

R 480237 (233)

CEA-BIB-227

CEA-BIB-227

**COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE**

E-11

# MESURE DES DEBITS DE GAZ

*par*

*Madeleine BOURE*

Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble

**Bibliographie CEA-BIB-227**

**1978**

Ga

**SERVICE DE DOCUMENTATION**

C.E.N - SACLAY B.P. n° 2, 91 190 - GIF-sur-YVETTE - France

## PLAN DE CLASSIFICATION DES RAPPORTS ET BIBLIOGRAPHIES CEA

(Classification du système international de documentation nucléaire SIDON/INIS)

A 11	Physique théorique	C 30	Utilisation des traceurs dans les sciences de la vie
A 12	Physique atomique et moléculaire	C 40	Sciences de la vie : autres études
A 13	Physique de l'état condensé	C 50	Radioprotection et environnement
A 14	Physique des plasmas et réactions thermonucléaires		
A 15	Astrophysique, cosmologie et rayonnements cosmiques	D 10	Isotopes et sources de rayonnements
A 16	Conversion directe d'énergie	D 20	Applications des isotopes et des rayonnements
A 17	Physique des basses températures		
A 20	Physique des hautes énergies	E 11	Thermodynamique et mécanique des fluides
A 30	Physique neutronique et physique nucléaire	E 12	Cryogénie
		E 13	Installations pilotes et laboratoires
B 11	Analyse chimique et isotopique	E 14	Explosions nucléaires
B 12	Chimie minérale, chimie organique et physico-chimie	E 15	Installations pour manipulation de matériaux radioactifs
B 13	Radiochimie et chimie nucléaire	E 16	Accélérateurs
B 14	Chimie sous rayonnement	E 17	Essais des matériaux
B 15	Corrosion	E 20	Réacteurs nucléaires (en général)
B 16	Traitement du combustible	E 30	Réacteurs nucléaires (types)
B 21	Métaux et alliages (production et fabrication)	E 40	Instrumentation
B 22	Métaux et alliages (structure et propriétés physiques)	E 50	Effluents et déchets radioactifs
B 23	Céramiques et cermets		
B 24	Matières plastiques et autres matériaux	F 10	Economie
B 25	Effets des rayonnements sur les propriétés physiques des matériaux	F 20	Législation nucléaire
B 30	Sciences de la terre	F 30	Documentation nucléaire
		F 40	Sauvegarde et contrôle
C 10	Action de l'irradiation externe en biologie	F 50	Méthodes mathématiques et codes de calcul
C 20	Action des radioisotopes et leur cinétique	F 60	Divers

### Bibliographie CEA-BIB-227

*Cote-matière de ce rapport : E.11*

### DESCRIPTION-MATIERE (*mots clefs extraits du thesaurus SIDON/INIS*)

#### *en français*

ECOULEMENT DES GAZ  
DEBITMETRES  
ANEMOMETRES A FIL CHAUD  
TUBES DE PITOT  
TUBES DE VENTURI  
SPECIFICATIONS  
PERFORMANCE  
EXAMENS CRITIQUES

#### *en anglais*

GAS FLOW  
FLOWMETERS  
HOT WIRE ANEMOMETERS  
PITOT TUBES  
VENTURI TUBES  
SPECIFICATIONS  
PERFORMANCE  
REVIEWS

- Bibliographie CEA-BIB-227 -

Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble  
Département de Transfert et Conversion d'Energie  
Service des Transferts Thermiques

MESURE DES DEBITS DE GAZ

par

Madeleine BOURE

- Mai 1978 -

CEA-BIB-227 - BOURE Madeleine  
MESURE DES DEBITS DE GAZ.

Sommaire.- On passe en revue les différents types de débitmètres utilisés pour la mesure des débits de gaz en s'attachant plus particulièrement aux mesures de laboratoire. Pour chaque type de débitmètre on présente, son principe, la description de l'appareil, les méthodes d'étalonnage et la précision que l'on peut en attendre. La note se termine par deux tableaux récapitulatifs et quelques réflexions sur l'étalonnage des débitmètres pour les gaz.

1978

77 p.

Commissariat à l'Energie Atomique -France.

---

CEA-BIB-227 - BOURE Madeleine  
GAS FLOWRATE MEASUREMENTS

Summary.- One reviews the main types of gas flowmeters, especially those which are used for laboratory measurements. Modeling, design recommendations, calibration methods and expected accuracy are discussed for each flowmeter. Different types and trademarks are given in two tables.

1978

77 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France.

SOMMAIRE

	Pages
NOMENCLATURE	5
0. INTRODUCTION	7
1. MOULINETS ET DEBITMETRES A ROTOR HELICOIDAL	9
2. DEBITMETRES THERMIQUES	15
3. DEBITMETRES A FLOTTEUR	18
4. MESURES DE DEBITS BASES SUR LA MESURE DES VITESSES LOCALES	23
5. ORGANES DEPRIMOGENES	30
6. MESURES PAR TRACEURS	43
7. DEBITMETRES A DEVIATION D'IONS	48
8. DEBITMETRES PIEZO-PRÉCESSIF	54
9. ETALONNAGE DES DEBITMETRES A GAZ	59
CONCLUSIONS	65
TABLEAUX RECAPITULATIFS : 1 - par type de débitmètre	66
2 - par marques	67
BIBLIOGRAPHIE	71

NOMENCLATURE
--------------

A	Aire
$C_D$	Coefficient de décharge
$C_P$	Chaleur massique à pression constante
$C_V$	Chaleur massique à volume constant
D	Diamètre ou déviation
d	Diamètre
E	Champ électrique
g	Accélération de la pesanteur
h	Coefficient de transfert de chaleur
I	Intensité du courant électrique
K	Mobilité des ions
k	Constante ou conductibilité thermique
L	Longueur
M	Débit massique
P	Poids
p	Pression
q	Débit volumique
R	Résistance électrique, rayon ou constante des gaz parfaits
Re	Nombre de Reynolds
r	Rayon
S	Section
s	Section
T	Température
t	Temps
V	Différence de potentiel ou volume
v	Vitesse
W	Energie électrique
Z	Facteur de compressibilité d'un gaz
z	Altitude

$\alpha$  Coefficient de débit  
 $\beta$  Rapport des diamètres :  $d/D$   
 $\gamma$   $C_p/C_v$   
 $\Delta$  Différence  
 $\theta$  Angle  
 $\rho$  Masse volumique  
 $\omega$  Vitesse angulaire

O. INTRODUCTION

De tout temps on a essayé de mesurer des débits de fluides, que ce soit dans les rivières - les Egyptiens le faisaient déjà pour prévoir les crues du Nil - et plus récemment dans les canaux ou les conduites. Le principe de base est la conservation de la masse ; en régime établi, et en l'absence de toute source ou puits, la quantité de fluide entrant d'un côté de la conduite est égale à la quantité qui sort de l'autre côté.

La méthode la plus ancienne semble-t-il est celle qui consistait à peser un récipient de volume connu, connaissant le temps mis pour le remplir ; mais cette méthode, ne peut convenir lorsqu'il s'agit d'un écoulement dont on veut suivre l'évolution du débit.

Les débits les plus couramment mesurés sont des débits volumiques ce qui convient fort bien pour les liquides ceux-ci étant pratiquement incompressibles. Pour les gaz par contre le débit volumique ne veut pas dire grand chose si on ne connaît pas, en même temps que l'évolution du débit, celle de la pression et de la température.

Dans le cas des gaz c'est donc le débit massique (ou le débit volumique ramené à des conditions de référence dites normales) qui est le plus intéressant à connaître. Cela est spécialement important lorsqu'il s'agit de transport d'hydrocarbures ou de fluides cryogéniques [SIEV 1960, SERGESKETTER 1975, DEMARLES 1975 ]. Dans le passé, les mesures massiques étaient peu courantes à cause du prix élevé des débitmètres et de leur maintenance ; par ailleurs la précision de ces débitmètres était médiocre et la plage de mesure assez limitée. A l'heure actuelle un certain nombre de constructeurs proposent des débitmètres massiques basés sur différents principes : débitmètres thermiques, débitmètres basés sur la déviation d'ions positifs entre deux électrodes, organes déprimogènes, etc....



Nous nous proposons en particulier de passer en revue différents types de débitmètres qui peuvent être utilisés pour mesurer des débits gazeux de l'ordre de 1 à 1,5 g/s (soit environ 1 l/s pour l'air à pression atmosphérique et température ambiante) ; nous étudierons les débitmètres classiques tels que débitmètres à rotor hélicoïdal, débitmètres thermiques, débitmètres à flotteur, organes déprimogènes et les débitmètres plus particuliers utilisant des traceurs, des déviations d'ions ou le débitmètre piézo-précessif.

La précision de ces mesures est directement liée à l'étalonnage des appareils auquel nous consacrerons un chapitre particulier. En tout état de cause la précision de tous ces appareils ne dépasse guère 2 à 3%.

Outre une soixantaine d'articles particuliers, les renseignements contenus dans cette note sont tirés de plusieurs livres généraux [BENEDICT 1969, BURTON 1958, CONSIDINE 1971, DOEBELIN 1966, DOWDELL 1974, Conférences d'Ermenonville 1973, Symposium de Prague 1966 ].

1. MOULINETS ET DEBITMETRES A ROTOR HELICOIDAL
---

[OWER et PANKHURST 1966, FAUQUET 1960, FIORA 1972]

1. PRINCIPE

Ces appareils fonctionnent suivant le principe du moulin à vent. Quand un moulinet est placé dans une conduite où circule un fluide, l'expérience montre que la vitesse angulaire  $\omega$  de l'hélice est proportionnelle à la vitesse moyenne de l'écoulement c'est à dire au débit volumique,

$$q = k\omega$$

q : débit volumique instantané

$\omega$  : vitesse angulaire de l'hélice

k : constante dimensionnelle

En supposant que les ailettes du moulin sont sans épaisseur, qu'il n'y a aucun frottement mécanique et que le fluide est non visqueux, on peut montrer théoriquement, en calculant la force à laquelle est soumise chaque ailette et le couple moteur appliqué au rotor, que la vitesse angulaire est rigoureusement proportionnelle au débit volumique.

En réalité les ailettes ont une épaisseur non négligeable, il y a des frottements et le fluide même gazeux à une certaine viscosité ce qui va créer un couple résistant. La vitesse angulaire  $\omega$  sera donc inférieure à ce qu'elle devrait être. La différence dépend non seulement de la nature du fluide mais aussi de la valeur du débit et du régime d'écoulement.

Une étude mécanique théorique très complète a été faite par OWER [OWER 1966, Chapitre III, pp. 212 à 239] tenant compte des frottements mécaniques, des variations de masse volumique du gaz, de l'angle des ailettes, des fluctuations de vitesse du gaz, de la non-uniformité de la vitesse dans une section du canal.

Pour augmenter la précision de ces appareils, on diminue la section de passage du fluide au droit de l'élément moteur, en augmentant le diamètre du rotor, le couple exercé par le fluide sur les ailettes est donc augmenté.

## 2. DESCRIPTION

### 2.1 - Les moulinets

Il existe 2 types de moulinets dont l'axe est parallèle ou perpendiculaire à la direction de l'écoulement. Dans le cas de gaz s'écoulant en conduite on utilise des moulinets à ailettes à axe parallèle à l'écoulement ; le moulinet à coupelles (axe perpendiculaire à la direction de l'écoulement) est utilisé en météorologie (Fig.1 et 2).

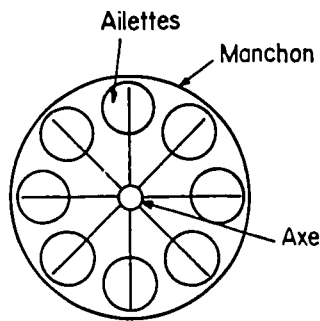


Fig. 1. Moulinets à ailettes

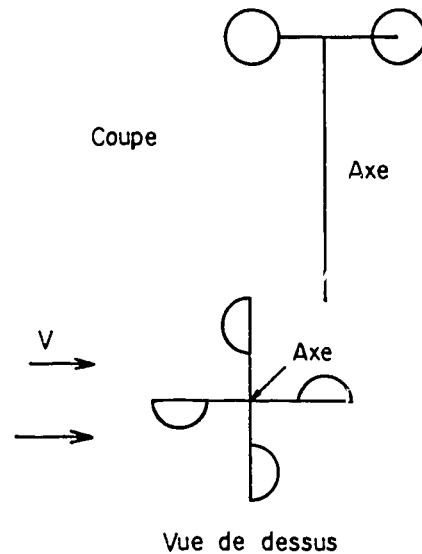


Fig. 2. Moulinets à coupelles

Dans le cas des moulinets à ailettes le fluide agit sur une roue portant 8 ailettes inclinées, l'ensemble tourne dans un manchon cylindrique. Les ailettes sont inclinées de 45 à 60°. Le mouvement de la roue est transmis à un compte-tours que l'on embraye en même temps qu'un chronomètre. La fréquence angulaire est proportionnelle à la vitesse moyenne du fluide à travers le manchon.

