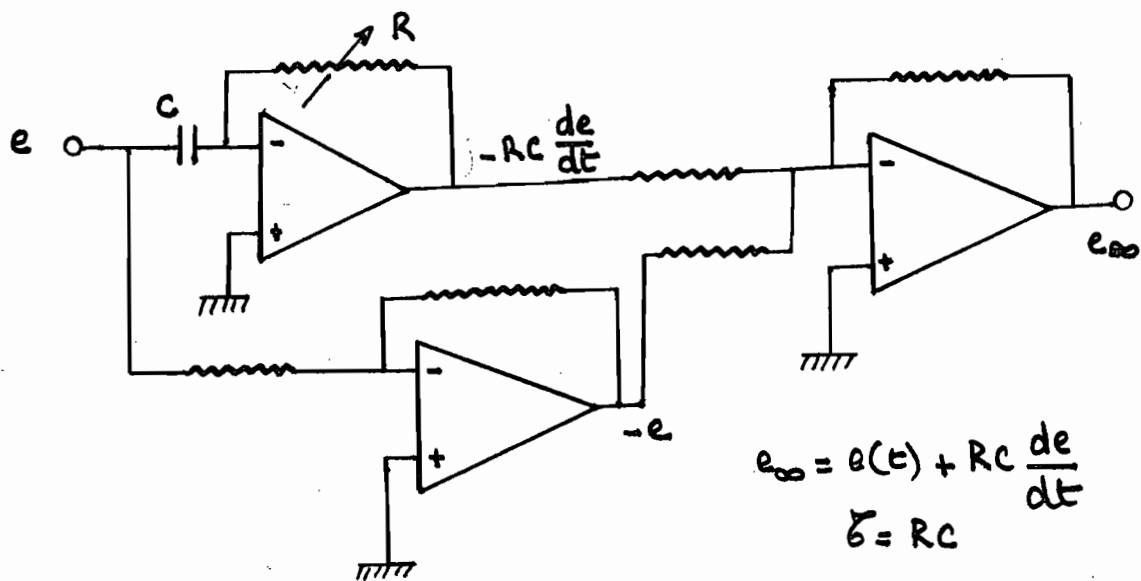


fig 512 : compensateur de l'inertie thermique

La détermination de la constante de temps τ peut se faire directement, la réponse du fil à des fluctuations de l'intensité étant la même qu'à des fluctuations de vitesse ; pour ce faire, on alimente le fil par exemple par un courant périodique carré et l'on règle la valeur de la résistance R du différentiateur de façon à ce que la variation de la tension de mesure soit une allure aussi voisine que possible que celle du courant.

En courant continu, ceci sera plus difficile à obtenir, néanmoins on peut, même si le fil doit travailler en continu, faire le réglage avec un signal périodique,

et fonctionner avec l'alimentation continue, cela ne devrait pas poser de problème, il n'y aura pas d'erreurs appréciables si on sait que la réponse en fréquence, l'effet de l'inertie thermique, sont physiquement liés aux caractéristiques du fil.

Ce dispositif, a cependant quelques inconvénients :

- la réponse du fil n'est pas, en toute rigueur linéaire (nécessité d'un linéarisateur)
- l'introduction d'un circuit différentiateur peut poser des problèmes en raison de l'augmentation du bruit de fond qu'il engendre.

5.1.2 - Dérivation mathématique de la sensibilité de l'anémomètre à intensité constante (S_I).

Nous avons vu qu'on peut écrire la loi d'échange sous la forme générale :

$$R_{(T_w)} \cdot I^2 = (A + B V^n) (T_w - T_a) \quad [5.3]$$

mais $R_{(T_w)} = R_{(T_a)} (1 + \alpha (T_w - T_a))$

$$\longrightarrow R_{(T_w)} - R_{(T_a)} = \alpha R_{(T_a)} (T_w - T_a)$$

$T_w - T_a$ est donc proportionnelle à $R_{(T_w)} - R_{(T_a)}$,
on peut alors réécrire l'équation [5.3] sous la forme :

$$R_{(T_w)} I^2 = (A + B V^n) (R_{(T_w)} - R_{(T_a)}) \quad [5.4]$$

Remarquons la différence entre les valeurs de A et B dans les deux équations [5.3] et [5.4], elles sont en effet liées par un rapport de proportionnalité $1/d R_{(T_a)}$.

" Pour faciliter la notation, l'indice a désignera une caractéristique du fluide, alors que w , celui du fil; ainsi $R_{(T_w)} \cong R_w$ est la résistance du fil à la température T_w , I_w l'intensité qui le traverse, $R_{T_a} \cong R_a$, la résistance du fil à la température T_a de l'ambiance (ou du fluide)..."

A intensité constante, seules T_w donc R_w varient en réponse au changement de vitesse $V + dV$.

Faisons une dérivation partielle de la réécriture de l'équation [5.4], par rapport aux variables R_w et V :

$$d \left[\frac{R_w I_w^2}{R_w - R_a} \right]_{I_w = cte} = d \left[A + B V^n \right]$$

ce qui donne :

$$I_w^2 \frac{dR_w (R_w - R_a) - dR_w (R_w)}{(R_w - R_a)^2} = dA + n B V^{n-1} dV$$

$$A = cte \rightarrow dA = 0$$

$$d'où \quad I_w^2 \frac{R_a dR_w}{(R_w - R_a)^2} = n B V^{n-1} dV \quad [5.5]$$

(Remarque : on raisonne ici en valeurs absolues)

La sensibilité du fil mesure la variation de la tension par rapport à celle de la vitesse, elle s'exprime alors par :

$$S_I = \left(\frac{dU_w}{dV} \right)_I \quad (I_w = \text{constante})$$

Comme que $U_w = R_w \cdot I_w \rightarrow dU_w = I_w dR_w$

$$\text{d'où } S_I = I_w \frac{dR_w}{dV}$$

on peut récrire [5.5] comme suit :

$$I_w \cdot \frac{dR_w}{dV} = n B V^{n-1} \frac{(R_w - R_a)^2}{R_a \cdot I_w}$$

ou encore :

$$S_I = \frac{n \cdot B \cdot (R_w - R_a)^2}{R_a \cdot I_w \cdot V^{(1-n)}} \quad [5.6]$$

5.2. Montage à résistance constante

Dans ce cas, la température, et donc la résistance, sont maintenues constantes, l'élément sensible est incorporé à un pont de Wheatstone qui est maintenu équilibré par un circuit d'asservissement.

C'est l'intensité du courant fourni au pont, ou la tension aux bornes du pont, qui traduit alors les fluctuations de vitesse de l'écoulement incident.

5.2.1 Principe de fonctionnement

Le schéma de principe est montré à la fig. 5.2.1

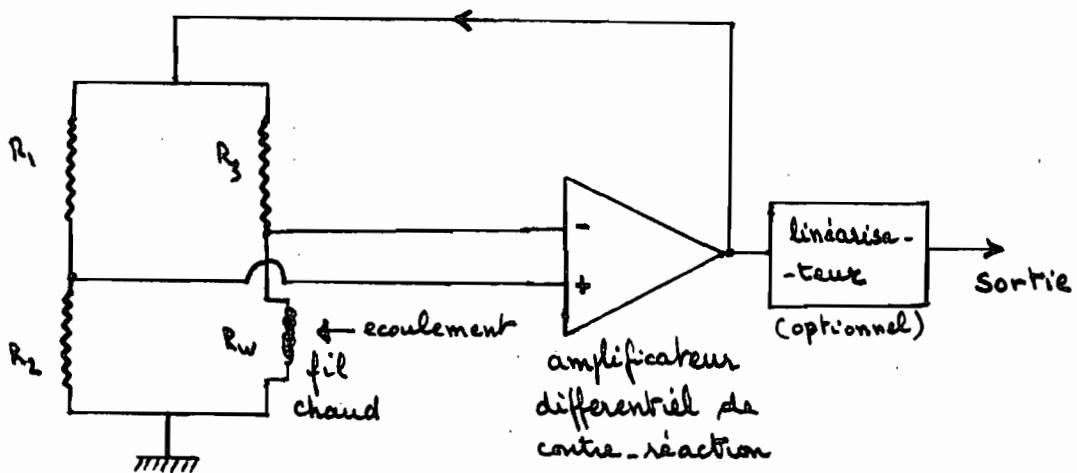


fig. 5.2.1 anémomètre à température constante

L'écoulement extrait de la chaleur au fil, ce qui a tendance à abaisser sa température donc sa résistance, ce qui se traduit instantanément par un déséquilibre du pont mesuré par l'amplificateur de différence qui, par la contre-réaction

injecte le courant nécessaire pour annuler la différence de tension entre ses bornes, c'est-à-dire rééquilibre le pont.

Le linéarisateur est rendu nécessaire par la réponse non linéaire du senseur aux fluctuations de vitesse.

5.2.2 Dérivation mathématique de la sensibilité S_T de l'anémomètre à température constante

Les variables de l'équation générale de transfert sont dans ce cas-ci l'intensité I_w et la vitesse V .

De la même manière que pour l'anémomètre à courant constant, prenons les dérivées partielles dans l'équation :

$$R_w I_w^2 = (A + B V^n) (R_w - R_a)$$

ce qui donne :

$$2 R_w I_w d I_w = (R_w - R_a) \cdot n \cdot B \cdot V^{n-1} dV$$

$$\left(\frac{dU_w}{dV} \right)_{T=cte} = S_T$$

$$\text{comme } dU_w = d(R_w I_w) = R_w dI_w$$

$$S_T = \frac{n \cdot B \cdot (R_w - R_a)}{2 I_w V^{(1-n)}} \quad [5.7]$$

La réponse $U_w = f(V)$ n'est pas linéaire, cependant, ce montage a l'avantage d'avoir une inertie thermique moins importante.

5.3 Choix du mode d'opération

Faisons le rapport des sensibilités pour les deux modes :

$$\frac{S_I}{S_T} = \frac{n B (R_w - R_a)^2}{I_w R_a v^{(1-n)}} \times \frac{2 \cdot I_w \cdot v^{(1-n)}}{n \cdot B \cdot (R_w - R_a)}$$

d'où
$$\boxed{\frac{S_I}{S_T} = \frac{2 \cdot (R_w - R_a)}{R_a}} \quad [5.8]$$

$$\frac{R_w - R_a}{R_a} = \alpha (T_w - T_a) \quad \text{où } \alpha \text{ est le coefficient de température}$$

Pour le tungstène α est de l'ordre de $4 \cdot 10^{-3}$, ainsi on peut dire que $0,5 < \frac{R_w - R_a}{R_a} \approx \alpha (T_w - T_a) < 1$ si $\Delta t \leq 200^\circ\text{C}$

Dans cette plage, on a :
$$\underline{S_I \approx 1,2 S_T}$$

La sensibilité à courant constant est d'un peu supérieure à celle à température constante, mais le premier mode a des inconvénients majeurs. Le système peut s'autodétruire par fusion du fil surtout à de petites vitesses. Il est encore moins stable que celui à température constante par le coefficient de surchauffe qui y est associé varie avec la vitesse.

Analysons les courbes représentées à la fig 5.3.1, si la résistance est maintenue constante ($R = \frac{U_1}{I_1}$) comme montré par les lignes en pointillés, on peut avoir pour le changement de vitesse indiqué, une variation de

courant I et de tension U , sans danger de surchauffer le fil.

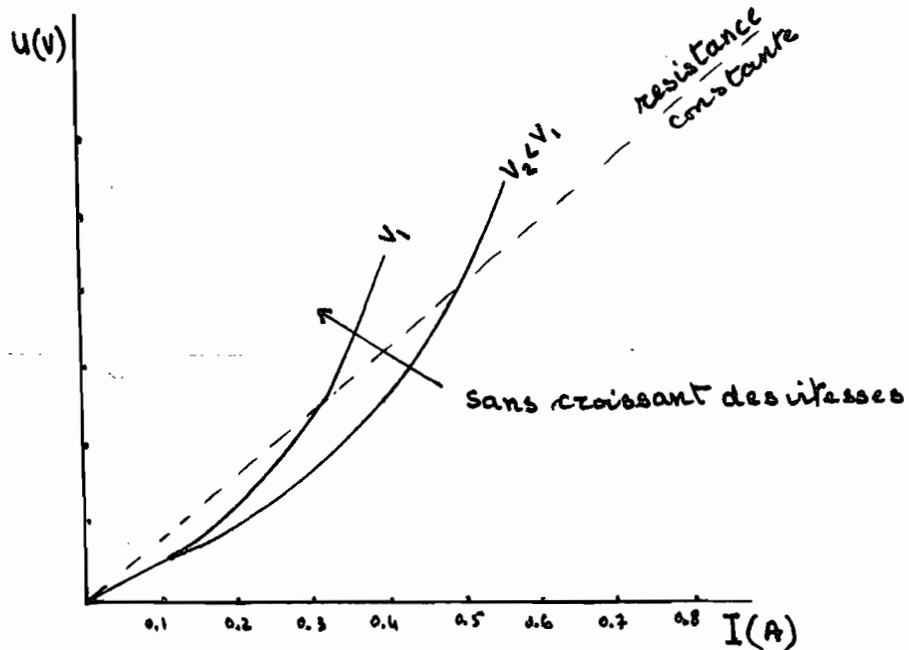


fig. 5.3.1

Dans le fonctionnement à température constante, la réponse devrait être plus rapide car le changement de résistance est transitoire et très petit.

En plus de ces remarques, ce dernier mode a l'avantage par son type d'asservissement à contre-réaction de compenser automatiquement l'inertie thermique, l'amplificateur ayant un gain indépendant de la fréquence, en plus c'est un système qui présente une faible non-linéarité.

Le développement ci-haut nous pousse à choisir le mode opératoire à température constante.

B/ CONCEPTION DU TRANSDUCER

Le but de cette partie est de mettre au point un système totalement électronique qui permette de mesurer la vitesse d'un écoulement tout en respectant les lois définies jusqu'ici.

1. Résumé des contraintes

1. Le circuit doit faire opérer le fil, à une température constante

2. le coefficient de surchauffe (α) doit être tel :

$$0,4 < \alpha = \frac{T - T_a}{T_a} < 0,8$$

pour éviter une dégradation accélérée et une inertie thermique importante au fil.

3. Pour minimiser la corrosion, et pour avoir une bonne perméabilité, le fil doit fonctionner à la température T_w telle que :

$$100^\circ\text{C} < T_w < 300^\circ\text{C}$$

4. Pour minimiser l'effet du gradient de température entre les extrémités supportées du filament et les supports mêmes, il faut :

$$l/d > 200$$

2. Type de senseur et température de fonctionnement

Pour des raisons économiques, pratiques et de disponibilité, on propose d'utiliser comme senseur de température, une ampoule brisée de faible puissance dont la longueur du filament ainsi que le diamètre, respectent la contrainte $l/D > 200$. Pour cela les ampoules de plus faible puissance que celle de type lampe de poche sont convenables ; mais on peut utiliser d'autres plus puissantes, seulement ces dernières requièrent plus de puissance.

Notons que les ampoules ont des filaments spiralés ce qui a tendance à augmenter leur inertie thermique du fait de l'inductance qui s'oppose à la variation du courant mais ce phénomène peut être réglé, nous verrons comment, encore qu'il est un paramètre de stabilisation en alimentation D.C.

La variation de la résistance d'un fil en fonction de la température souvent supposée linéaire, ne l'est pas parfaitement s'il s'agit de très importantes températures.

La variation de la résistivité peut être formulée en termes généraux comme suit :

$$\rho = \rho_0 \left[1 + a_1 (T - T_0) + a_2 (T - T_0)^2 + a_3 (T - T_0)^3 + \dots \right] \quad [2.1]$$

avec $a_1 = 4,4 \cdot 10^{-3}$, $a_2 = 8 \cdot 10^{-7}$... pour le tungstène

(cf: TURBULENT FLOWS IN ENGINEERING - Reynolds - page 106)

Pour notre analyse, nous négligerons les termes de puissance supérieure à 1 qui sont insignifiants vu la plage de température de fonctionnement: $100^{\circ}\text{C} - 300^{\circ}\text{C}$, d'où $(T_w - T_a)^2 a_2 \ll a_1 (T_w - T_a)$ etc...

on peut alors écrire :

$$R_w = R_a (1 + a_1 (T_w - T_a)) \quad [2-2]$$

a_1 , généralement noté α , est le coefficient de température de la résistance, il est donné par la formule en fonction de la température :

$$[2.3] \quad \alpha_{(t^{\circ}\text{C})} = \frac{1}{|T| + t} \quad \text{où } T: \text{zéro absolu du matériau} \\ t: \text{température de la résistance}$$

Pour divers matériaux, T est donné dans le tableau :

Matériau	$T (^{\circ}\text{C})$
argent	-243
Cuivre	-234,5
or	-274
Aluminium	-236
Tungstène	-204
Nickel	-147
Fer	-162
Constantin	-125.000
Nichrome	-2250

$\rightarrow \alpha_{25^{\circ}\text{C}} = \frac{1}{204 + 25} = 4,37.10^{-3}$

Pour choisir une température de fonctionnement adéquate, posons :

$$\left\{ \begin{array}{ll} 0,4 \leq a = \frac{T_w - T_a}{T_a} \leq 0,8 & : \text{inertie thermique et surchauffe} \\ 15^\circ\text{C} \leq T_a \leq 45^\circ\text{C} & : \text{typique pour nos pays} \\ 100^\circ\text{C} < T_w < 300^\circ\text{C} & : \text{corrosion et sensibilité} \end{array} \right.$$

$$\text{d'air} \quad 273 + 100^\circ\text{C} \leq aT_a + T_a \leq 300^\circ\text{C} + 273 \quad [2-4]$$

$$\text{et} \quad 130,2^\circ\text{C} < T_w < 290,4^\circ\text{C} \quad [2-5]$$

on choisit $T_w = 160^\circ\text{C}$, température qui, cela a été vérifié au laboratoire donne une excellente sensibilité et une bonne durée de vie.

Le coefficient de surchauffe correspondant est :

$$a = \frac{160 - 25}{25 + 273} = 0,453$$

Ce qui respecte les contraintes pour la température ambiante moyenne de 25°C . Pour les cas extrêmes de 45°C et 15°C il est respectivement 0,38 et 0,50, ce sont des valeurs très bonnes aussi.

3. Circuit du transducteur

Le senseur fonctionne par effet joule, il a de plus une résistance très faible, ce qui nécessite un circuit qui puisse délivrer assez de courant pour le maintenir sensible.

Les tests effectués sur les amplificateurs opérationnels disponibles (M 741 - LM308...), ainsi que les catalogues (Data Book), montrent que ceux-ci, même avec une impédance de sortie très faible, ne peuvent délivrer un courant au delà de 22 milli-ampères (mA), alors que le maintien du fil à une température constante pour de grandes vitesses, exige beaucoup plus de courant.

Il est donc nécessaire d'utiliser un transistor de puissance dans le circuit d'alimentation et de rétroaction du transducteur.

Le dispositif de mesure le plus généralement utilisé du fait de sa grande sensibilité, est le pont de Wheatstone; il se prête plus que tout autre à notre cas.

A ce pont doit être connecté, pour la détection et l'amplification du signal d'erreur, un amplificateur différentiel de gain très élevé. Ce dernier alimente un autre amplificateur monté en source de courant, qui commande le transistor d'alimentation et de rectification de l'erreur.

(voir fig. 3.1)

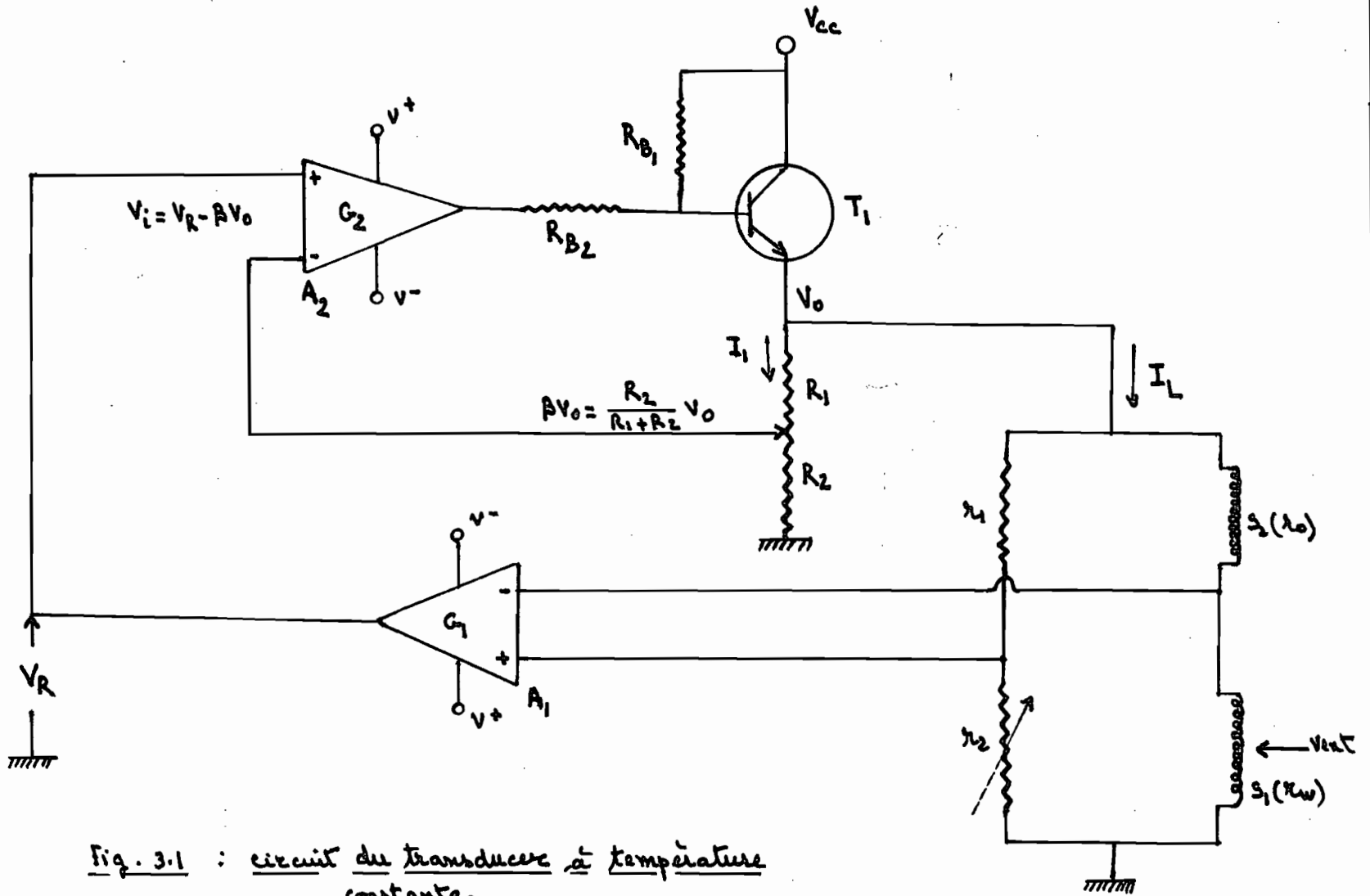


Fig. 3.1 : circuit du transducteur à température constante.