A cause des frottements ces appareils ne démarrent que pour une vitesse de l'ordre de 0,2 m/s. Ils ne sont donc pas adaptés aux mesures des faibles débits ; ils sont d'autre part assez volumineux ce qui exclut leur utilisation dans des conduites de petites dimensions. Il existe cependant des micromoulinets (fabrication NEYRPIIC) dont la section est de l'ordre de 30 mm.

## 2.2 - Les débitmètres à rotor hélicoïdal (ou compteur à turbine)

Ce sont des appareils dérivés des moulinets. Il en existe de nombreux modèles qui diffèrent suivant les constructeurs, le débit maximum, le mode de raccordement aux conduites..... mais ils possèdent tous les mêmes organes principaux qui sont : un corps tubulaire, un rotor à ailettes hélicoïdales coaxial au corps tubulaire, des paliers pour supporter l'axe du rotor, et des tranquillisateurs (Fig.3)

Le diamètre intérieur du débitmètre est égal à celui de la conduite. Les tranquillisateurs ont pour but d'atténuer le vrillage de l'écoulement. A basse pression, les gaz ayant une faible masse volumique, on essaye d'augmenter la sensibilité du débitmètre en augmentant la taille du moyeu du rotor ce qui diminue la section de passage du gaz et donc augmente sa vitesse. On diminue l'inertie du rotor en employant des matériaux légers et en diminuant l'épaisseur de ses différentes parties, on diminue les frottements en utilisant des roulements à billes. Il est à noter que tout cela diminue également le temps de réponse de l'appareil. Les transmetteurs sont placés à l'extérieur de la conduite. Les signaux électriques transmis sont la plupart du temps trop faibles pour être utilisés tels quels, on adjoint donc au transmetteur un amplificateur (Fig.4).

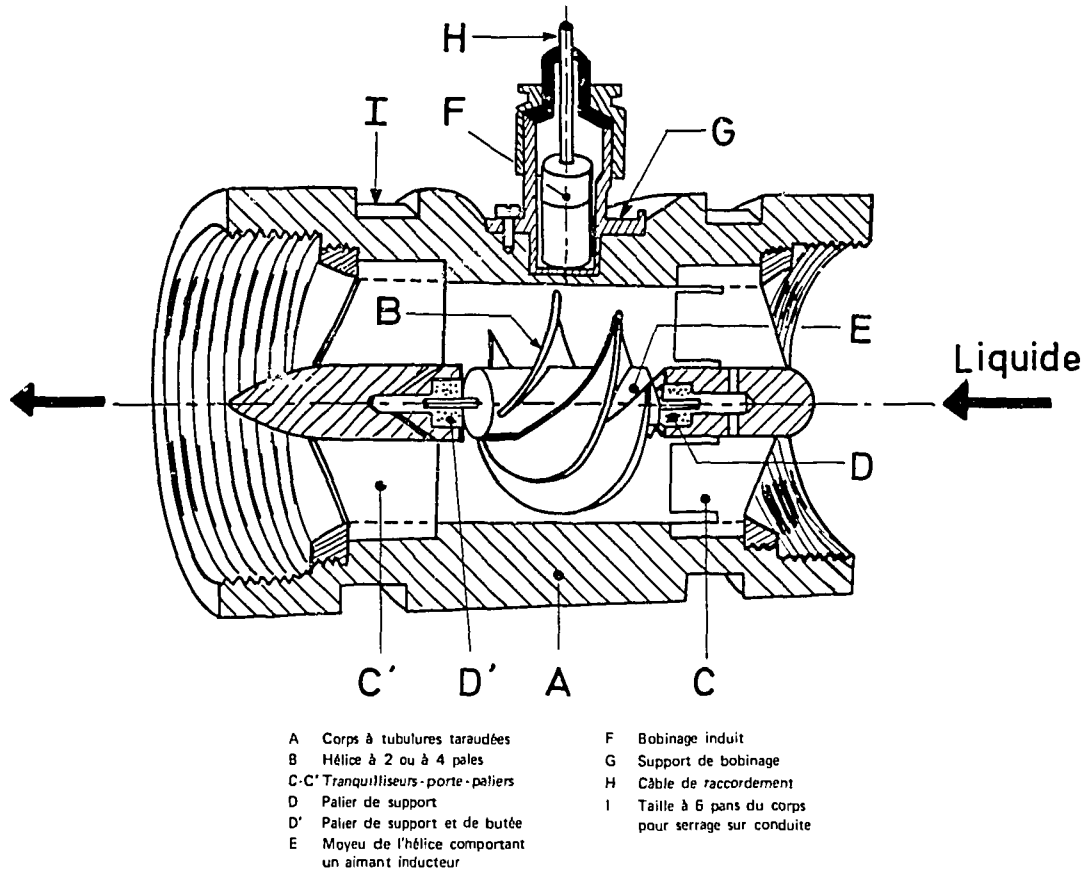
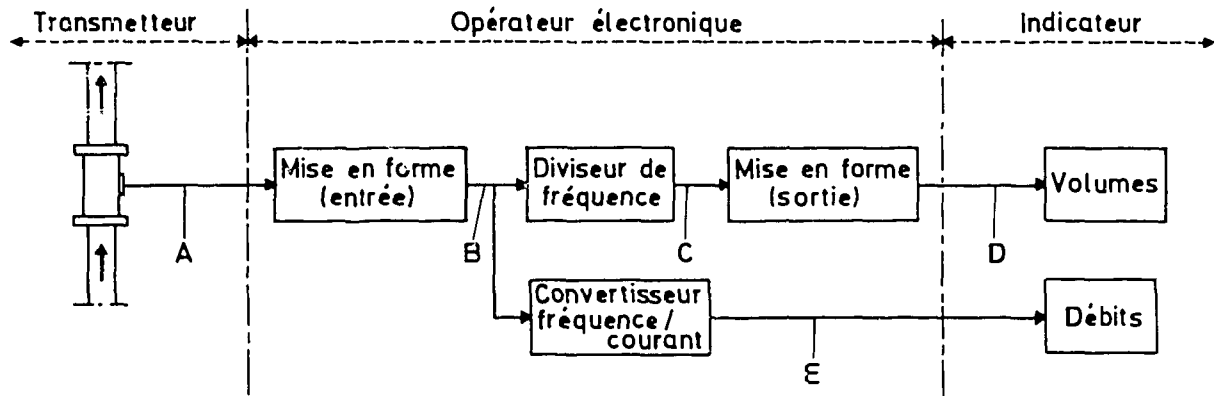
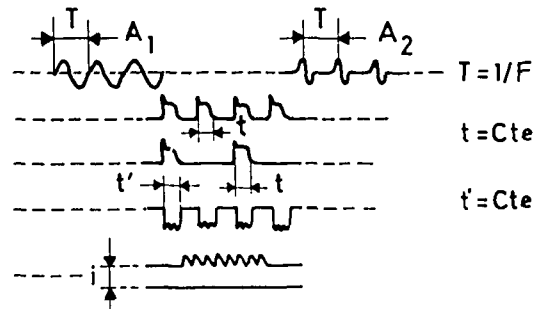


Fig. 3 Compteur Hélicflu (compteurs-Schlumberger) [Tech. de l'ingénieur - Mesures et Contrôle]



- A Signal de fréquence  $F$  proportionnelle au débit instantané  
 $A_1$  aimant inducteur dans le moyeu  
 $A_2$  aimants inducteurs aux extrémités des ailettes
- B Signal de même fréquence après mise en forme
- C Signal de fréquence  $F' = F/n$  ( $n$  réglable)
- D Signal de fréquence  $F'$  après mise en forme
- E Signal analogique d'intensité  $i$  telle que  $(i - i_m) / (i_M - i_m) = F/F_M$   
 $F_M$  fréquence pour le débit maximal  
 $i_M$  courant de fin d'échelle  
 $i_m$  courant de début d'échelle [2 cas possibles :  $i_m = \text{zéro}$   
 $i_m = \text{zéro (zéro décalé)}$ ]



Les circuits d'alimentation de l'opérateur électronique ne sont pas représentés

Figure 4 - Schéma synoptique de la chaîne de mesure d'un débitmètre à émetteur électromagnétique (hélicflu, compteurs-Schlumberger)

### 3. ETALONNAGE

#### 3.1 - Moulinets

L'étalonnage peut être fait selon deux méthodes ; en soufflerie pour les vitesses supérieures à 4 m/s, en manège pour les vitesses inférieures à 4 m/s. Le manège est un bras tournant autour d'un axe vertical à vitesse angulaire constante dans de l'air au repos ; l'anémomètre est fixé sur le bras à distance réglable. Cette méthode permet de déterminer avec précision la vitesse seuil correspondant au démarrage du moulinet.

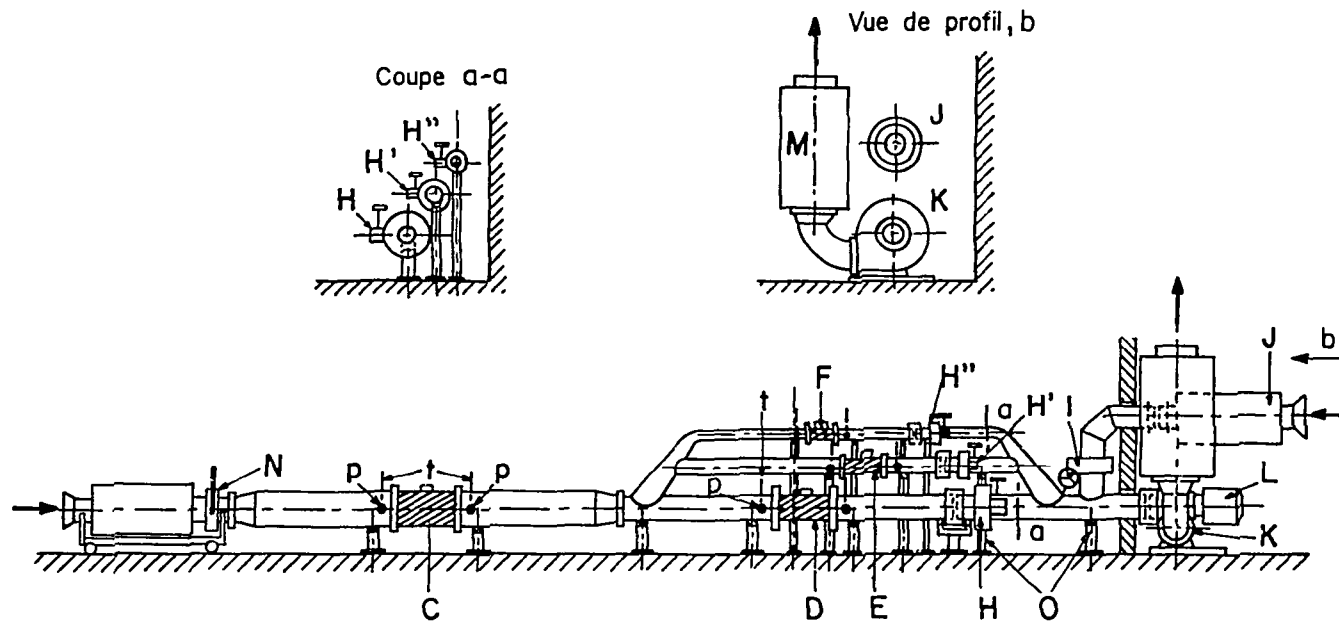
#### 3.2 - Débitmètres à rotor hélicoïdal

La méthode la plus précise consiste à étalonner l'appareil avec un gazomètre. Le circuit est composé du gazomètre étalon, du débitmètre à étalonner, d'une vanne de réglage et d'une vanne de coupure du circuit. Une autre méthode consiste à utiliser des étalons secondaires ; on compare l'appareil à étalonner avec d'autres appareils préalablement étalonnés par la première méthode, ces derniers étant montés en parallèle sur le circuit comme indiqué sur la figure 5. [ Techniques de l'Ingénieur - Mesures et contrôle, R 2281 ].

Pour tous les appareils comportant des organes mobiles, et c'est le cas pour les moulinets et les débitmètres à rotor hélicoïdal, la sensibilité et la fidélité au bas régime dépend de leur degré d'usure, il est donc nécessaire d'effectuer des contrôles périodiques.

### 4. CONCLUSION

Ce type d'appareil présente de nombreux avantages ; le débit est directement proportionnel à la vitesse angulaire du rotor donc à la quantité mesurée. Ils sont peu sensibles à la masse volumique du fluide. La précision est bonne (de l'ordre de 1% en général). L'entretien, facile à effectuer, est assez coûteux et doit être fait souvent à cause des risques d'usure provenant des pièces mobiles.



- |          |   |   |  |
|----------|---|---|--|
| C        | Débitmètre ou compteur à étalonner          | K | Ventilateur fonctionnant en aspiration   |
| D,E,F    | Étalons secondaires                         | M | Silencieux de sortie                     |
| H,H',H'' | Vannes de réglage des débits fractionnaires | N | Vanne de réglage du débit général mesuré |
| I        | Vanne de réglage du débit complémentaire    | p | Prises de pression                       |
| J        | Silencieux de la prise d'air complémentaire | t | Prises de température                    |

**Fig. 5** Installation d'étalonnage de compteurs ou de débitmètres de gaz de gros calibres au moyen d'étalons secondaires.

## 2. DEBITMETRES THERMIQUES

[MERCIER 1969, COGNIAET ET MERCIER 1970, DOEBELIN 1966]

### 1. MESURE DE FAIBLES DEBITS ( $\leq 0,28$ g/s)

Soit un tube à paroi mince chauffé en un point par un élément chauffant électrique et court-circuité thermiquement par une masse conductrice comme indiqué sur la figure 6a.

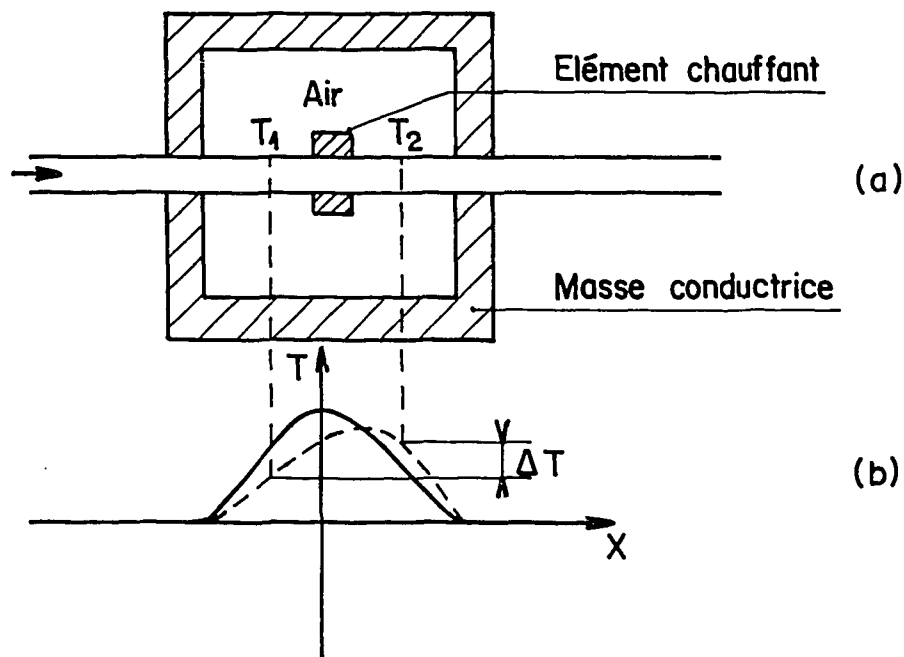


Fig. 6

Quand le fluide ne s'écoule pas la courbe de température de la paroi du tube est symétrique (courbe en trait plein sur la figure 6b). Quand le fluide circule dans la conduite la courbe se déforme. En amont de l'élément chauffant le fluide est plus froid, il est plus chaud en aval.



L'écart  $\Delta T$  entre les températures aval et amont mesurées par les thermocouples  $T_2$  et  $T_1$  est fonction du débit massique. SETARAM construit sur ce principe un débitmètre ayant deux enroulements symétriques qui servent à la fois à chauffer le fluide et à mesurer l'écart de température [MERCIER 1969].

2. MESURE DE DEBITS MOYENS (1,5 à 50 g/s)

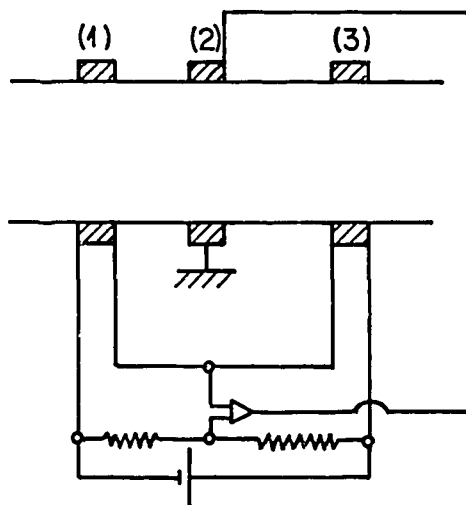


Fig. 7

Le dispositif est décrit à la figure 7. L'élément chauffant (2) transmet une certaine quantité de chaleur au fluide qui s'écoule dans la conduite. La paroi est conductrice et mince. La différence de température  $\Delta T$  entre les 2 enroulements sensibles (1) et (3) est donnée par la relation,

$$\Delta T = K \frac{W}{h}$$

$W$  : puissance fournie par l'élément chauffant

$h$  : coefficient de transfert de chaleur fonction du débit massique

Pour un gaz en écoulement turbulent et un faible écart de température, ce dernier sera uniquement fonction de la puissance fournie  $W$  et du débit massique  $M$ .

Si, comme à la figure 7, un asservissement maintient  $\Delta T$  constant,  $W$  sera une mesure directe de  $M$ . SETARAM construit sur ce principe des appareils dont la précision est de 2 à 3%.

### 3. MESURE DES FORTS DÉBITS (> 50 g/s)

Les appareils décrits ci-dessus sont limités lorsqu'on désire mesurer de forts débits. Pour éviter cette limitation, les constructeurs (BROOKS et SETARAM par exemple) proposent de prélever une fraction connue du débit total (fig.8).

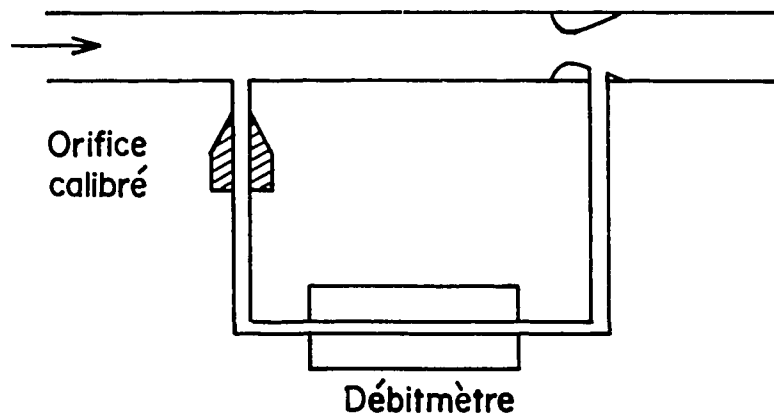


Fig. 8

### 4. CONCLUSION

Tous ces appareils mesurent des débits massiques. Il n'y a pas de pièces mobiles, il s'agit donc d'appareils robustes ; la précision est relativement bonne (elle peut dans certains cas être inférieure à 1 %.)

3. DEBITMETRES A FLOTTEUR

[OLLIVIER 1960, PAVLOVSKII 1975]

1. PRINCIPE ET MODELISATION

Les rotamètres sont des appareils qui ont été et qui sont encore très employés pour les mesures de débit ; le courant d'air à mesurer déplace un indicateur donnant une lecture directe du débit.

L'air s'écoule vers le haut à travers un tube tronconique vertical dans lequel s'élève un flotteur jusqu'à ce que le poids de ce dernier soit équilibré par la force exercée par le fluide. La section de passage du fluide est constituée par l'espace annulaire entre le tube et le flotteur. La position du flotteur dans le tube est donc une indication du débit (Fig.9).

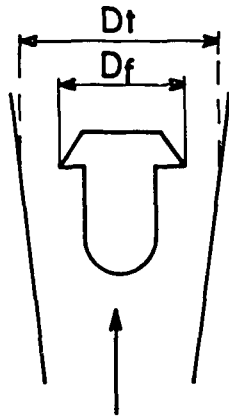


Fig. 9

Soit :  $v$  la vitesse du fluide ,  
 $\rho$  la masse volumique du fluide,  
 $P_f$  le poids du flotteur,  
 $\rho_f$  la masse volumique du flotteur,  
 $D_f$  le diamètre du flotteur,  
 $k$  coefficient de résistance qui dépend de la géométrie et du nombre de Reynolds.

La force exercée sur le flotteur par le fluide en mouvement est

$$k \frac{\pi D_f^2}{4} \cdot \frac{\rho v^2}{2}$$

Cette force équilibre le poids du flotteur :

$$k \frac{\pi D_f^2}{4} \frac{\rho v^2}{2} = P_f$$

d'où

$$v = \left[ \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{\pi D_f^2} \frac{8P_f}{\rho} \right]^{1/2}$$

Le débit volumique s'écrit :

$$q_v = v \cdot \frac{\pi}{4} [D_t^2 - D_f^2]$$

soit,

$$q_v = \left( \frac{\pi}{2k} \right)^{1/2} D_f \left[ \frac{D_t^2}{D_f^2} - 1 \right] \left( \frac{P_f}{\rho} \right)^{1/2}$$

ou pour le débit massique :

$$q_m = \left( \frac{\pi}{2k} \right)^{1/2} D_f \left[ \frac{D_t^2}{D_f^2} - 1 \right] (P_f \rho)^{1/2}$$

Dans le cas des gaz les variations de pression et de température auront une grande influence sur la valeur de  $\rho$  donc sur la mesure ; il faudra donc les mesurer avec précision. On dispose à cet effet une prise de pression à l'aval et aussi près que possible de la sortie du tube de mesure. Il faudrait, pour les très grands débits, utiliser de très gros rotamètres mais en réalité, comme pour les débitmètres thermiques, on tournera la difficulté en n'envoyant dans le rotamètre qu'une fraction connue du débit principal (cf. page 7 et Technique de l'Ingénieur Mesures et contrôle R 2260 page 4).

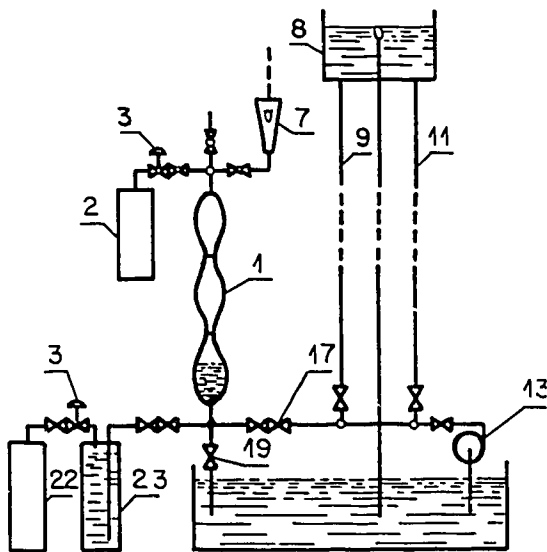
## 2. DESCRIPTION

Il existe plusieurs types de rotamètres mais le plus couramment utilisé est constitué par un tube en verre calibré conique et vertical dans lequel le flotteur peut se déplacer librement vers le haut ou vers le bas. Dans le premier rotamètre, construit en 1924, le flotteur était une bille d'acier se déplaçant dans un tube de verre, actuellement le flotteur a une forme spéciale (voir figure 9) pour qu'il reste centré dans le tube. On peut également utiliser un tube muni à l'intérieur de rainures longitudinales ou encore un flotteur muni de rainures hélicoïdales pour assurer la stabilité de l'écoulement. Le tube de verre est gradué directement en débit volumique pour des conditions de pression et de température données.