3.1 Fonctionnement du circuit de mesure

Le circuit présenté à la fig. 3.1 est une petite merveille dans le sens où il fonctionne d'une manière totalement automatique.

Lorsque le transistor T_1 est mis sous tension par l'intermédiaire de son collecteur, il est automatiquement polarisé par la résistance R_B , qui crée une différence de potentiel suffisante entre la base et le collecteur pour permettre le passage du courant dans la charge d'émetteur. La résistance $R_1 + R_2$ étant beaucoup plus grande que la résistance équivalente du pont, la majeure partie du courant traverse ce dernier entraînant l'échauffement, donc l'augmentation de la résistance, du senseur exposé au vent S_1 et du filament non exposé S_2 .

Le pont est équilibré si le rapport des résistances est identique dans ses deux branches.

Si cette condition n'est pas satisfaite, du fait de l'insuffisance du courant initial, ou encore du fait d'un refroidissement du senseur S_1 par un écoulement (vent...) de vitesse v , il se crée une différence de tension entre les points milieu du pont (ΔU).

Cette tension d'erreur est appliquée aux bornes de l'amplificateur différentiel A_1 qui, pour s'opposer à la différence de tension entre ses bornes, délivre à sa sortie une tension $V_R (= G_1 \Delta U)$. Du fait de son gain élevé G_1 ,

l'amplificateur A_1 va détecter la moindre tension d'erreur du pont.

La tension V_R délivrée par A_1 , sert de référence à l'amplificateur A_2 qui la compare à une portion de la tension de sortie ($BV_0 = \frac{R_1}{R_2 + R_1} V_0$), et comme A_2 a un gain très élevé (G_2), la moindre différence est amplifiée et vient changer l'état de la sortie de A_2 , en d'autres termes, augmente le courant de base du transistor T_1 qui injecte du courant pour rectifier l'erreur.

Dans le cas où ce sont les résistances de S_1 et S_2 qui sont trop grande par suite d'une surchauffe des filaments, le même processus, mais inverse, se produit.

Le cycle de travail du circuit dure quelques microsecondes (μs), conformément aux temps de réponse des amplificateurs opérationnels. Ainsi même l'oscilloscope donne une tension d'erreur du pont nulle à chaque instant (échelle ms), preuve que le procédé fonctionne merveilleusement à température constante.

3.2 Analyse et Dimensionnement du circuit de mesure

Dans cette partie il sera question de dériver les relations mathématiques de fonctionnement et de dimensionner le circuit pour une gamme de senseurs.

3.2.1 Le transistor d'alimentation T_1

Les exigences pour ce transistor sont :

- être bien polarisé (région active)
- pouvoir délivrer tout le courant nécessaire.

Le schéma opératoire est donné à la fig 3.2

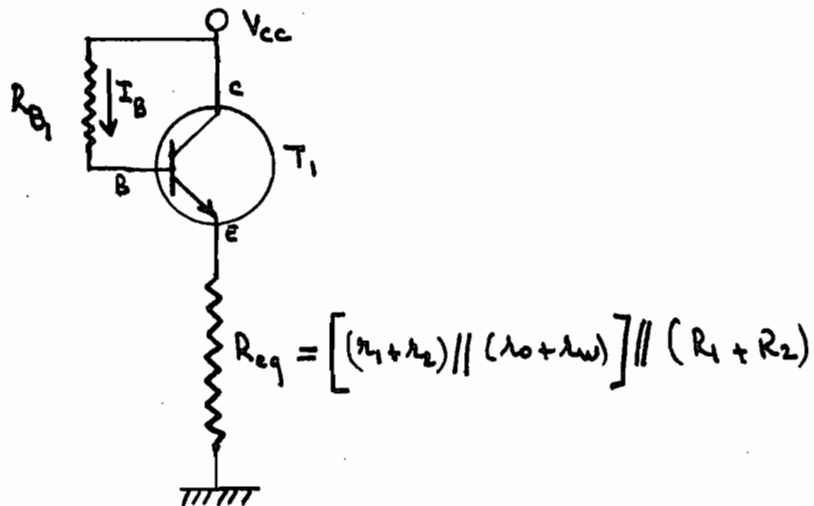


fig 3.2 schéma opératoire de T_1

$$(R_1 + R_2) \gg (r_1 + r_2) \parallel (r_0 + r_w) \rightarrow R_{eq} \approx \frac{(r_1 + r_2)(r_0 + r_w)}{r_0 + r_1 + r_2 + r_w}$$

Les résistances des fils (r_w et r_2) doivent être évaluées à la température de fonctionnement.

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_{B1}} \quad \text{ou} : V_{BB} = V_{CC}$$

$$V_{BE} \sim 0,7V \text{ (silicium)}$$

$$R_{B1} = 1K\Omega \text{ (choix)}$$

$$V_{CC} = 5V \longrightarrow I_B = \frac{5 - 0,7}{1 \cdot 10^3} = 4,3 \text{ mA}$$

$$V_{CC} = 9V \longrightarrow I_B = \frac{9 - 0,7}{1 \cdot 10^3} = 8,3 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_{eq} \longrightarrow I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_{eq}}$$

on peut se définir une gamme de filaments à utiliser telle :

$$r_w = 1\Omega - 10\Omega = r_1 = r_2 = r_o$$

$$R_{eq \min} = 1\Omega \longrightarrow I_{C(\text{sat})} = \frac{V_{CC}}{1} = 5 - 9 \text{ A}$$

$$R_{eq \max} = 10\Omega \longrightarrow I_{C(\text{sat})} = \frac{V_{CC}}{10} = 0,5 - 0,9 \text{ A}$$

$$V_{CE(\text{sat})} = V_{CC}$$

on aura pas à travailler avec tant de courant, néanmoins, ceci montre que le transistor peut nous fournir amplement le courant désiré.

La droite de charge représentée ci-dessous, donne une très bonne plage de fonctionnement si $V_{CC} = 5V$

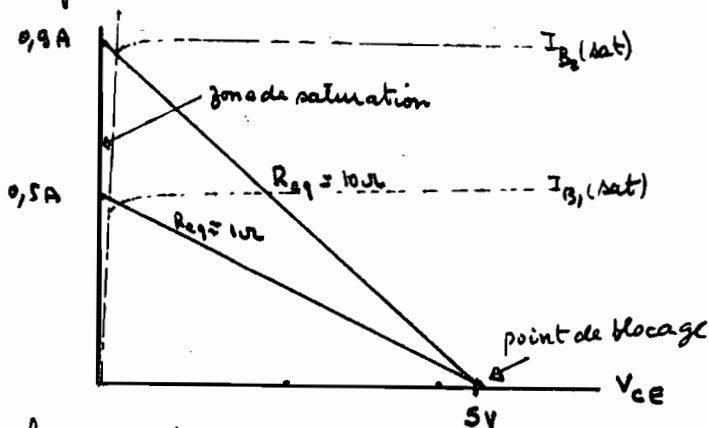


fig. 8.3 droite de charge de T_1

Il est préférable d'avoir un point de fonctionnement situé au milieu de la zone active, dans notre cas, il se déplacera sur la droite de charge du fait des changements de courant. La fig. 3.3 montre nettement que sur toute la gamme de résistances, le courant peut varier de zéro (0) à plusieurs centaines de milli-ampères sans atteindre la zone de saturation.

On peut prendre pour T_1 le NPN 2N2222, le 2N4921 ou tout autre transistor de puissance, convenable.

3.2.2 Le pont de Wheatstone

Le pont utilisé est, convenable à deux points de vue :

- une bonne sensibilité
- la compensation des grandeurs d'influence, autres que la mesurande.

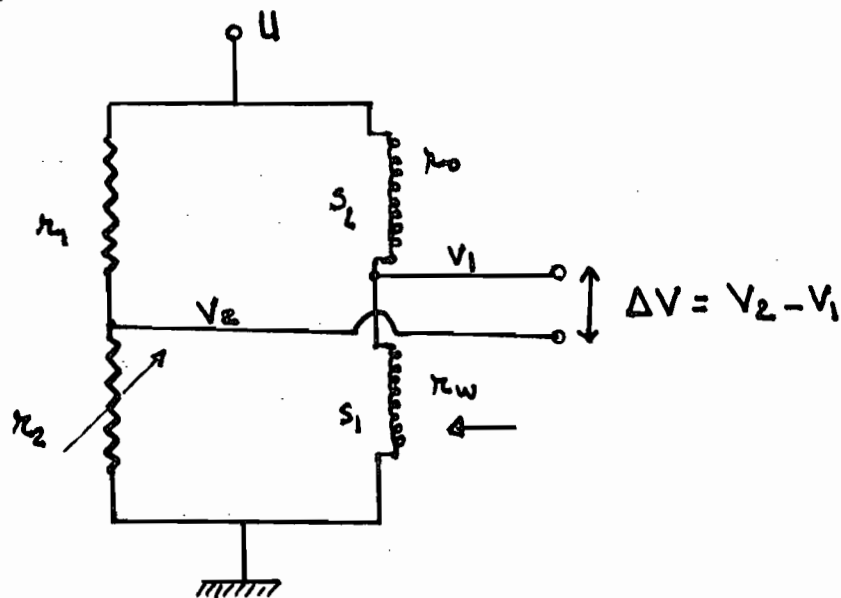


fig. 3.4 . pont de mesure

3.2.2.1 - Sensibilité

Une variation Δr_w est causée par un fluide de vitesse v .

Le débancement, résultant est :

$$\begin{aligned}\Delta V &= V_2 - V_1 = \frac{r_2}{r_2 + r_1} U - \frac{r_w + \Delta r_w}{r_w + \Delta r_w + r_0} U \\ &= U \left(\frac{r_2}{r_2 + r_1} - \frac{r_w + \Delta r_w}{r_w + \Delta r_w + r_0} \right)\end{aligned}$$

Des conditions initiales de fonctionnement à température constante sont: $\frac{r_w}{r_0} = \frac{r_2}{r_1}$ (équilibre du pont à la résistance de travail).

Les senseurs S_1 et S_2 étant identiques: $r_w = r_0$
d'où $r_2 = r_1$

on obtient :

$$\begin{aligned}\Delta V &= U \left(\frac{r_2}{2r_2} - \frac{r_w + \Delta r_w}{2r_w + \Delta r_w} \right) \\ &= U \left(\frac{1}{2} - \frac{r_w + \Delta r_w}{2r_w + \Delta r_w} \right)\end{aligned}$$

Posons $S = \frac{\Delta r_w}{r_w}$

L'équation devient:

$$\Delta V = - \frac{U}{2} \frac{\Delta r_w}{2r_w + \Delta r_w} = - \frac{U}{4} \frac{S}{1 + S/2} \quad [3.1]$$

Le signe (-) indique bien que $\Delta r_w < 0$ (refroidissement du senseur S_1 .)

L'équation [3.1] montre que la réponse du pont n'est pas linéaire en général, mais si $\delta \ll 1$, elle peut être considérée comme telle.

3.2.2.2 - Compensation des grandeurs d'influence

La température ambiante, l'humidité et d'autres facteurs, influent beaucoup sur la calibration d'un anémomètre à fil chaud, au point où, une variation de ces éléments fausse celle-ci.

Nous pouvons résoudre ce problème en utilisant un capteur de mesure soumis au mesurande et à la grandeur d'influence ainsi qu'un capteur de compensation identique au premier mais soumis uniquement à la grandeur d'influence.

C'est ce qui justifie l'utilisation des deux senseurs s_1 et s_2 dans le circuit du transducer.

On démontre la compensation :

r_w étant la résistance du capteur de mesure :

$$r_w = r + \Delta r_w \quad \text{avec} \quad \Delta r_w = S_g \Delta g + S \Delta m$$

S_g et S respectivement sensibilité à la grandeur d'influence g et sensibilité au mesurande (itesse du vent...)

r_0 étant la résistance du capteur de compensation :

$$r_0 = r + \Delta r_0 \quad \text{avec} \quad \Delta r_0 = S_g \Delta g$$

r_2 et r_1 sont des résistances constantes égales à r .

La tension d'erreur du pont est:

$$\Delta V = \frac{r_2}{r_2 + r_1} U - \frac{r_2 + \Delta r_w}{r_2 + \Delta r_w + r_1 + \Delta r_o} U$$

$$\Delta V = U \left(\frac{1}{2} - \frac{r_2 + \Delta r_w}{2(r_2 + \Delta r_w + \Delta r_o)} \right)$$

$$\Delta r_w, \Delta r_o \ll r_2$$

$$\rightarrow \Delta V \approx \frac{U}{2} \left(\frac{\Delta r_o - \Delta r_w}{2r_2} \right) = \frac{U}{4} \frac{S_g \Delta g - S_g \Delta g - S_m \Delta m}{r_2}$$

$$\Delta V = - \frac{U}{4} \frac{S \cdot \Delta m}{r_2} \quad [3.2]$$

On vient de démontrer que l'utilisation du 2^{ème} senseur permet de compenser automatiquement la température ambiante, l'humidité et tous les autres facteurs d'influence liés au fluide, et à l'ambiance.

3.2.3. L'amplificateur différentiel A₁

L'ampli est attaqué directement par la tension d'erreur ΔV , le fait de n'avoir mis aucune résistance ni à l'entrée ni en contre-réaction permet d'amplifier la tension avec un gain en boucle ouverte G_1 très élevé (théoriquement infini) sans y introduire beaucoup de bruit.

$$V_R = G_1 \cdot \Delta V = -G_1 \frac{U}{4} \frac{\Delta r_w}{2r_w + \Delta r_w} \quad [3.3]$$

3.2.4 Système de régulation de tension

L'anémomètre à température constante requiert un circuit qui puisse compenser très rapidement les variations de la température du filament. Ainsi il est nécessaire que son alimentation soit des plus stables, et permette de corriger très vite les erreurs.

Ainsi nous utilisons à cette fin le circuit ci-dessous :

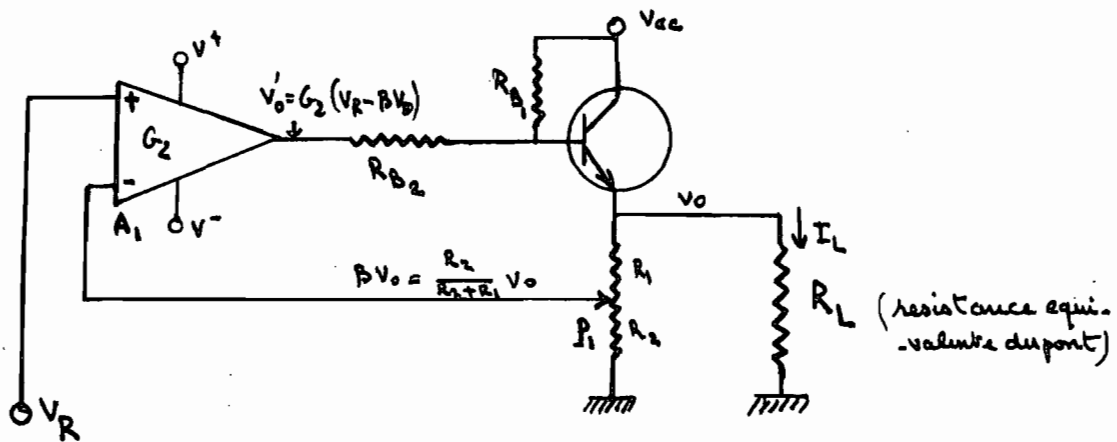


fig 3.5 : regulateur de tension à ampli-opérationnel

si k : constante introduite par la polarisation .

$$\begin{aligned} V'_0 &= V'_0 + k \\ &= G_2 (V_R - \beta V_0) + k \\ &= G_2 \left(-G_1 \frac{U}{4} \frac{\Delta r_w}{2r_w + \Delta r_w} - \beta V_0 \right) + k \end{aligned}$$

$$\text{mais } U = V_0 \rightarrow V_0 = -G_1 G_2 \frac{\Delta r_w}{4(2r_w + \Delta r_w)} V_0 - G_2 \beta V_0 + k$$

$$\text{d'où } V_0 = \frac{k}{1 + G_1 G_2 \cdot \frac{\Delta r_w}{4(2r_w + \Delta r_w)} + G_2 \beta} \quad [3.4]$$

mais $\Delta r_w \ll r_w$ on peut estimer :

$$v_o = \frac{K}{1 + G_1 G_2 \frac{\Delta r_w}{8 r_w} + G_2 \beta} \quad [3.5]$$

G_1 et G_2 très grands

$$G_1 G_2 \frac{\Delta r_w}{8 r_w} < 0 \quad \text{car } \Delta r_w \text{ négatif}$$

$\left| G_1 G_2 \frac{\Delta r_w}{8 r_w} \right| > G_2 \beta$ est la condition de bonne sensibilité du montage.

β doit être réglé avec le potentiomètre P_1 pour assurer cette condition.

Le montage offre une très bonne sensibilité, il permet même de compenser la température dans le fonctionnement du transistor.

C/ REALISATION DE L'ANEMOMETRE A FIL CHAUD

Il est question dans cette partie de donner la liste des composants utilisés lors de la confection du circuit, de tracer les tableaux de mesures et des résultats, de dresser les courbes de calibration et enfin, de spécifier les problèmes et les insuffisances du circuit ainsi que des recommandations.

1. Liste des composants

Le circuit représenté à la fig 3.1 (p.) a été réalisé et testé au laboratoire ainsi que, dans une gaine de soufflerie. Les composants utilisés (tableau 1.1) sont justifiés uniquement par leur disponibilité au laboratoire, elles peuvent être remplacées par d'autres types si ces derniers respectent les critères et les contraintes cités dans l'étude théorique.

Il est donc précisé que seul le schéma de principe est à respecter en toute rigueur et que selon les besoins, l'utilisateur peut utiliser les composants de son choix, compte-tenu de la flexibilité du montage.

Néanmoins, précisons que le dimensionnement est en grande partie imposé par les caractéristiques du senseur et par la plage des mesures.

Tableau 1.1: Liste des composants du transducteur anémométrique

composantes	valeurs ou type	Remarques	
V_{cc}	5V - 1A	alimentation collecteur de T_1	
transistor T_1	2N4921	$V_{CE(max)} = 0,3V$ ($I_C = 0,5A$; $I_B = 50mA$) $V_{BE(max)} = 986V$ (" ; ")	
R_{B1}	1K Ω	polarisation de T_1 - tension initiale	
potentiomètre P_1 (10K Ω)	R_1	9,6 K Ω	réglage de β
	R_2	0,4 K Ω	
branche 1 du pont	r_1	1K Ω	$r_1 + r_2$ assez grand pour économie de courant r_2 est réglable : 0 - 1K Ω .
	r_2	0 - 1K Ω	
branche 2 du pont	r_0	1,85 Ω	senseur des paramètres d'influence
	r_w	1,85 Ω	senseur pour mesure de vitesse.
ampli-op. A_1	u741	voir DATA Book	
ampli-op. A_2	u741	voir DATA Book	
R_{B2}	100 Ω	stabilisation du courant de base	

2. Mesures et courbes de calibration

L'installation qui a permis le test est une soufflerie dont le variateur de vitesse peut fournir un gamme de 0 à 20 m/s.

Pour la calibration du senseur, on dispose d'un anémomètre à hélices de bonne précision (voir Annexe)

Les paramètres qu'il faut déterminer sont :

- T_a : la température de l'air (ambiance)
- R_a : la résistance du senseur à T_a
- R_w : la résistance de travail à T_w (R_w)
- U_w : la tension aux bornes du senseur S_1
- I_w : le courant qui traverse S_1
- ΔV : la tension d'erreur du pont

La vitesse V est variée de 0 à 20 m/s.

Pour que le fonctionnement soit exact il faut toujours lire, avec un volt-mètre $\Delta V = 0$. Cette condition est obtenue pour les mesures présentées au tabl. 2.1 où seuls V (m/s), U_w (volt), I_w (A) sont variables.