### Étalonnage

Dans la plupart des cas les constructeurs fournissent des appareils qu'ils ont étalonnés dans des conditions de pression et de température données. Des abaques ou des formules permettent de déterminer le débit dans d'autres conditions d'utilisation. La précision atteint 2 % sur toute l'étendue de mesure. Dans le cas où une meilleure précision est nécessaire, il faut alors procéder à un étalonnage sur place dans les conditions de l'expérience.

A.N. PAVLOVSKII a étudié le problème de l'étalonnage des rotamètres lorsque le gaz à mesurer n'est pas de l'air. Le circuit qu'il utilise est représenté à la figure 10.



- 1 - section de mesure formé de 3 récipients superposés
- 2 et 22 - récipient contenant le gaz ou l'air
- 3 - régulateurs de pression
- 7 - rotamètre à étalonner
- 8 - cuve à niveau constant
- 9 et 11 - tubes
- 13 - pompe
- 17 - vannes de contrôle
- 23 - récipient contenant un liquide de déplacement

**Fig. 10**

Le gaz à mesurer, contenu dans 2 pénètre dans la section de mesure par l'intermédiaire du régulateur de pression 3.

On utilise la partie gauche ou droite de l'appareil suivant que le gaz réagit ou non avec l'eau.

- Dans le cas où l'eau ne réagit pas avec le gaz on utilise la partie droite. La pompe 13 envoie l'eau dans la cuve à niveau constant. Delà, par l'intermédiaire de la vanne de contrôle 17 vers la section de mesure 1 ce qui déplace le gaz dans le rotamètre 7.

Le passage de l'eau au niveau de la marque inférieure déclenche un chronomètre qui s'arrête quand le ménisque d'eau passe au niveau de la marque supérieure.

- Dans le cas où le liquide réagit avec l'eau on utilise la partie gauche. Le liquide du récipient 23 pénètre dans la partie basse de la section de mesure sous l'action du gaz contenu dans 22.

### 3. CONCLUSION

Les rotamètres sont des appareils robustes qui peuvent très facilement être montés et démontés ce qui simplifie leur entretien et leur nettoyage, de par leur conception ils doivent obligatoirement être verticaux. Il existe un inconvénient majeur lorsqu'on désire effectuer des mesures précises ; en effet il faut faire confiance au constructeur en ce qui concerne l'étalonnage.

On peut espérer une précision de 1 % ou même mieux à condition d'effectuer l'étalonnage sur place dans les conditions expérimentales.

4. MESURES DE DEBIT BASEES SUR LA MESURE DES VITESSES LOCALES
--

[FAUQUET 1960a, FAUQUET et BONNAFOUX 1971, Norme AFNOR X 10-112 1975,  
JOHNSTON et COPE 1976, KINGHORN et Mc HUGH 1977]

Il est possible de faire des mesures de débit en partant de mesures de vitesses locales. On peut intégrer, sur la section du tube, la vitesse locale du fluide mesurée en plusieurs points de cette section. Il est alors nécessaire de mesurer simultanément, la vitesse en un grand nombre de points à l'intérieur du tube.

Les mesures de vitesses locales se font à l'aide de moulinets (voir chapitre I), de tubes de Pitot ou d'anémomètres à fil ou film chaud.

Le procédé nécessite une électronique sophistiquée et onéreuse pour pratiquer des mesures instantanées et intégrer ces différentes mesures sur la section du tube.

1. LES TUBES DE PITOT OU ANEMOMETRES A PRISES DE PRESSION

L'écoulement permanent d'un fluide parfait incompressible est régi par l'équation de BERNOULLI :

$$p + \rho gz + \rho \frac{v^2}{2} = C^{te}$$

On peut considérer qu'un gaz est incompressible si sa vitesse est inférieure à 60 m/s ce qui est en général le cas, d'autre part la viscosité de la plupart des gaz est suffisamment faible pour que l'on puisse la négliger. Si la masse volumique du gaz est faible, la quantité  $\rho gz$  est négligeable devant les deux autres termes, on peut donc simplifier l'équation de BERNOULLI :

$$p + \rho \frac{v^2}{2} = C^{te}$$



Il sera possible de calculer la vitesse en un point du courant gazeux grâce à la mesure de deux pressions :

- la pression totale (ou pression d'arrêt) :  $p + \rho \frac{v^2}{2}$
- la pression statique :  $p$

Il est facile de mesurer la pression d'arrêt ; en effet quel que soit le corps solide immergé dans un fluide, il y a toujours un point de ce corps où le fluide a une vitesse nulle. La pression en ce point est mesurée en y plaçant une prise de pression. De nombreuses études expérimentales ont confirmé que la mesure effectuée ainsi était exactement la pression totale locale (sauf à très bas nombre de Reynolds où il n'est pas possible de négliger la viscosité du fluide) et que la forme du solide immergé pouvait varier dans de grandes limites sans affecter sensiblement la mesure.

La pression statique est mesurée par des prises de pression situées sur la paroi de la sonde en aval du point d'arrêt (fig.11).

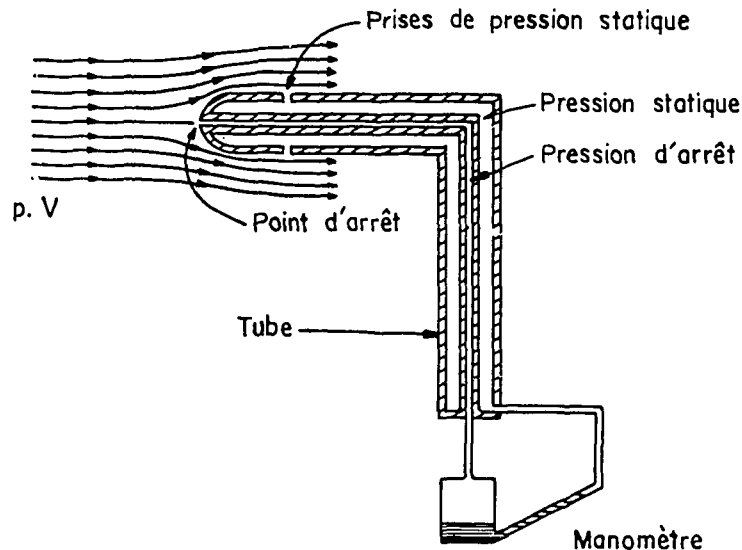


Fig. 11 Tube de Pitot

La tête de cette sonde, appelée tube de Pitot double est constituée de deux tubes coaxiaux ; le tube intérieur, face à l'écoulement, mesure la pression d'arrêt, le tube extérieur ne s'ouvre sur le courant que par de petits trous placés sur les parois du tube à 8 ou 9 diamètres de l'extrémité. On relie ces deux tubes à chacune des branches d'un manomètre ou à chacune des entrées d'un capteur de pression différentielle.

La mesure étant proportionnelle à  $v^2$  ce type de sonde est peu précise pour les faibles vitesses. On a, dans ce cas là, intérêt à utiliser des venturis ce qui permet, en diminuant la section, d'augmenter la vitesse.

L'étalonnage de ce type d'appareil est fourni par le constructeur et se fait généralement en soufflerie.

## 2. LES ANEMOMETRES A FIL OU FILM CHAUD (COMTE-BELLOT 1974)

Le principe de ces appareils a pour base l'échange de chaleur entre un élément chauffant et le fluide. Soit un fil de diamètre  $d$  maintenu à une température  $T$  supérieure à celle du fluide dans lequel il est immergé et soit  $\Delta T$  la différence de température entre le fil et le fluide.

On appelle  $H$  la perte de chaleur par unité de longueur du fil,

$k$  la conductibilité thermique du fluide,

$C_v$  sa chaleur massique à volume constant,

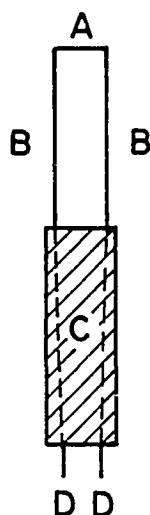
$\rho$  la masse volumique du fluide,

$v$  sa vitesse

On suppose d'autre part que le fluide se déplace perpendiculairement à l'axe du fil, dans ce cas la loi de transfert de chaleur s'écrit :

$$H = k\Delta T + (2 \pi k C_v \rho d v)^{1/2} \Delta T$$

Dans les anémomètres à fil chaud, le fil est chauffé par effet Joule ; le type le plus simple est représenté par la figure 12.



A est un fil de diamètre  $5 \mu$ , il est brasé ou soudé aux deux bouts sur une fourche rigide BB maintenue dans une base C ; les conducteurs DD entre le fil et le circuit de mesure sont brasés sur la fourche. Si le fil, de résistance R par unité de longueur, est chauffé par un courant I, la chaleur dissipée par unité de longueur sera :  $RI^2$

La loi de transfert de chaleur peut donc s'écrire :

Fig. 12

$$RI^2 = A + B\sqrt{v}$$

On pourra effectuer les mesures en maintenant le courant de chauffage constant ou en l'ajustant de façon à maintenir constante la température du fil (donc sa résistance).

Différents matériaux sont utilisés pour le fil chaud :

Platine gainé d'argent (on traite ensuite à l'acide nitrique le fil déjà brasé sur la fourche pour dénuder la partie active) ou tungstène lorsqu'on a besoin de fil plus fin.

La température d'utilisation est de  $900^\circ\text{C}$  pour le platine et de  $250^\circ\text{C}$  pour le tungstène (le tungstène s'oxyde au-dessus de  $250^\circ\text{C}$ ). La longueur du fil doit être grande par rapport à son diamètre.

Il est nécessaire, pour minimiser les effets de conduction aux deux extrémités du fil, d'avoir un rapport  $L/D \gg 200$ .

Les anémomètres les plus couramment utilisés sont à température constante les appareils à intensité constante ne sont utilisés que pour les faibles vitesses de l'ordre de  $0,5 \text{ cm/s}$ .

### 3. ETALONNAGE

Il se fait sur bras tournant à l'intérieur d'un tunnel circulaire où se trouve de l'air au repos ; le tunnel est entièrement fermé pour éviter tout courant d'air parasite. On calcule la vitesse de la sonde dans l'air à partir de la vitesse du bras tournant ; en réalité ces deux vitesses sont légèrement différentes car la rotation du bras induit des tourbillons dans le tunnel.

Il est nécessaire de refaire très souvent l'étalonnage des sondes à fil chaud. En effet leur réponse est très sensible aux poussières et autres contaminations de surface. Il faut également les nettoyer très souvent.

Pour remédier à cet inconvénient, on utilise des anémomètres à fil chaud gainé pour lesquels il n'est pas utile de vérifier trop souvent l'étalonnage et dont la résistance mécanique est meilleure.

En plus du tube de Pitot et de l'anémomètre à fil chaud, il est possible d'utiliser des micromoulinets mais, de toute façon, ces trois appareils fournissent des indications de vitesse en un point de la conduite on est alors amené, pour mesurer le débit dans une section, à effectuer une exploration du champ de vitesse dans cette section puis à intégrer

$$q = \iint_{\text{section}} v dS$$

Pour une section circulaire, cas le plus fréquent :

$$q = \int_0^R \left[ \int_0^{2\pi} v r d\theta \right] dr$$

Le calcul pourra se faire par différentes méthodes : planimétrie, intégration numérique ou calculs arithmétiques. Quelle que soit la méthode adoptée, la précision dépendra du choix de la section de mesure et des méthodes d'exploration. Un certain nombre de normes françaises ou internationales donnent des règles à ce sujet [ISO R 748, NF X 10-112, KINGHORN et Mc HUGH 1977, ISO 3966 ]

Le premier problème à résoudre est celui du nombre de points de mesure dans la section, bien évidemment ce nombre dépendra de la régularité de répartition de ces vitesses.

Dans une conduite circulaire, dans la mesure où on choisit une section éloignée de toute singularité, il suffit d'explorer deux diamètres perpendiculaires, le nombre de points de mesure étant plus grand au voisinage des parois et aux endroits où la vitesse varie beaucoup.

A partir de ce profil de vitesse on calcule le débit par l'une des trois méthodes indiquées ci-dessus.

### 3.1 - Planimétrage

En conduite circulaire, ce qui est le cas le plus fréquent, on a :

$$q = \int_0^R \left[ \int_0^{2\pi} v_r d\theta \right] dr = 2\pi \int_0^R \bar{v}_r dr = \pi \int_0^{R^2} \bar{v} d(r^2)$$

où  $\bar{v}$  est la vitesse moyenne le long d'une circonférence. Le problème est donc de calculer  $\bar{v}$ , le planimétrage se faisant soit sur la courbe  $\bar{v} = f(r^2)$  soit sur la courbe  $\bar{v}r = f(r)$ . Dans la plupart des cas il suffit de prendre  $\bar{v}$  égal à la moyenne arithmétique des vitesses mesurées aux différents points de la circonférence de mesure.