Tabl. 2.1 : mesures sur anémomètre à température constante

ampoule brisée de 6V; 1,7W - $T_a = 24,5^\circ\text{C}$ - $R_a = 1,9\Omega$ - $T_w = 148,5^\circ\text{C}$

$V(\text{m/A})$	0,22	0,80	1,00	1,50	2,04	2,75	3,10	3,50	3,98	4,62	5,15	5,60
$I_w(\text{mA})$	220	241	245	254	267	278	284	293	301	313	320	326
$U_w(\text{V})$	0,407	0,447	0,453	0,472	0,491	0,514	0,524	0,542	0,557	0,579	0,592	0,604
$R_w(\Omega)$	1,85	1,85	1,85	1,85	1,84	1,85	1,84	1,85	1,85	1,85	1,85	1,85
$P_w(\text{W})$	0,083	0,108	0,111	0,120	0,131	0,143	0,149	0,159	0,168	0,181	0,189	0,197
$\Delta V(\text{mV})$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

6,00	6,42	7,05	7,35	7,6	8,35	9,1	10
333	340	350	356	357	365	378	389
0,619	0,627	0,644	0,658	0,661	0,674	0,699	0,720
1,86	1,84	1,85	1,85	1,85	1,84	1,84	1,85
0,206	0,214	0,225	0,234	0,236	0,246	0,264	0,280
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

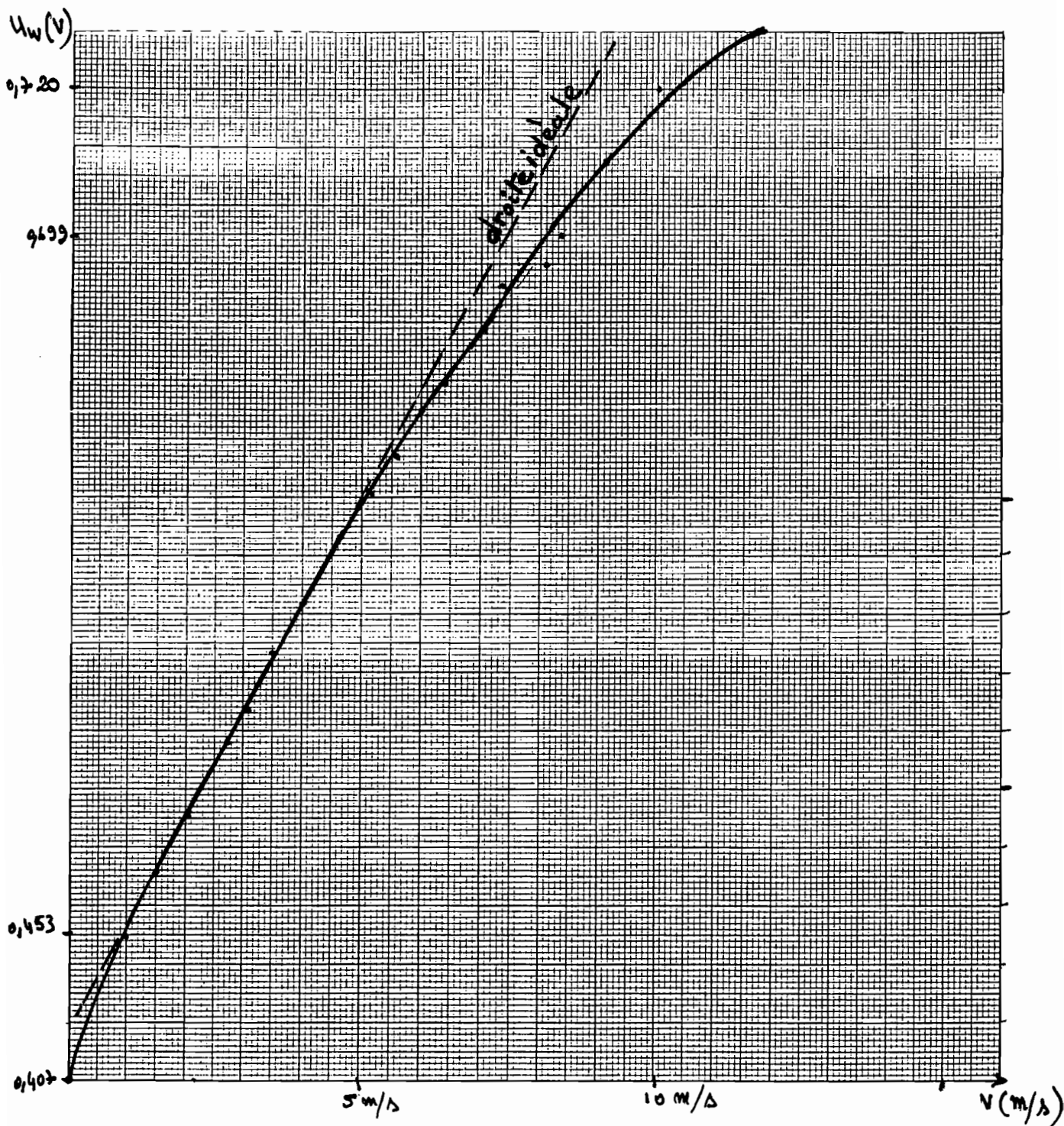


FIGURE 2.1

LÉGENDE: mesures au anémomètre et température
constante

ampoule bisé 6V-17W - $T_a = 24,5^\circ\text{C}$ - $R_a = 1,2\Omega$ - $T_w = 148,5^\circ\text{C}$

3. Analyse des résultats et recommandations

On remarque dans le tableau 2.1 que la tension d'erreur du pont (ΔV) est toujours nulle quelque soit la vitesse. Ceci traduit le fait que le circuit travaille bien à une température constante du filament senseur de vitesse.

La courbe de la fig 2.1 montre que la réponse du fil chaud n'est pas linéaire, confirmant ainsi ce qui a été annoncé dans l'étude théorique.

Cette non-linéarité essentiellement due au phénomène d'échange thermique, peut être corrigée soit en faisant une courbe de calibration adéquate insérée dans le galvanomètre de lecture de U_w (on obtient ainsi une lecture directe de la vitesse), ou en concevant un circuit de conversion analogique du signal de sortie.

La première solution est peu commode car elle demande à chaque changement du senseur, une reprise de la courbe de calibration. Cette entreprise n'est tout de même pas fastidieuse et est à la portée de tout utilisateur.

Nous allons cependant construire à partir de l'analyse théorique, un circuit linéarisateur qui permettra d'utiliser l'anémomètre à fil chaud d'une façon

beaucoup plus standard, car un linéarisateur permet de recueillir directement la tension proportionnelle à la vitesse mesurée.

L'autre avantage de ce traitement du signal, est de brancher le transducer sur un circuit à affichage digital, ou à cristaux liquides.

L'appareil ainsi fait, facilitera beaucoup l'exploitation.

Il est à remarquer que le signal de sortie bien que ne contenant que trop peu de bruit, a une composante non continue qui y est introduite par plusieurs facteurs :

- Les conditions de mesure :

le fil chaud étant très sensible même aux très faibles variations de vitesse, il répond aux fluctuations de la vitesse délivrée par la soufflerie et qui ne sont pas détectables par l'anémomètre à hélices. C'est d'ailleurs ce qui justifie son utilisation comme appareil de mesure de la turbulence d'un écoulement, vu sa bonne réponse en fréquence.

- L'inertie thermique :

on a vu que le fil chaud a une constante de temps, ce qui se repercute dans la réponse si les fluctuations de vitesse sont élevées.

- La température du filament est constamment réajustée par le dispositif de rétroaction, mais la rapidité

de réponse des amplificateurs étant non-infinie bien que très grande, ce réajustement, apparemment, continu ne l'est pas, bien que la fréquence soit très grande.

La forme du signal de sortie vue à l'oscilloscope se présente comme suit :

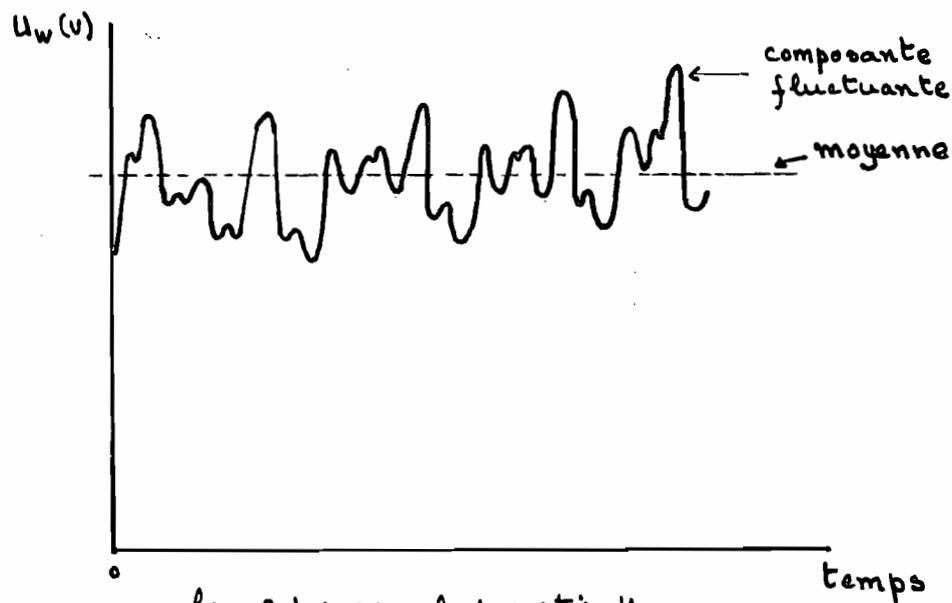


fig. 3.1 : signal de sortie U_w

La période est dépendante de la vitesse et de la nature de l'écoulement, pour l'application elle est approximativement de 3 ms pour une vitesse de 1,5 m/s.

Un tel signal à la sortie montre bien la difficulté de prendre les lectures avec un volt-mètre digital, encore plus avec un galvanomètre à aiguille.

Il est toutefois possible d'essayer de stabiliser le circuit en introduisant :

- une petite capacité entre la base et le collecteur du transistor T_1 ,
- une inductance de compensation en série avec le senseur des facteurs d'influence S_2
- etc...

Mais même si la capacité s'opposera à la variation brusque de la tension de polarisation du transistor, et que l'inductance rendra plus longue celle du courant I_w , il n'en demeure pas moins que ces solutions n'amélioreront pas totalement le signal de sortie, car nous l'avons vu, les fluctuations sont en grande partie dues à l'écoulement même.

Encore que l'introduction de ces éléments auront tendance à diminuer la fréquence de réponse, donc la compensation de température, ce qui peut à la longue se traduire par une surchauffe excessive ou un refroidissement inadéquat du fil chaud.

La nature de la réponse est le problème majeur qui se pose, quand l'anémométrie mesure uniquement la vitesse du vent. C'est en réalité une difficulté liée à l'alimentation en continu (DC) de l'anémométrie; sollicitée par un signal périodique (carré, sinusoïdal...), la lecture en AC de son signal de sortie ne pose aucun problème.

On peut envisager des solutions à ce problème :

3.1 - un détecteur de pics

C'est un circuit, assez simple utilisant un ampli opérationnel monté en niveleur de pics, une diode et une capacité'.

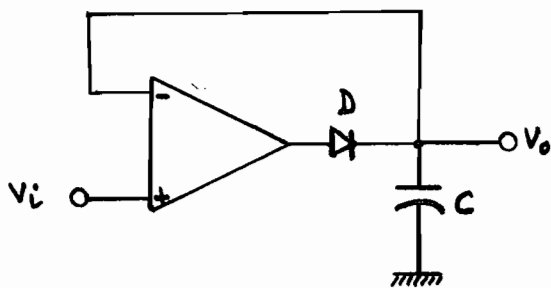


fig 3.2 : détecteur de pics

Avec le détecteur de pics, le signal de sortie subit une transformation au niveau de la composante fluctuante.

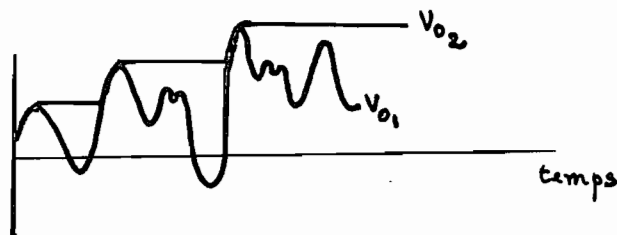


fig . 3.3 : reponse du détecteur de pics

L'inconvénient est que avec cette solution l'anémomètre ne pourra plus être utilisé pour voir la nature d'un écoulement.

3.2 - Un convertisseur tension - fréquence

Cette solution n'est guère intéressante que si elle est associée à un linéarisateur et à un circuit à affichage digital ou à cristaux liquide.

L'objectif est de transformer le signal linéarisé de telle sorte qu'il ait une tension fixe, mais une fréquence variable fonction de la valeur de la tension.

Une horloge est alors utilisée pour venir échantillonner la sortie modifiée pour alimenter le circuit d'affichage qui donnera alors la valeur de la vitesse selon la fréquence de la tension prélevée par l'horloge.

En fait, c'est le système communément utilisé pour faire la conversion analog-digitale des informations tirées des transducteurs présentant des caractéristiques similaires à celles de l'anémomètre à fil chaud.

Nous présentons ci-dessous le schéma d'un convertisseur tension - fréquence :

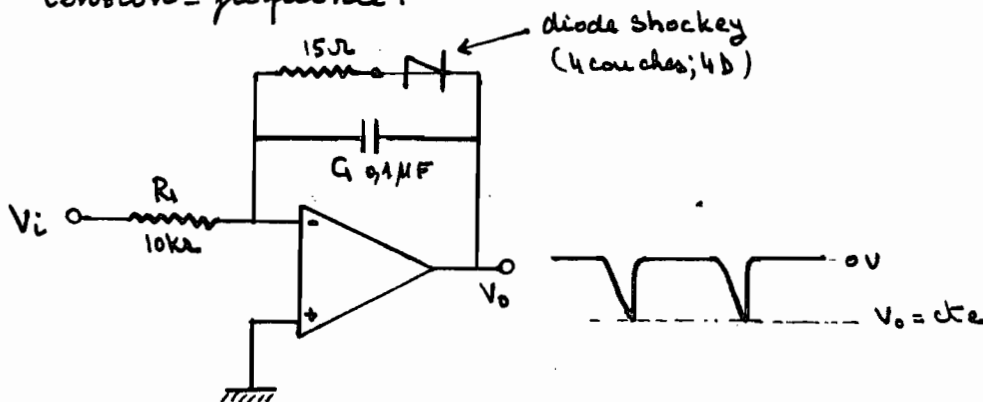


Fig 3.4 : convertisseur tension - fréquence

Ce montage est constitué par un simple intégrateur dont le condensateur d'intégration est shunté par une diode Shockley ou diode à 4 couches. Cette diode a deux états stables: bloqué jusqu'à une certaine valeur de la tension à ses bornes et conducteur pour une certaine gamme de valeurs du courant qui le traverse.

La tension s'élève progressivement aux bornes du condensateur avec une pente qui dépend essentiellement de la tension appliquée à l'entrée.

Lorsque la tension de pic de la diode Shockley placée à ses bornes est atteinte, ce condensateur se décharge aussi longtemps que le courant qui traverse la diode est supérieur au courant de maintien. Pour une tension légèrement inférieure au courant de maintien la diode redevient brusquement non-conductrice, le condensateur peut se recharger et le cycle recommence. Le signal de sortie est en dent de scie dont la fréquence est donnée par la relation:

$$f \approx \frac{V_i}{R_i C_i (V_p - 1)}$$

V_p : tension de pic de la diode.

Il est bien évident que dans l'utilisation d'un tel montage à la sortie de l'anémomètre, il faut s'assurer que la tension U_w est toujours supérieure à V_p (prendre $U_w (v=0 \text{ m/s}) = V_p$), ce qui implique un choix judicieux de la diode de Shockley.

D/ CONCEPTION ET REALISATION D'UN LINEARISATEUR

Pour anémomètre à fil chaud

Nous, avons vu que la réponse, du fil chaud de l'anémomètre n'est pas linéaire, et que, ceci rend très difficile l'utilisation d'un tel appareil du fait de la recalibration, qu'il faut faire à chaque que l'on change le senseur.

Vu que celui-ci est, chauffé, constamment, ce qui ne lui permet pas, de durer longtemps, nous proposons, un, circuit linéarisateur qui nous dispense de toute, calibration fastidieuse et répétée, rendant ainsi aisée l'exploitation de l'appareil.

1. Critères de Conception

Dans la théorie nous, avons, développé la fonction de transfert thermique entre le fluide et le fil chaud.

La formule générale de King donne :

$$R_w I_w^2 = (A + B V^n)(T_w - T_a) \quad [1.1]$$

n : constante

A et B sont des constantes pouvant être déterminées par calibration.

R_w , T_w et T_a sont, des constantes (anémomètre à température constante)

La puissance $R_w I_w^2$ peut aussi s'exprimer par :

$$R_w I_w^2 = U_w \cdot I_w = U_w \cdot \frac{U_w}{R_w} = \frac{U_w^2}{R_w} \quad [1.2]$$

Considérons les conditions où la vitesse v est nulle ;
l'équation [1.1] devient :

$$R_w \cdot I_{w_0}^2 = (A + 0) (T_w - T_a) \quad (I_{w_0}: \text{courant à } v=0 \text{ m/s})$$

$$\rightarrow R_w \cdot I_{w_0}^2 = A (T_w - T_a) \quad [1.3]$$

$$\text{tirons } A \rightarrow A = \frac{R_w \cdot I_{w_0}^2}{T_w - T_a} \quad [1.4]$$

Le numérateur n'est rien d'autre que la puissance
de chauffage du fil en l'absence de tout écoulement
de vitesse :

$$R_w I_{w_0}^2 = \frac{U_{w_0}^2}{R_w}$$

L'équation [1.1] peut s'écrire :

$$R_w I_w^2 = \frac{U_w^2}{R_w} = \left[\frac{U_{w_0}^2}{R_w (T_w - T_a)} + B v^n \right] (T_w - T_a) \quad [1.5]$$

$$\rightarrow \frac{U_w^2}{R_w (T_w - T_a)} - \frac{U_{w_0}^2}{R_w (T_w - T_a)} = B v^n$$

$$\rightarrow v = \left[\frac{1}{B \cdot R_w (T_w - T_a)} (U_w^2 - U_{w_0}^2) \right]^{1/n} \quad [1.6]$$

$$\text{Soit } K = [B \cdot R_w \cdot (T_w - T_a)]^{-\frac{1}{n}} \quad [1.7]$$

$$\rightarrow \boxed{v = K \cdot (U_w^2 - U_{w_0}^2)^{1/n}} \quad [1.8]$$

ou

$$\rightarrow \boxed{v = K [(U_w - U_{w_0})(U_w + U_{w_0})]^{1/n}} \quad [1.9]$$

Le but de cette dérivation est de pouvoir utiliser un circuit logarithmique et antilogarithmique pour convertir le signal de sortie en une analogie de la vitesse.

Il est clair que l'équation [1.9] utilisera moins d'amplificateurs opérationnels pour faire cette traduction.

L'équation [1.9] peut s'obtenir de la façon suivante grâce à un circuit entièrement électronique :

1. Faire $(U_w - U_{w_0})$: 1 différentiateur
2. Faire $(U_w + U_{w_0})$: 1 sommateur
3. Faire $\text{Log}_{10}(U_w + U_{w_0})$: 1 circuit Log.
4. " $\text{Log}_{10}(U_w - U_{w_0})$: 1 circuit Log.
5. " $\text{Log}_{10}(U_w + U_{w_0}) + \text{Log}(U_w - U_{w_0})$: 1 sommateur

remarques: $\text{Log } A + \text{Log } B = \text{Log } AB$

$$n \text{Log} AB = \text{Log}(AB)^n$$

$$\exp [n \text{Log} AB] = \exp [\text{Log}(AB)^n] = (AB)^n$$

Pour la formule de King : $n : 0,42 - 0,50$
 d'où : $\frac{1}{n} : 2,22 - 2$

6. Faire $\frac{1}{n} [\text{Log}(U_w + U_{w0}) + \text{Log}(U_w - U_{w0})]$: amplificateur

7. Prendre $\exp \left[\frac{1}{n} (\text{Log}(U_w + U_{w0}) + \text{Log}(U_w - U_{w0})) \right]$: anti-Log

Étudions les montages qui peuvent faire les opérations ci-dessus ; nous n'analyserons que les amplificateurs logarithmiques et anti logarithmiques, les sommateurs et différentiateurs étant routiniers.

2. Les amplificateurs log. et anti log.

Lorsqu'une diode ou un transistor est monté dans la boucle de contre-réaction d'un amplificateur opérationnel, la tension de sortie sera toujours fonction du courant d'entrée mais selon la loi logarithmique.

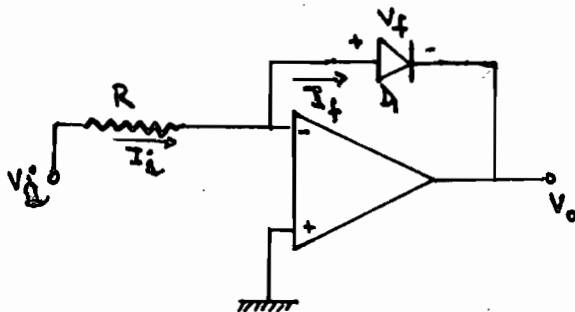


fig 1.1 amplificateur logarithmique.

Le courant qui traverse la diode est donné par :

$$I_f = I_0 \left(e^{V_f / \eta V_T} - 1 \right)$$

$$V_f \gg \eta V_T \quad \Rightarrow \quad I_f \approx I_0 e^{V_f / \eta V_T}$$

$$I_f \gg I_0$$

$$\text{avec } V_T = \frac{kT}{q}$$

où : q : charge d'électron $-1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

k : constante de Boltzmann $-1,306 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$

I_0 : courant de blocage - de 1 mA à $1 \mu\text{A}$

T : température en $^\circ\text{K}$

η : coefficient - 1 pour Si et - 2 pour Ge

comme $V_o = -V_f$ et $I_f = I_i$, on obtient

$$V_o = -\eta V_T (\text{Log } V_i - \text{Log } R I_0)$$

$$\text{ou } V_o = C_1 \text{Log } V_i + C_2$$

en général $\eta V_T \approx 0,06$ et il faut $V_i > 0$

En ce qui concerne l'amplificateur anti-log, il suffit de changer les places respectives de la résistance et de la diode, comme montré à la fig 1.2

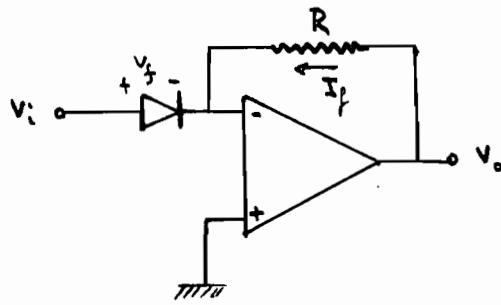


fig 1.2 ampli-anti-log.

un développement similaire, donne :

$$V_o = -R I_0 e^{V_i / 2V_T} \quad \text{ou} \quad V_o = +C_2 e^{V_i / C_1}$$

Remarquons que la diode peut être remplacé dans les deux montages par un transistor dont la base est reliée au collecteur pour le circuit logarithmique ou connectée à la masse pour l'anti-logarithmique. Il est aussi nécessaire de prévoir une petite capacité \$C\$ (0,001 \$\mu\$F) pour compenser la capacité d'entrée du montage, cette capacité doit être montée en parallèle avec le transistor (diode).