### 3.2 - Méthodes arithmétiques

Elles nécessitent des positions très précises des points de mesures. Citons pour mémoire la méthode des centroïdes d'aires égales, celle de TCHEBYCHEV, celle de GAUSS et la méthode log-linéaire [ FAUQUET et BONNAFOUX 1971 ].

### 3.3 - Méthodes numériques

Une recommandation ISO en préparation doit donner une méthode de dépouillement par calcul numérique.

#### 4. PRÉCISION

Dans ce cas la précision va dépendre de trois facteurs :

- précision sur les dimensions de la conduite
- précision sur la mesure de vitesse locale
- précision du calcul

On peut espérer, à condition de prendre beaucoup de précautions, arriver à une précision inférieure à 1% pour les deux premiers points. Les erreurs de calcul quant à elles ne pourront guère être inférieures à 1% dans le cas d'une intégration graphique ou numérique et l'expérience a montré que les méthodes arithmétiques étaient nettement moins précises.

En conclusion on peut dire que les mesures de débit directes sont toujours supérieures aux calculs effectués à partir des mesures de vitesse locale. Il ne faudra employer ce dernier type de méthode que lorsque les autres seront impossibles à mettre en oeuvre - par exemple dans le cas d'un grand diamètre de conduite.

## 5. ORGANES DEPRIMOGENES

[ARNBERG 1962, BENEDICT et al. 1973, BENEDICT et SCHULTE 1973a, BENEDICT et al. 1975, CROCKETT et LUPP 1973, DEMARLES 1960, HALMI 1973, HEAD 1977, HILLBRATH 1974, LIEBAUT 1960, WYLER et BENEDICT 1975, Norme NF X 10-102 1970, Recommandation ISO/R 541 1967, Recommandation ISO/R 781, 1968 ]

Les tubes de Pitot, comme nous l'avons vu au chapitre précédent, ont été beaucoup employés pour les mesures dans les gaz. Ils possèdent cependant un certain nombre d'inconvénients : ils ne sont pas bien adaptés à la détermination rapide d'un grand nombre de points de mesure, les pressions observées étant souvent petites ils doivent être couplés à des manomètres sensibles ; enfin il faut, pour obtenir un débit, faire une série de calculs.

Pour toutes ces raisons on a cherché des méthodes de mesure dans lesquelles les pressions différentielles à mesurer étaient plus élevées et par lesquelles on obtenait directement le débit dans la conduite. Ces méthodes sont moins précises qu'un tube de Pitot couplé à un manomètre sensible mais elles sont plus pratiques et plus rapides. Il est d'ailleurs toujours possible lorsqu'on désire une grande précision d'étalonner les organes déprimogènes avec un tube de Pitot in situ et dans les conditions de l'expérience.

### 1. PRINCIPE ET MODELISATION

La méthode consiste à insérer dans la conduite un appareil (diaphragme, tuyère ou venturi) qui a pour but de réduire la section de passage du gaz et de produire ainsi une augmentation de la vitesse locale. On montre qu'il y a une perte de pression importante entre la section de la conduite et la section réduite (où la vitesse est maximale). Cette perte de pression permet de mesurer la vitesse du gaz dans la conduite ainsi que son débit volumique.

Soit une conduite munie d'un diaphragme (fig.13)

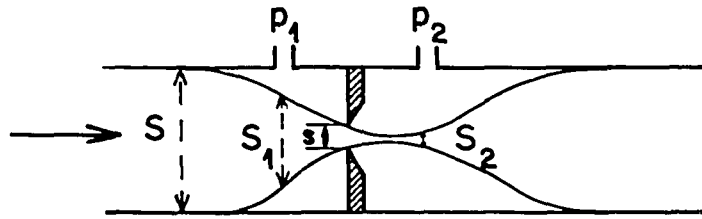


Fig. 13

On suppose l'écoulement horizontal et incompressible, soient  $p_1$  et  $v_1$  la pression et la vitesse dans la section  $S_1$ ,  $p_2$  et  $v_2$  la pression et la vitesse dans la section  $S_2$ .

L'équation de BERNOULLI s'écrit,

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

L'équation de continuité s'écrit :

$$v_1 S_1 = v_2 S_2 \hat{=} q \text{ (débit volumique)}$$

On en déduit,

$$\begin{aligned} p_1 - p_2 \hat{=} \Delta p &= \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) \\ &= \frac{1}{2} \rho q^2 \left[ \frac{1}{S_2^2} - \frac{1}{S_1^2} \right] \end{aligned}$$

d'où,

$$q = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \frac{S_2}{\sqrt{1 - \frac{S_2^2}{S_1^2}}}$$



En réalité on ne connaît ni  $S_1$  ni  $S_2$  mais  $S$  et  $s$ . On pose donc

$$q = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \cdot \frac{C_D s}{\sqrt{1 - \frac{s^2}{S^2}}}$$

avec par définition

$$C_D \triangleq \frac{\frac{S_2 / (1 - \frac{S_2^2}{S_1^2})^{1/2}}{S_1}}{s / (1 - \frac{s^2}{S^2})^{1/2}}$$

$$C_D \triangleq \frac{\frac{S_2 / (1 - \frac{S_2^2}{S_1^2})^{1/2}}{S_1}}{s / \sqrt{1 - \beta^4}}$$

où  $\beta \triangleq \frac{d}{D}$

$C_D$  s'appelle le coefficient de décharge et varie en fonction du nombre de Reynolds au col comme indiqué sur la figure 14.

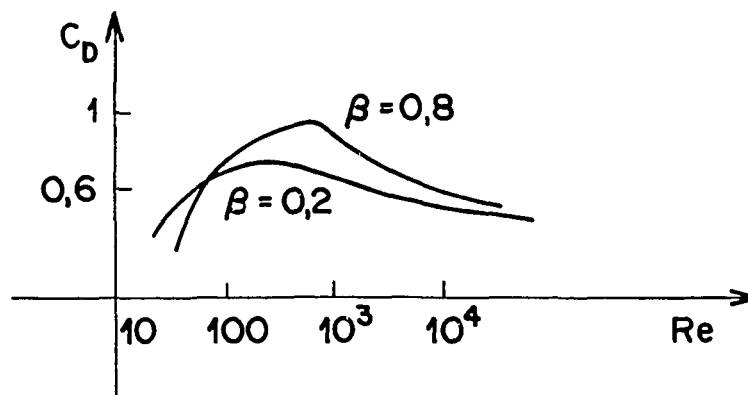


Fig. 14

Au lieu de considérer un nombre de Reynolds au col basé sur la vitesse, ce qui nécessiterait un calcul par itération, il est préférable d'utiliser un nombre de Reynolds basé sur le  $\Delta p$  comme l'on fait VERNIER en 1963 et plus tard WARD SMITH en 1976. Ce nombre de Reynolds est défini par la relation suivante :

$$Re_{\Delta p} \triangleq \frac{d\sqrt{2\rho\Delta p}}{\mu}$$

Ce nombre de Reynolds est relié au nombre de Reynolds classique  $Re$  basé sur la vitesse par la relation

$$Re_{\Delta p} = \frac{Re}{\alpha}$$

ou  $\alpha$  est le coefficient de débit défini comme suit :

$$\alpha \triangleq \frac{C_D}{\sqrt{1-\beta^4}}$$

$$q = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \frac{C_D S}{\sqrt{1-\beta^4}} = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \alpha s.$$

Les normes donnent pour chaque débitmètre les valeurs de  $C_D$  et de  $\alpha$ . On peut en fait tenir compte de la compressibilité du gaz ce qui ajoutera un terme supplémentaire à l'équation donnant le débit ; on peut également avoir un écoulement vertical le terme supplémentaire étant  $\rho gz$  dans l'équation de BERNOULLI.

En pratique, il y a trois types d'étranglements : les diaphragmes, les tuyères et les venturis. Lorsqu'ils sont calculés correctement la différence de pression  $p_2 - p_1$  pourra être facilement mesurée avec un manomètre classique. Cette différence de pression dépend du rapport des surfaces  $\frac{S}{S_1}$  ; quand ce rapport diminue la perte de pression augmente, en pratique on ne pourra pas diminuer indéfiniment la section de passage de l'étranglement.

## 2. DESCRIPTION

### 2.1 - Les diaphragmes

Ce sont des orifices à arêtes vives en plaque mince. Il existe plusieurs types de diaphragmes suivant la position des prises de pression (Fig.15).

### 2.2 - Les tuyères

Dans ce type d'orifice l'air est guidé jusqu'à la section de l'écoulement minimale qui coïncide avec la surface minimale de l'étranglement. A partir de là l'écoulement d'air sort en jet parallèle et ne se contracte plus. La prise de pression amont est à une distance de  $1D$  de la face d'entrée de la tuyère en amont des zones de recirculation (les prises de pression de la tuyère ISA 1932 doivent être dans les angles). A l'aval on prévoit au col une partie cylindrique de  $0,6 d$  pour les tuyères à long rayon et de  $0,3 d$  pour les tuyères ISA 1932 pour permettre le montage de la prise de pression ; celle-ci peut se placer sur la conduite ou sur la paroi de la tuyère mais, dans ce dernier cas, le montage et l'étanchéité pose de tels problèmes que l'on choisit autant que possible la première solution (Fig.16).

En France, deux types de tuyères ont été normalisés : les tuyères ISA et les tuyères à long rayon [Norme NF.X-10-102, 1970]

### 2.3 - Les venturis

Dans un diaphragme ou un venturi, les pertes non récupérables les plus importantes sont dues à l'augmentation soudaine de la section une fois que le gaz a dépassé la section minimale, la rapide convergence du courant en amont cause une perte beaucoup plus faible. Les pertes en aval de l'orifice sont dues à des tourbillons qui se créent entre les bords du jet gazeux et le bord de la conduite. Pour pallier cet inconvénient on guide le courant par un divergent. En combinant ce divergent avec le convergent amont on obtient un venturi (Fig.17).

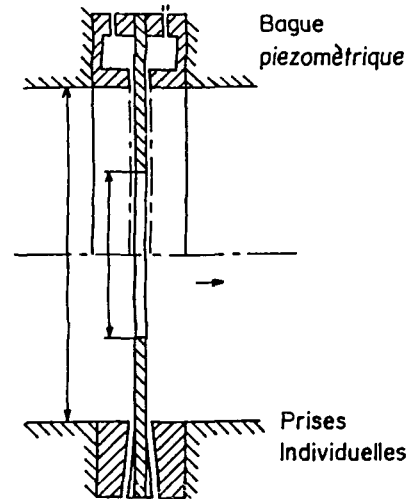
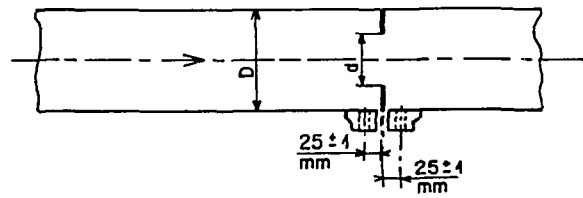
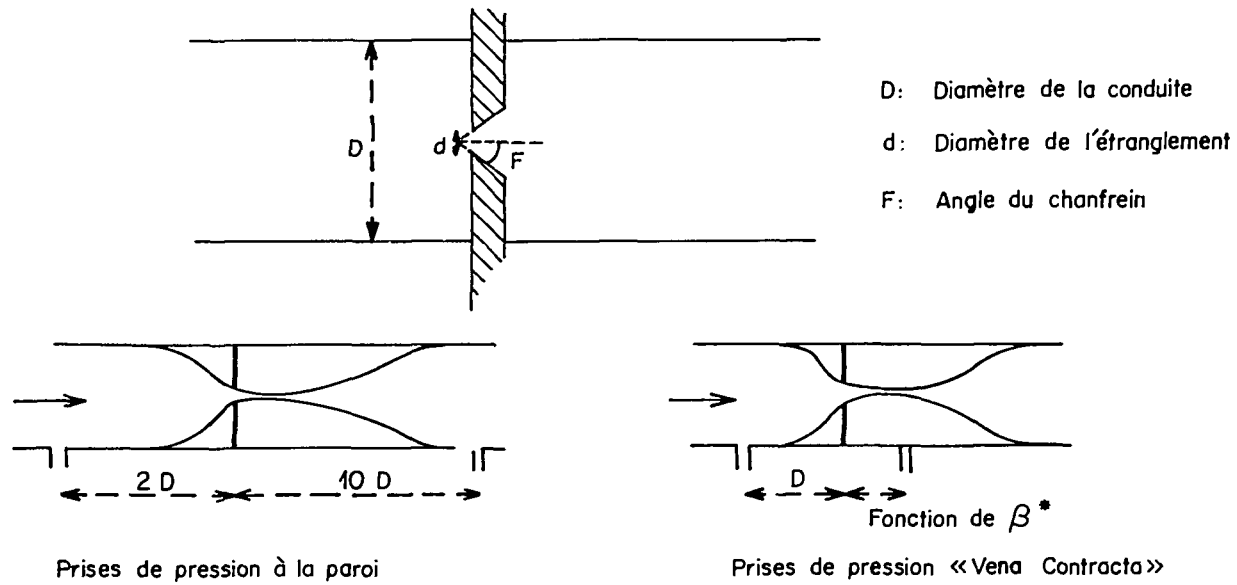


Fig. 15

Prises de pression dans les angles

\* Voir norme AFNOR NFX 40-402 page 25

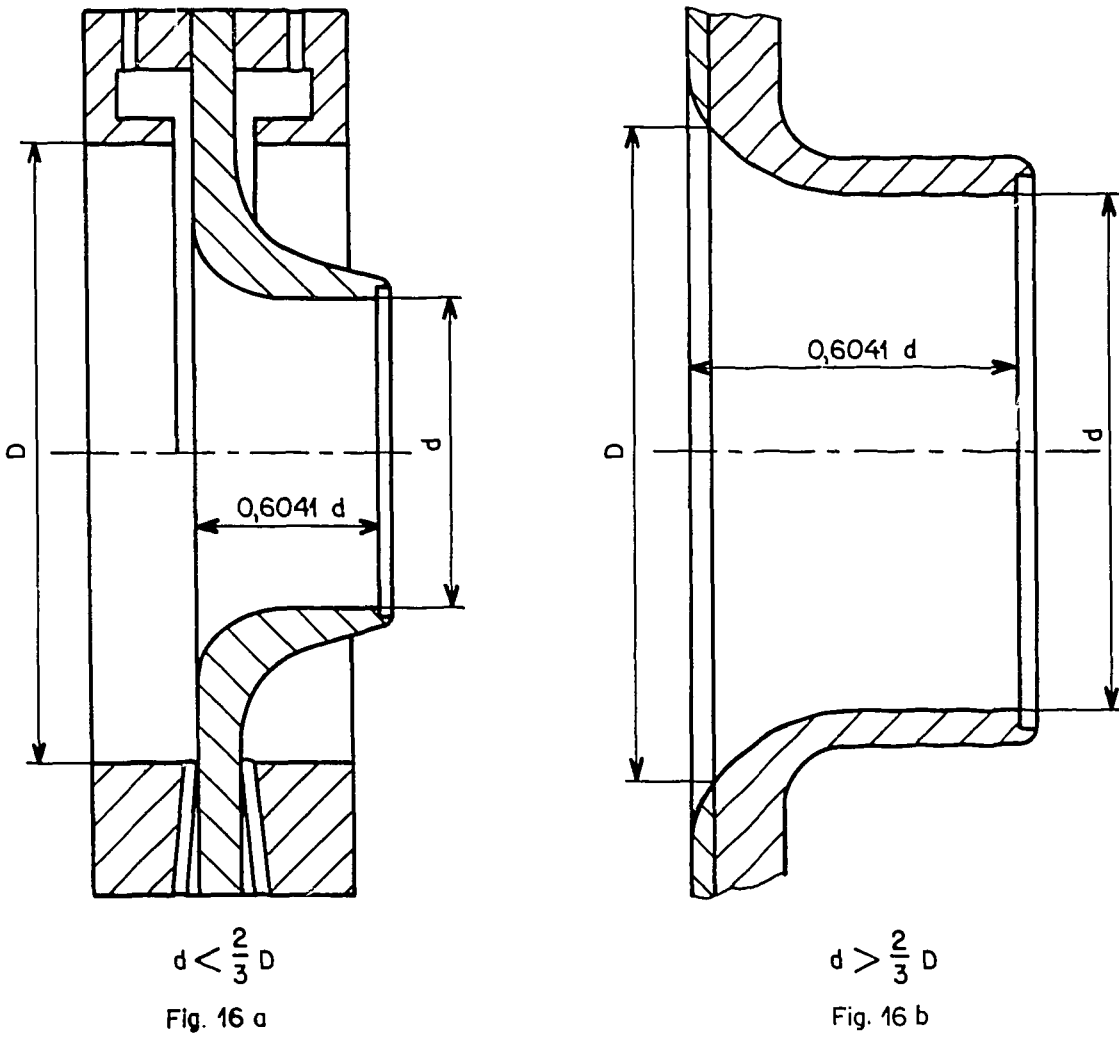


Fig. 16 Tuyère ISA 1932

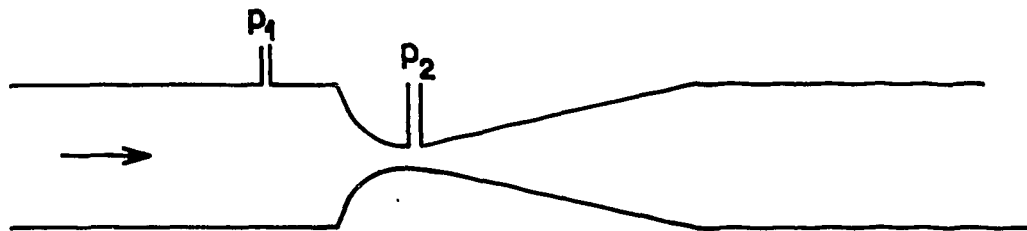


Fig. 17

### 3. LE COEFFICIENT DE DECHARGE $C_D$

La caractéristique principale des tuyères et venturis est le fait que le fluide s'écoule dans un dispositif conçu pour ne pas perturber l'écoulement du moins jusqu'au col. Dans ce cas là la position de la section minimale de l'appareil coïncide avec celle de l'écoulement. Par rapport aux hypothèses de calcul, les seules conditions non respectées concernent l'uniformité de la vitesse en amont ainsi que l'absence de frottement et de turbulence. Les coefficients de décharge des tuyères et des venturis sont proches de l'unité (DUDZINSKI et al. 1968). Les conditions sont différentes pour les diaphragmes ; en effet, l'écoulement qui sort de l'orifice n'est pas un jet parallèle, il continue à se contracter en aval du plan du diaphragme jusqu'à une distance variant en fonction de  $\beta$  de l'ordre du dixième au diamètre de la conduite ; la section de surface minimale appelée vena contracta est de 0,6 à 0,7 fois la section totale. A partir de là le jet diverge et récolle aux parois à quelques diamètres de conduite en aval. Quand on connaît la pression différentielle et les conditions d'emploi du diaphragme on peut en déduire le débit à condition que ce diaphragme soit géométriquement semblable à l'un de ceux pour lequel un tarage direct a été effectué (voir à ce sujet les normes ISO ou AFNOR qui donnent les dimensions géométriques de tels étranglements). Ces normes donnent pour les différents types d'étranglements et sous forme de tableaux le coefficient de décharge nécessaire au calcul du débit.

Les coefficients ont fait l'objet de très nombreuses mesures, en particulier pour les diaphragmes, et permettent de faire correspondre à chaque valeur de la pression différentielle une valeur du débit.

### 4. ETALONNAGE ET PRECISION DES MESURES

Le débit réel étant égal au débit théorique multiplié par le coefficient de décharge, c'est au comportement et à la tolérance de ce coefficient que l'on doit prêter attention quand on analyse les performances des débitmètres à ajutages. Le diaphragme, à cause de sa facilité de construction, a fait l'objet de nombreuses études ; ses coefficients sont bien connus et plus précis que ceux des tuyères et des venturis.

Pratiquement les débitmètres à ajutages sont construits à la demande. Les normes existantes donnent, en fonction du type d'écoulement, des conditions expérimentales et de la géométrie du circuit, le meilleur type de débitmètre à employer ainsi que ses dimensions et la valeur des coefficients [HALMI 1973, NF X 10-102, ISO R 541 ]

Ces coefficients ont été déterminés expérimentalement par divers organismes de normalisation qui ont effectués des étalonnages par différentes méthodes : pesée, gazomètre ou même tubes de Pitot dans la mesure où la section de la conduite est assez grande.

On remarque que les chiffres donnés par différents organismes diffèrent entre eux de façon sensible. D'autre part, on ne peut théoriquement utiliser ces valeurs que si le tube est lisse, et le courant turbulent en amont du débitmètre. Il existe des facteurs de corrections permettant de modifier les valeurs de base mais malgré cela des erreurs importantes parfois supérieures à 3% peuvent se produire.

Des essais ont été effectués à N.E.L. (National Engineering Laboratory, Grande-Bretagne) avec un circuit d'eau, des diaphragmes spécialement fabriqués et des conditions expérimentales se rapprochant le plus possible des conditions idéales. Ils ont permis de montrer que les débits calculés en utilisant les coefficients fournis par les normes anglaises étaient identiques à 0,25 % près à ceux que l'on obtenait directement par pesée. On peut donc admettre, dans la mesure où l'on suit soigneusement les normes, qu'il n'est pas utile d'étalonner les débitmètres.

Les points les plus importants à observer sont ceux qui concernent la position des prises de pression, la rugosité de la conduite (sensible surtout pour les tubes de petit diamètre, la longueur des sections de tranquillisation en amont et en aval du débitmètre et pour les diaphragmes, le tranchant de l'arête [BENEDICT 1975, CROCKETT 1973 ].

Il n'est pas toujours possible de suivre exactement les normes, dans ce cas il sera nécessaire d'effectuer un étalonnage sur place dans les conditions de l'expérience. Le plus simple est alors d'explorer une section de la conduite avec un tube de Pitot ce qui permet d'espérer une précision supérieure à 1%.

5. LES TUYÈRES ET VENTURIS SONIQUES [ARNBERG 1962, SMITH et MATZ 1962, GODT 1974, HILLBRATH 1974, MASURE, SOLIGNAC et LAVAL 1974, JOHNSON 1974]

Les tuyères et venturis soniques sont des appareils dans lesquels le courant gazeux est accéléré jusqu'à ce qu'il ait atteint la vitesse du son. Ils permettent de mesurer directement des débits massiques.

LAVAL (1845-1913) a effectué des recherches sur les tuyères soniques, non pas pour mesurer des débits mais pour produire des jets de vapeur à grande vitesse. Il s'est aperçu qu'il pouvait obtenir de bons résultats avec une tuyère à convergent arrondi suivi d'un divergent conique de demi angle au sommet compris entre 8 et 12°. Cette forme de tuyère qui porte son nom s'est révélée si efficace qu'elle a été fort peu modifiée jusqu'à ce jour.

Par la suite, et pendant de nombreuses années, on s'est peu intéressé aux méthodes utilisant les écoulements soniques mais le problème s'est de nouveau posé avec l'avènement des missiles et l'utilisation des fluides cryogéniques. Il fallait mesurer des débits massiques sans avoir à passer par les débits volumiques et la densité. Les recherches ont donc repris sur ce sujet.

Les études théoriques ont été effectuées par ARNBERG pour les tuyères et par SMITH et MATZ pour les venturis. En effet, dans la mesure où l'appareillage était plus sophistiqué et la précision nécessaire plus grande, les valeurs des coefficients fournies jusque là par l'expérience ne suffisait plus car il y a souvent beaucoup de différence entre les conditions dans lesquelles un débitmètre est utilisé et celles dans lesquelles il a été étalonné. Ces études théoriques ont servi de base à toutes les études ultérieures.

Que ce soit pour les tuyères ou pour les venturis les conclusions auxquelles les auteurs sont arrivés sont les mêmes :

- indépendance de l'écoulement vis à vis des conditions aval tant que les conditions critiques sont maintenues.
- le débit peut être considéré comme une fonction linéaire de la pression amont (pour les débitmètres subsoniques il est fonction de la racine carrée de la pression différentielle).



- les erreurs de mesure sont beaucoup plus faibles que pour les organes déprimogènes subsoniques.

- l'appareil est peu sensible aux perturbations du courant

Il n'est donc pas utile de mesurer la pression différentielle, d'autre part, le domaine de mesure couvert est plus grand que dans les débitmètres subsoniques. Il existe cependant une limitation, un rapport de pression minimal est nécessaire pour établir et maintenir l'écoulement critique, pour l'air ce rapport peut varier de 1,2 à 1,9.