3. Circuit linéarisateur

Le circuit, conçu pour résoudre l'équation [1.9] est présenté, à la fig 3.1, il doit être connecté au point de jonction, des deux senseurs \$S_1\$ et \$S_2\$ pour y prendre la tension \$U_w\$.

17

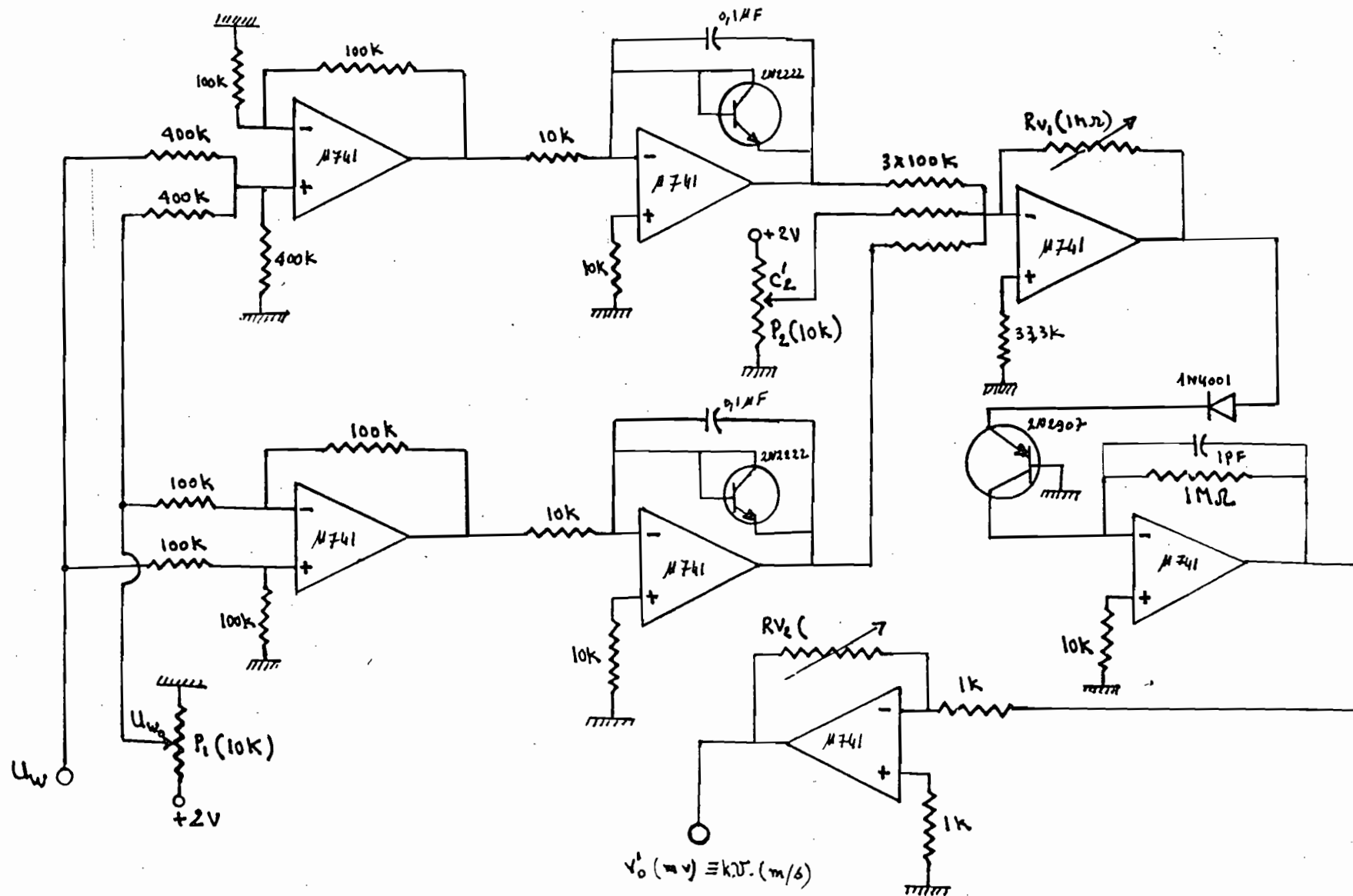


fig. 3.1 linéarisateur pour anémomètre à fil chaud.

Le circuit linéarisateur a été testé
Comme suit :

3-1. test des 2 circuits logarithmiques

Le but est de déterminer les constantes dans :

$$V_o = C_1 \text{Log } V_i + C_2$$

on a vu que $C_1 \approx -\eta V_T \approx -0,06$, ce qui est à vérifier.

pour déterminer : $C_1 \longrightarrow C_1 = \frac{V_{o1} - V_{o2}}{\text{Log}_{10} \left(\frac{V_{i1}}{V_{i2}} \right)}$

: $C_2 \longrightarrow C_2 = V_o - C_1 \text{Log}_{10} V_i$
ou $\longrightarrow C_2 = V_o (V_i = 1V)$

Nous présentons ci-dessous les résultats du test pour les deux circuits logarithmiques :

1)

$V_i (V)$	$V_o (V)$	C_1	$C_2 (V)$
0,557	-0,556		-0,571
0,765	-0,564	-0,058	-0,571
1,027	-0,571	-0,055	-0,570
1,150	-0,574	-0,061	-0,570
1,615	-0,583	-0,061	-0,570
1,000	-0,571	-	-0,571

2)

$V_i (V)$	$V_o (V)$	C_1	$C_2 (V)$
$3,5 \cdot 10^3$	-0,422		-0,572
0,205	-0,531	-0,061	-0,572
0,460	-0,552	-0,060	-0,572
0,579	-0,558	-0,060	-0,572
1,032	-0,573	-0,060	-0,572
1,000	-0,572	-	-0,572

nous vérifions ainsi que $C_1 = -\eta V_T = 0,06$ et que $C_2 = -0,571 V$

3- 2. Test du circuit anti logarithmique.

Le but est de déterminer les constantes dans :

$$V_o = C_2 e^{V_i/C_1}$$

aussi de vérifier $C_1 = -qV_T \approx 0,06$

→ mais comme qu'on a ajouté une 2^{ème} diode à l'entrée : $C_1 = -2qV_T = 0,12$

on détermine : C_1 par :
$$C_1 = \frac{V_{i1} - V_{i2}}{\text{Log}_{10} \left(\frac{V_{o1}}{V_{o2}} \right)}$$

" " : C_2 par :
$$C_2 = \frac{V_o}{e^{V_i/C_1}}$$

ou par : $C_2 = V_o (V_i = 0)$

Les résultats du test sont ci-dessous.

$V_i (V)$	$V_o (V)$	C_1	C_2
0,548	$-5 \cdot 10^3$	0,136	$-4,67 \cdot 10^{-7}$
0,667	$-37,2 \cdot 10^3$	0,142	$-4,63 \cdot 10^{-7}$
0,784	-0,247	0,139	$-4,62 \cdot 10^{-7}$
0,843	-0,657	0,140	$-4,52 \cdot 10^{-7}$
0,890	-1,418	0,138	$-5,06 \cdot 10^{-7}$
0,985	-6,95		

on trouve $C_1 \approx 0,137$ et $C_2 \approx 4,7 \cdot 10^{-7}$

- 3.3 Analyses

Les résultats des tests montrent que le circuit fonctionne, cependant si la fonction logarithmique est une compression de gamme, le circuit, antilogarithmique doit être soumis à de petites tensions car la décompression par la fonction exponentielle est très élevée.

C'est pourquoi il est nécessaire, d'annuler les constantes introduites par les circuits logarithmiques à l'entrée, de la décompression.

C'est pour cette raison qu'on a introduit une tension positive, par le potentiomètre P_2 , à l'entrée du sommateur donnant :

$$\frac{1}{n} \times [\text{Log}(U_w - U_{w_0}) + \text{Log}(U_w + U_{w_0})] = \text{Log}[(U_w^2 - U_{w_0}^2)]^{1/n}$$

L'introduction de la diode D_1 a pour but d'élever la tension de déclenchement du circuit anti-log permettant, ainsi, d'élever la borne inférieure de la gamme, de tensions pouvant être traitée par le circuit. En effet l'ampli-opérationnelle ne peut délivrer plus de tension que son alimentation, ainsi, seule une gamme conforme peut être traitée sans saturation de l'ampli-opérationnel.

Il faut remarquer enfin que la tension qui est introduite avec le potentiomètre P_2 peut ne pas, annuler les constantes, elle doit permettre surtout d'avoir à la sortie du linéarisateur une tension nulle ou négligeable.

quand la vitesse est nulle.

En effet si à l'entrée du sommateur on a :

$$- \eta V_T \left[\text{Log}(u_w - u_{w_0}) + \text{Log}(u_w + u_{w_0}) \right] + c_2 + c_2'$$

à sa sortie on aura :

$$+ \frac{\eta V_T}{n} \text{Log}(u_w^2 - u_{w_0}^2) + \frac{1}{n} (c_2 + c_2')$$

ce qui donne à la sortie de l'antilogarithmique :

$$c_3 e^{\frac{\frac{\eta V_T}{n} \text{Log}(u_w^2 - u_{w_0}^2) + \frac{1}{n} (c_2 + c_2')}{2 V_T}}$$

$$= c_3 e^{\text{Log}(u_w^2 - u_{w_0}^2) \frac{1}{n}} \cdot e^{\frac{c_2 + c_2'}{n}}$$

$$= c_3 e^{(c_2 + c_2')/n} \cdot (u_w^2 - u_{w_0}^2) \frac{1}{n}$$

On voit alors que quelque soit la valeur introduite c_2' l'expression, qui nous intéresse $(u_w^2 - u_{w_0}^2) \frac{1}{n}$ est restituée.

Le coefficient $c_3 e^{(c_2 + c_2')/n}$, au même titre que $\frac{1}{B \cdot R_w (T_w - T_a)}$, est repris par le dernier amplificateur à gain variable.

E / MESURE DE VITESSE AVEC ANEMOMETRE MUNI D'UN LINEARISATEUR

Le but de cette partie est de vérifier si le linéarisateur conçu est bien conforme à la fonction qui lui est dévouée.

1. Principe de mesure

Des mesure se font exactement, comme dans la précédente application :

utilisation de la soufflerie, de l'anémomètre à hélices etc...

Il faut, seulement connecter le linéarisateur, au transducer (U_w), et régler, avec le potentiomètre P_1 (U_{w_0}); une tension C'_2 est introduite, dans le sommateur pour avoir une sortie nulle ou négligeable, au niveau de la lecture.

Le gain, du dernier, amplificateur est ajustée (R_{V_2}) selon la convenance.

Quelques mesures préliminaires doivent être prises pour s'assurer que n (équation de King) est bien

, adapté à l'écoulement.