Les auteurs (ARNBERG 1962, ASME 1971, JOHNSON 1974) donnent deux formules différentes suivant que l'on considère la pression statique amont (prise de pression à la paroi) ou la pression totale amont (prise dans l'écoulement à l'aide d'un tube de Pitot simple par exemple) dans le cas des tuyères.

On pose M : débit massique

p : pression amont (statique ou totale)

r : rapport entre les pressions statiques amont et au col  
est donné par la formule :

$$r^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} + \left(\frac{\gamma-1}{2}\right) \beta^4 r^{\frac{2}{\gamma}} = \frac{\gamma+1}{2} \quad [\text{ASME 1971 page 68}]$$

$$\gamma \triangleq C_p/C_v$$

$$\beta = \frac{d}{D} \quad (\text{rapport du diamètre du col au diamètre de la conduite})$$

A = aire de la section du col

R = constante des gaz parfaits

Z = facteur de compressibilité du gaz qui tient compte du fait que le gaz n'est pas parfait ( $p = \rho ZRT$ )

$\rho$  = masse volumique

T = température absolue

Considérons la pression statique :

$$M = pA \left[ \frac{2 r^{2/\gamma} \left( \frac{\gamma}{\gamma-1} \right) \left( 1 - r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right)}{ZRT (1-\beta^4) r^{2/\gamma}} \right]^{1/2}$$

Considérons la pression de stagnation (ou pression totale)

$$M = \frac{pA}{\sqrt{T}} \cdot \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)\sqrt{\gamma}}} \sqrt{\frac{\gamma}{ZR}}$$

Pour minimiser les perturbations amont il est préférable de considérer la pression statique.

### 5.1 - Comparaison entre tuyère et venturi

Les tuyères sont bien adaptées pour accélérer un courant gazeux jusqu'à de grandes vitesses d'où leur utilisation pour la propulsion alors que les venturis ont plutôt tendance à minimiser les pertes de pression et sont de ce fait plus utilisés pour les mesures de débit à condition qu'il s'agisse de gros débits (supérieur à 50 g/s) à pression supérieure à 1,4 bar et dans des tubes de petits diamètres.

Des études expérimentales ont été faites concernant les différentes formes de tuyères ; dans le cas de tuyères coniques (entrée arrondie, col cylindrique court,  $\beta = 0,25$ ) le coefficient de décharge  $C_D$  est constant et égal à 0,963.

Dans le cas de tuyères à rayon de courbure constant entre l'entrée et le col (diamètre du col 2 cm et  $\beta = 0,24$ )  $C_D$  est constant et égal à 0,964 pour des rapports de contre pression de 0,290 à 0,455.

D'après BACHMANN la forme la meilleure correspond à une tuyère du type "Bell mouth" (convergent de forme sinusoïdale dont la longueur totale de la tuyère est égale au diamètre du col)  $C_D$  dans ce cas est constant et égal à 0,98.

## 5.2 - Etalonnage

La précision des coefficients calculés théoriquement est suffisante dans la plupart des cas mais, pour plus de précision et pour tenir compte des conditions expérimentales réelles il est nécessaire d'effectuer un étalonnage périodique direct par exemple par gazomètre. On peut également, lorsqu'une méthode directe est trop compliquée ou trop onéreuse, effectuer un étalonnage secondaire avec une tuyère ou un venturi standard ou encore avec un tube de Pitot.

## 5.3 - Conclusion

Les tuyères et venturis soniques, bien que non décrits dans les normes existantes, présentent de nombreux avantages comme nous l'avons dit ci-dessus. Dans le cas de gros débits (supérieurs à 50 g/s) le venturi étudié par SMITH et MATZ est intéressant (convergent en forme d'arc circulaire et diffuseur conique) ; par rapport à une tuyère il a un coefficient de décharge facilement prévisible et la perte de charge nécessaire pour atteindre et maintenir les conditions critiques est plus faible.

Pour les débits inférieurs à 50 g/s les tuyères soniques avec convergent en forme d'arc de sinusöide ont un coefficient de décharge constant et proche de 1.

Les venturis aussi bien que les tuyères soniques ont néanmoins un inconvénient, ils n'ont pas été normalisés mais il existe un certain nombre d'articles qui permettent de calculer correctement ce type de débitmètre. De toute façon il est préférable de les étalonner avant utilisation.

Des tuyères soniques ont récemment été calculées et construites au S.T.T. pour la boucle Moby Dick en utilisant les résultats de GODT (1974). Les débits mesurés à l'aide de ces tuyères différent de 2 % au maximum de ceux mesurés à l'aide d'un rotamètre de précision pour des pressions comprises entre 1,7 et 8,5 bar et des débits de 0,4 à 1,7 g/s.

## 6. MESURES PAR TRACEURS

Ce type de méthode a été développé pour les transports de gaz naturel depuis la fin de la deuxième guerre mondiale. En effet, dans ce cas là il n'est pas toujours possible de placer dans les tuyauteries des organes déprimogènes.

Les débitmètres basés sur les méthodes par traceurs servent également à vérifier l'étalonnage des diaphragmes. Un article récent (UHL 1974) décrit des essais effectués avec trois traceurs différents dans un canal transportant du gaz naturel. Une norme vient également de paraître concernant ces méthodes (Norme ISO 4053/I).

### 1. PRINCIPE

Pour déterminer le débit du fluide il faut connaître la relation qui existe entre celui-ci et le débit du traceur. Cette relation doit être le plus simple possible et les facteurs qui y interviennent doivent découler de mesures faciles à mettre en oeuvre.

En général on trouve une relation entre la vitesse du traceur et le profil de vitesse du gaz s'écoulant dans la conduite mais il faut également tenir compte de la section du tube et de la densité du gaz. Suivant la précision désirée on peut soit supposer que le profil de vitesse est plat, soit tenir compte des variations de vitesse à l'intérieur d'une même section. Il faut également tenir compte des effets du mélange entre traceur et gaz.

Les premiers essais ont été effectués en 1950. Le traceur était du gaz ammoniac, le détecteur du méthyl rouge ou de la phénolphtaleïne (sensible au pH). En 1957-58 autres séries d'essais avec de l'argon 41 radioactif et un scintillomètre, les résultats étaient très précis mais les applications limitées par la durée de vie de l'argon 41.

En 1961 de nouveaux essais ont été effectués avec de l'ammoniac 31 et un détecteur à particules ionisées puis, peu de temps après avec de l'oxyde nitreux et un détecteur infra rouge, ce dernier système a été commercialisé par la Columbia Gas System.

On injecte une certaine quantité de matériau détectable dans le tuyau et on mesure le temps mis par ce matériau pour se déplacer entre deux points ; on calcule alors le débit volumétrique à partir de la distance parcourue, du temps, de la section intérieure du tube, de la pression et de la température moyenne du gaz.

Le choix de la distance optimale est délicat ; elle doit être suffisamment grande pour permettre une mesure de temps précise et suffisamment courte pour éviter la dispersion du traceur dans le gaz.

Des études faites par E.A. TAYLOR en 1923 et par G.I. TAYLOR en 1953 sur le problème de la dispersion ont montré que ce phénomène obéissait aux mêmes lois que la diffusion moléculaire et que le point de concentration maximale du traceur se déplaçait à la même vitesse moyenne que le fluide porteur.

Par la suite de nombreux auteurs ont étudié ce problème, leurs conclusions concordent sur le fait que pour obtenir une bonne précision le traceur devait :

- être injecté de façon ponctuelle
- ne pas réagir avec les parois du tube
- avoir une viscosité et une densité proches de celles du gaz porteur
- être facilement détectable, même à faible concentration
- avoir une forte pression de vapeur à température ambiante

Toutes ces études ont permis de mettre au point des débitmètres à traceur fonctionnant en écoulement turbulent avec des fluides compressibles.

## 2. TRACEURS ET DETECTEURS UTILISES

### 2.1 - Gaz ammoniac

Ce fut le premier traceur utilisé. Il est peu cher, facilement disponible et détectable. Il a été utilisé dans des canalisations transportant du gaz naturel. On injecte plusieurs litres d'ammoniac en un point de la conduite et 15 km plus loin on fait passer une petite quantité du fluide transporté à travers une solution sensible au pH. Cette méthode, très simple, manque de précision.

## 2.2 - Argon 41 radioactif et détecteur à scintillation

L'argon présente plusieurs propriétés intéressantes, c'est un gaz inerte dont la densité est proche de celle du gaz naturel. Seule une très petite quantité est nécessaire ce qui permet une injection quasi ponctuelle. En outre, il est insoluble et a une forte pression de vapeur.

La durée de vie de l'argon 41 est de 109 minutes, temps suffisamment long pour faire des mesures et suffisamment court pour éviter les dangers radioactifs. Il est détecté de l'extérieur à travers les parois du tube.

Etant donné qu'il s'agit d'un produit radioactif le transport et les manipulations sont assez délicates. I.G.T. (Institute of Gas Technology) a développé une technique d'injection utilisant une capsule de quartz dans laquelle se trouve l'argon et deux scintillateurs, un au point d'injection et le second au point de détection.

Des essais comparatifs ont été faits entre l'ammoniac et l'argon 41 d'une part et des diaphragmes d'autre part. L'écart entre les mesures était de 1,3 % pour l'ammoniac et de 1,1 % pour l'argon 41.

## 2.3 - Ammoniac et compteur de particules

Il s'agit d'une amélioration de la première méthode. Au point de détection on prélève une partie du gaz mélangé au traceur ( $\text{NH}_3$ ). On fait réagir ce mélange avec  $\text{HCl}$  ce qui donne des particules de chlorure d'ammonium ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) puis on fait passer ce mélange dans une chambre d'ionisation dont l'indication est fonction de la concentration en particules de  $\text{NH}_4\text{Cl}$  donc de la concentration molaire de  $\text{NH}_3$  dans le gaz prélevé. La quantité de  $\text{NH}_3$  nécessaire est très faible.

## 2.4 - Oxyde nitreux, analyseur infra rouge

L'oxyde nitreux est un gaz généralement inerte et non toxique. Ses propriétés sont peu différentes de celles du  $\text{CO}_2$ . Il n'existe pas dans la nature ce qui élimine les fausses détections.

La Columbia Gas System avec un détecteur infra rouge MSA LIRA et la Transcontinental Gas Pipe Line Co ont utilisé cette technique connue sous le nom de système Daniels : l'oxyde nitreux est détecté quand il passe devant deux détecteurs distants de 150 m, le temps est mesuré par une horloge électronique ; la précision du système est limitée par la précision sur la mesure de l'aire de la section droite de la conduite. Il est possible d'obtenir 0,5 % ou même mieux. Ce système a l'avantage de pouvoir être entièrement automatisé.

### 2.5 - Détection par ultrasons [UHL 1974]

Ce système part du principe que la vitesse du son dans un gaz varie avec la densité de ce gaz, or la présence d'un gaz traceur modifie la densité.

Chaque détecteur est une combinaison transmetteur-récepteur suffisamment petit pour être placé à l'intérieur de la conduite. La distance entre les deux points de détection est de l'ordre de 15 m.

La précision sur la mesure du débit sera limitée par la précision sur les dimensions de la section d'essais.

### 3. CALCUL DU DEBIT

En régime établi on calculera le débit volumique connaissant le temps mis par le traceur entre les points d'injection et de détection, la distance entre ces points, la section du tube, les pressions et températures moyennes.

Il y aura deux sortes d'erreurs :

- (1) - les erreurs provenant des instruments de mesure, leur conception aussi bien que leur utilisation ; ces erreurs pourront être minimisées par un choix rigoureux d'appareils.
- (2) - les erreurs provenant de la dilution du traceur dans le gaz porteur.

On pourra finalement atteindre pour les fluides compressibles une précision supérieure à la précision obtenue avec les débitmètres à ajustage mais il faut noter que les mesures faites jusqu'à présent avec ce type d'appareil concernent des canalisations de transport de gaz naturel donc des longueurs de conduites allant de dix à plusieurs centaines de mètres ; il ne semble pourtant pas exclu de les extrapoler à des mesures de laboratoire.



7. DEBITMETRES A DEVIATION D'IONS

L'appareil est basé sur la déviation d'ions par l'écoulement gazeux dont on veut mesurer le débit [KURZ et OLIN 1974]

Les ions sont produits, transversalement par rapport au courant gazeux, par une décharge à faible intensité au bord d'un disque se trouvant au centre de l'appareil, ils sont attirés par une électrode montée sur la paroi du tube.