En effet n varie avec le nombre de Reynolds comme suit:

$$n = 0,45$$

$$n \quad 0,02 < Re < 44$$

$$n = 0,51$$

$$n \quad 44 < Re < 150$$

Le réglage de $\frac{1}{n}$ se fera avec la résistance variable R_v , jusqu'à l'obtention d'une proportionnalité totale entre la vitesse lue sur l'anémomètre à hélices et celle obtenue avec l'anémomètre à fil chaud.

2. Tableau des résultats

Le filament utilisé est celui d'une ampoule de faible puissance (11W) et de résistance, à froid $R_{25^\circ C} = 9,3 \Omega$. La résistance de fonctionnement est $R_w = 12,7 \Omega$

La vitesse nulle donne : $U_{w0} = 0,341 V$, cette tension est introduite par P_1 .

Des résultats sont présentés au tableau 2.1.

La courbe de la fig 2.1 présente la variation de la sortie du linéarisateur en fonction de la vitesse du vent.

tableau . 2.1 : resultats de mesures sur anémomètre à portie linéarisé .

V (m/s)	0,1	1,5	2,45	2,9	3,1	3,5	3,7	4,4	5,0	5,6	6,8	7,3
I _w (mA)	34	43	46,5	47,5	48,5	49	50	51	55	56,5	59	60
U _w (V)	0,493	0,548	0,592	0,605	0,618	0,624	0,637	0,650	0,700	0,720	0,752	0,764
R _w (Ω)	12,74	12,74	12,73	12,74	12,74	12,73	12,74	12,75	12,73	12,74	12,75	12,73
P (w)	0,015	0,024	0,028	0,029	0,030	0,031	0,032	0,033	0,039	0,041	0,044	0,046
V' (mV)	5	75	122	146	155	173	185	221	252	281	340	368

pente de la droite : $\frac{V'}{V} \approx 0,05$

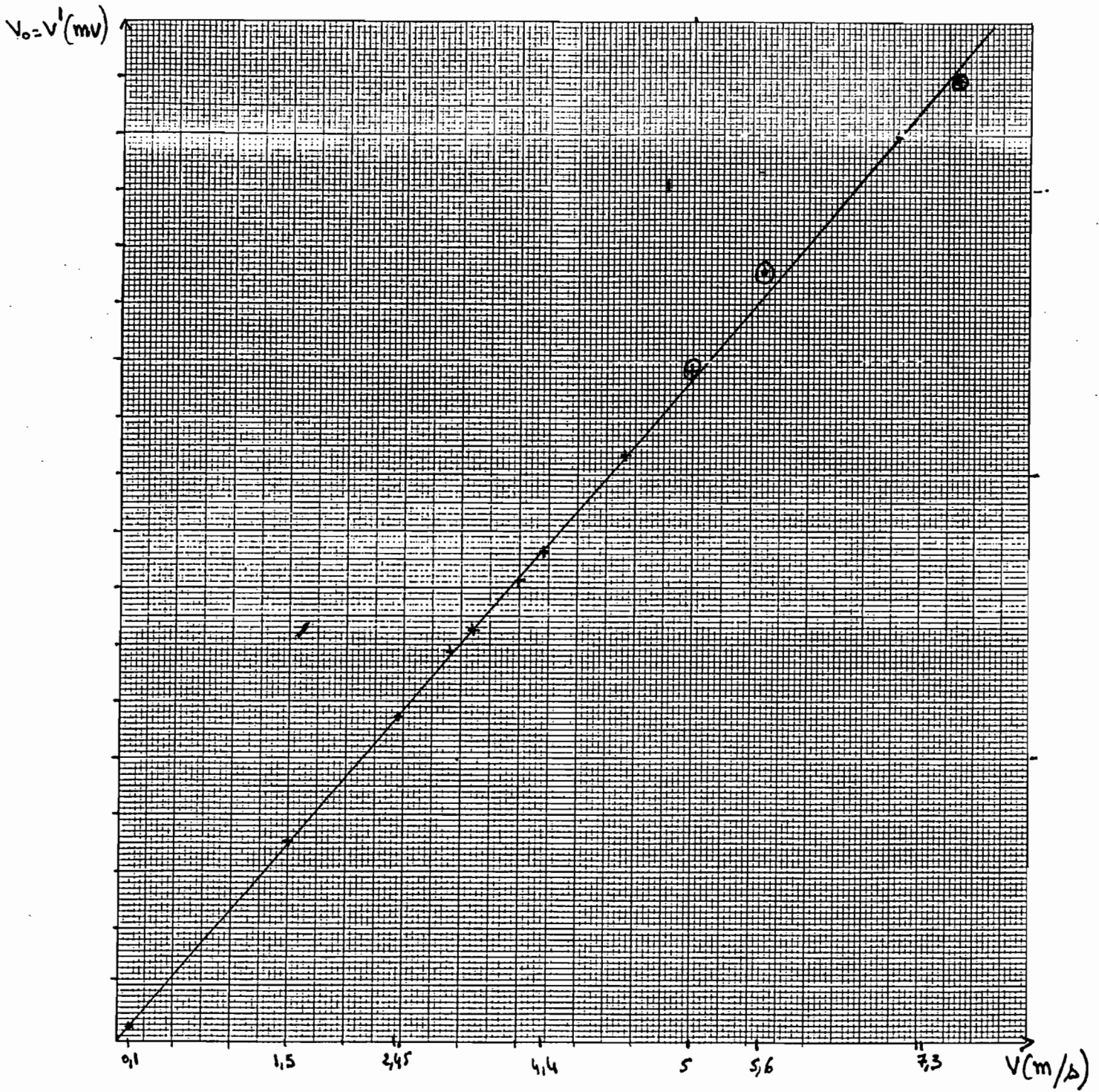


FIGURE 2.1

LÉGENDE: Tension de sortie du linearisateur anémométrique en fonction de la vitesse du vent.

" filament d'ampoule 10mw, $R_{25^{\circ}C} = 9,3\Omega$, $R_{W} =$, $U_{W_0} = 0,314V$

3. Interprétations

La figure 2.1 montre une sortie proportionnelle à la vitesse mesurée.

Nous pouvons dire, même si la plage des mesures (0-10m/s) ne correspond pas à la zone où la non-linéarité est plus accentuée (au delà de 5m/s), que le linéarisateur remplit bien son rôle.

Cependant le circuit, ainsi conçu doit être stabilisé davantage, car les ampli-log et anti-log sont très sensibles à la température.

Ceci doit pouvoir se faire avec des thermistances adéquatement insérées dans le circuit.

H

F/ CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Au terme de cette étude nous pouvons dire que si l'approche d'un anémomètre à fil chaud paraît simple, force est de reconnaître que l'étude du fonctionnement ainsi que la réalisation d'un tel appareil sont tout à fait complexes. Néanmoins, considérant les résultats obtenus, on peut être satisfait de la manière dont le sujet a été traité.

A ce propos il faut dire que les circuits ont été conçus en fonction du matériel disponible au laboratoire, et pour cela ils peuvent ne pas être très économiques.

En effet, il y a certainement sur le marché, des circuits intégrés qui peuvent remplacer plusieurs ampli-opérationnels du circuits.

A titre d'exemple il existe un circuit intégré pouvant faire les opérations logarithmiques et exponentielles.

En ce qui concerne le fonctionnement du circuit avec une pile de 9 volts, les ampli-opérationnels LH 308... sont appropriés car pouvant être

alimentés par une seule tension (+9V).

Nous espérons que la réalisation effective (circuit imprimé...) de l'anémomètre proposé se fera aussi bien au niveau de l'E.P.T qu'au C.E.R.E.R, car un tel instrument est très utile, non pas seulement pour l'évaluation du gisement éolien qu'il permet, mais, aussi par la possibilité qu'elle offre de déterminer le régime d'un écoulement.

Enfin, comme le circuit proposé donne un signal de sortie directement exploitable par un volt-mètre numérique, on a pas jugé nécessaire, de proposer dans ce rapport un circuit d'affichage à cristaux liquide ou digital bien qu'on en ait réalisé un, cependant il est souhaitable que lors d'une éventuelle réalisation, qu'un ensemble comportant un affichage soit fait.

H

BIBLIOGRAPHIE

[1] : Turbulent Flows
in
Engineering

par A. J. REYNOLDS

Edition JOHN WILEY & SONS

1974

pages : 50 - 80

[2] : Mecanique des fluides - 2

par : E. A. BRUN
A. MARTINOT - LAGARDE
J. MATHIEU

Edition DUNOD

Paris 1968

pages : 35 - 50

[3]: CIRCUITS A SEMICONDUCTEURS
DANS L'INDUSTRIE

Tome 1 : Appareils de Mesure

Par : I. ALEXIU I. BOCONCIOS
R. ANDRESCU AL. POPESCU
D. BENGULESCU A. VATASESCU
I. FELEA (Coordonnateur)

Edition: MASSON et cie
1970

[4] : Technical Bulletin
TB 6
PARAMETER FOR COMPARING
ANEHOMETER RESPONSE

TSI . P.O BOX 43394
ST. Paul , MN. 55164

[5] LES CAPTEURS EN INSTRUMENTATION
INDUSTRIELLE

DUNDOD

[6] : INTEGRATED ELECTRONICS
analog and digital circuits
and systems

par : MILLMAN and HALKIAS

edition Mc GRAW-HILL BOOK COMPANY
1972

[7] : Notes de Cours : ELEC. 5.11

par : A. WOLSKI

E.P.T. 1986

[8] : Notes de Cours : CHAL. 4.11

par . A. CERNEA

E.P.T. 1985

ANNEXE : anémomètre à hélices (calibration)

UTILISATION

Utilisation avec contrôleur équipé d'un connecteur six broches

- Le contrôleur étant à l'arrêt, enficher sur celui-ci l'adaptateur CV
- Raccorder le capteur thermo-anémomètre à l'adaptateur CV
- Mettre le contrôleur en marche

Mesure de température d'air

- Placer le commutateur de l'adaptateur CV sur "θ"
- Placer le commutateur du contrôleur sur 200 mV $\overline{\text{--}}$
- Placer la tête du capteur dans l'air dont on veut mesurer la température
- Lire la valeur de la température, en °C, sur le contrôleur

Mesure de vitesse d'air

- Placer le commutateur de l'adaptateur CV sur "Vitesse"
- Placer le commutateur du contrôleur sur 200 mV $\overline{\text{--}}$
- Présenter la tête du capteur devant la source d'air dont on veut mesurer la vitesse
- Lire la valeur de la vitesse, en m/s, sur le contrôleur
- Remarque : rechercher la position du capteur permettant d'obtenir la valeur maximale.

Mesure de différence de température

- Placer le commutateur de l'adaptateur CV sur "Δ θ"
- Placer le commutateur du contrôleur sur 200 mV $\overline{\text{--}}$
- Placer la tête du capteur dans l'air dont on veut mesurer la différence de température par rapport à celle de l'adaptateur
- Placer l'ensemble adaptateur + contrôleur le plus loin possible de toute source thermique de façon à obtenir la mesure de l'air ambiant
- Lire, sur le contrôleur, la différence entre les deux températures, en °C

Affectation du coefficient k (pour mesures de débit et de puissance)

- A chaque cône, correspond un coefficient k, caractéristique de sa géométrie
- Placer le commutateur sur la position "k Δ"

Exemple de mesure de différence de température avec multimètre CONPA