L'écoulement du gaz à travers le capteur provoque un déplacement du courant d'ions et ce déplacement est directement proportionnel à la masse totale du gaz traversant le capteur.

Le signal de sortie fournit soit la vitesse, soit le débit ; cette indication est linéaire et indépendante de la pression, de la température et du sens du courant gazeux. L'appareil est très sensible et donc bien adapté aux mesures des faibles vitesses.

1. DESCRIPTION (Fig.18)

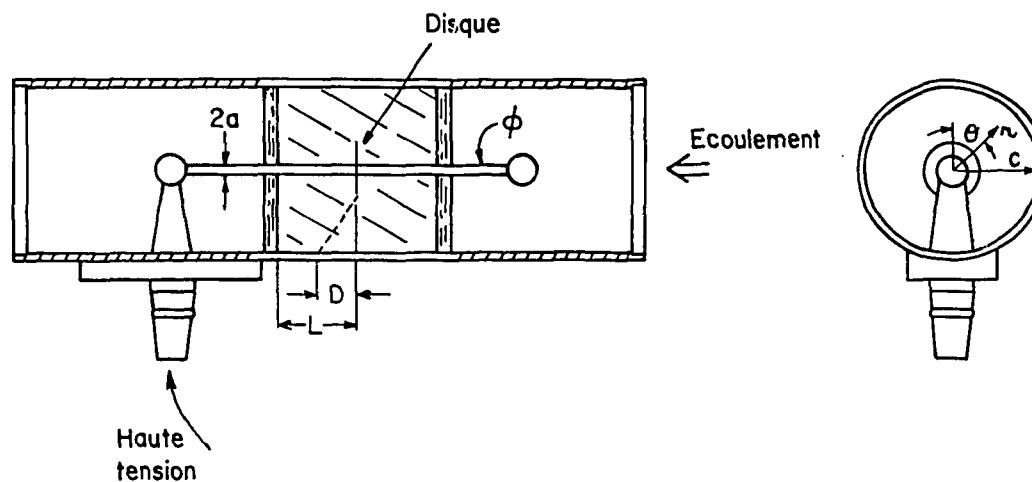


Fig. 18

Ce type d'appareil, développé par Thermo Systems Inc. s'appuie sur des recherches effectuées à Princeton University par E.J.DURBIN.

L'appareil comprend un boîtier électronique dans lequel se trouvent rassemblés

- le circuit détecteur
- le circuit de contrôle
- le réseau d'alimentation et le système permettant l'affichage digital
- un capteur qui peut être utilisé comme anémomètre ou comme débitmètre massique
- et un générateur haute tension compact se trouvant dans la poignée du capteur. Ce générateur produit les ions et les propulse dans le courant d'air.

Thermo Systems Inc. construit un grand nombre de modèles de débitmètres basés sur ce principe, ils permettent de couvrir une large gamme de débit.

Les caractéristiques de ces débitmètres sont les suivantes :

- le sens du courant gazeux traversant le capteur est indifférent
- ils mesurent le débit massique total indépendamment du profil de vitesse
- ils sont linéaires
- la perte de charge est faible
- la réponse en fréquence est bonne

Les changements de densité sont pris en compte automatiquement. Ils peuvent détecter des vitesses de l'ordre du cm/s et sont, dans ce cas supérieurs aux tubes de Pitot et débitmètres thermiques.

Le capteur (fig.18) est composé d'un tube muni d'une électrode sur la paroi intérieure. Au centre du tube se trouve un barreau muni d'un disque plat relié à un générateur haute tension. Une décharge de faible intensité crée une couche uniforme d'ions positifs près des bords du disque. Il s'établit un champ électrique symétrique entre le barreau central et l'électrode collectrice montée sur la face interne du tube.

En l'absence de courant gazeux le faisceau d'ions se déplace radialement vers la paroi en s'élargissant de façon continue, l'élargissement étant dû à une répulsion coulombienne entre les ions du faisceau.

En présence de courant gazeux, le faisceau d'ions sera dévié et la composante axiale de sa vitesse sera égale à la vitesse du courant gazeux.

## 2. THEORIE

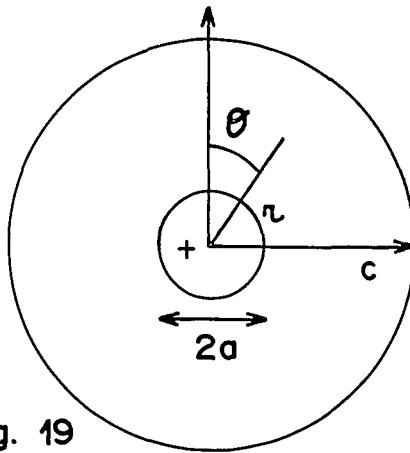


Fig. 19

On suppose le capteur formé de deux cylindres concentriques de rayons  $c$  et  $a$ . Le champ électrique à une distance  $r$  sera (fig.19).

$$E(r) = \frac{V}{r \operatorname{Log} \frac{c}{a}} \quad (1)$$

$V$  étant la différence de potentiel entre les deux cylindres Soient  $v_r$  et  $v_a$  les vitesses radiale et axiale de dérive d'un ion. Si l'écoulement est de révolution, ces quantités ne dépendent que de  $r$ .

La vitesse radiale  $v_r$  est proportionnelle à la mobilité  $K$  du gaz et au champ électrique  $E$  en un point

$$v_r = K E (r) \quad (2)$$

L.E. LOEB cité par KURZ a montré que si  $v_r$  est petit

$$K = K_0 \frac{\rho_0}{\rho} \quad (3)$$

$K_0$  et  $\rho_0$  étant la mobilité et la masse volumique du gaz aux conditions normales (20°C et 760 mm de mesure),  $\rho$  la masse volumique du gaz dans les conditions de l'expérience. Soit  $D$  la dérive axiale d'un ion. On a,

$$\frac{d\delta}{dt} = v_a \quad (4)$$

De même

$$\frac{dr}{dt} = v_r \quad (5)$$

$$d\delta = v_a dt = \frac{v_a}{v_r} dr \quad (6)$$

$$D = \int_0^D d\delta = \int_a^c \frac{v_a}{v_r} dr = \frac{1}{2\pi} \frac{v_a}{v_r} dr d\theta \quad (7)$$

En combinant les équations (1), (2), (3) et (7) :

$$D = \frac{1}{2\pi} \frac{\text{Log } c/a}{K_0 \rho_0 V} \int_0^{2\pi} \int_a^c \rho v_a r dr d\theta$$

Débit massique total à  
travers le capteur :  $M$

$$D = \frac{1}{2\pi} \frac{\text{Log } c/a}{K_0 \rho_0 V} M = k.M$$

La déviation d'un ion est proportionnelle au débit massique total.

### 3. ETALONNAGE

Il est effectué à Thermo Systems Inc. avec des cols soniques et pour des gammes de débit allant de 0,3 à 100 g/s d'air sec.

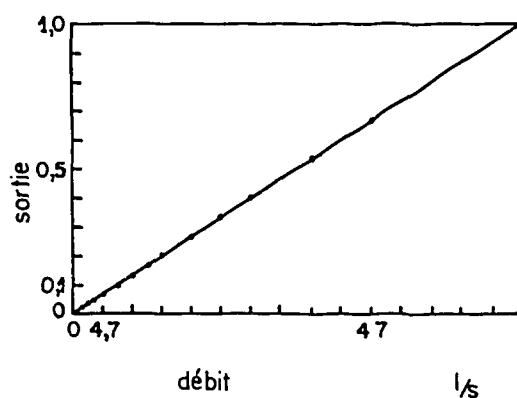


Fig. 20

Les résultats sont donnés sur la figure 20 et montrent la bonne linéarité du système.

La précision est de  $\pm 2\%$  sur la lecture et de  $\pm 0,1\%$  de l'échelle complète. Sur la base de résultats récents, il semble possible d'atteindre  $\pm 1\%$  et  $0,05\%$ .

Ce type d'appareil, spécialement adapté aux mesures de faibles vitesses a, dans ce domaine, des performances supérieures à celles des débitmètres thermiques et des organes déprimogènes. C'est un appareil robuste utilisé surtout en météorologie.

#### 4. CONCLUSION

Ce débitmètre est employé pour les mesures de vitesses et de débits massiques de l'air mais peut être utilisé pour d'autres applications. Il présente de nombreux avantages indiqués dans ce chapitre.

Il est utilisé pour des débits de 0 à 100 g/s, des pressions de 0,3 à 2 bars et des températures de -20 à 60°C.

8. DEBITMETRE PIEZO-PRCESSIF

L'appareil décrit dans ce chapitre est commercialisé par la société FISCHER et PORTER [HERZL 1974]. Suivant le même principe la société HAMWORTHY commercialise également un débitmètre ayant les mêmes caractéristiques principales. Il découle des études théoriques de MICHELSON [1955] et expérimentales de CHANAUD [1963-65].

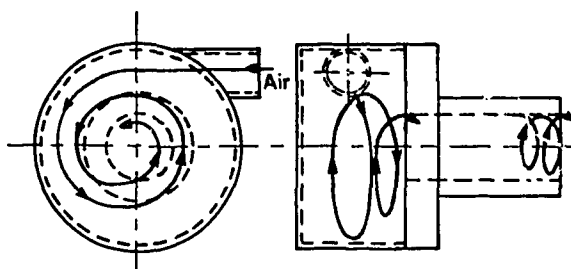


Fig. 21

Les premières études ont été effectuées sur le sifflet à Vortex dont le schéma est donné à la figure 21. Le fluide pénètre dans l'appareil tangentiellement aux parois du tube et prend un mouvement de rotation autour de l'axe, les études ont porté sur le mouvement du fluide près de la sortie.

Les auteurs ont détecté un son (d'où le nom de sifflet à vortex) dont la fréquence augmentait avec le débit.

Le mouvement oscillatoire utilisé est un mouvement précessif. Il fut étudié en 1954 par VONNEGUT, ce dernier a suggéré que la vitesse de précession du vortex était égale à la vitesse angulaire du fluide et c'est MICHELSON (1955) qui a mis le phénomène en équation.

Le mouvement précessif est créé par :

- un aubage directeur à l'entrée de l'appareil qui concentre le fluide en une veine qui se met en rotation autour de l'axe du tube de mesure.

- le cône de l'aubage défecteur et le venturi qui provoque un contre-courant, on obtient ainsi une ligne où la vitesse tangentielle est nulle. La veine fluide, en rotation autour de l'axe ne peut dépasser cette ligne et se met en rotation comme indiqué sur la figure 22.

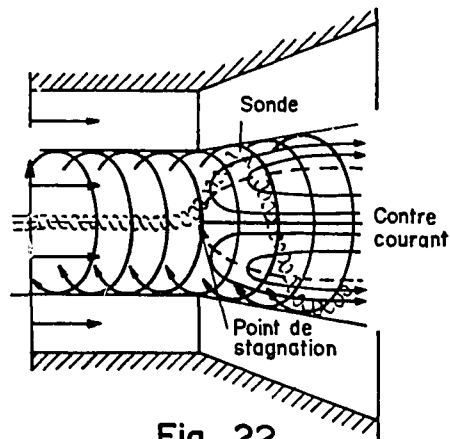


Fig. 22

Des études expérimentales systématiques ont été effectuées avec différentes méthodes d'arrivée d'air (arrivées tangentielles circulaires ou rectangulaires, aubages directeurs, sections tournantes), différents diamètres de cavité et de tube aval.



Ces études ont confirmé les premières conclusions de VONNEGUT à savoir que la fréquence du vortex est liée à la vitesse angulaire du fluide et que les paramètres caractéristiques de l'écoulement sont : le nombre de Reynolds et le nombre de Strouhal [CHANAUD 1965].

Sur ce principe la société FISCHER et PORTER a construit un débitmètre utilisable pour des gaz de densité, viscosité et conductivité différentes allant des gaz inertes comme l'azote aux gaz très corrosifs comme l'acide chlorhydrique. La précision des mesures est de 1% [Fiche d'application n° 43 OTIC, FISCHER et PORTER].

L'appareil est composé de 3 parties : le tube de mesure proprement dit, le préamplificateur-détecteur et le convertisseur de signaux.

#### 1. LE TUBE DE MESURE

Le gaz pénètre dans le tube à travers un aubage directeur qui lui imprime un mouvement de rotation autour de l'axe ; le gaz progresse dans l'appareil à la manière d'un tire-bouchon dont le pas est fixe et défini par les lames directrices et la forme du tube (Fig.23).

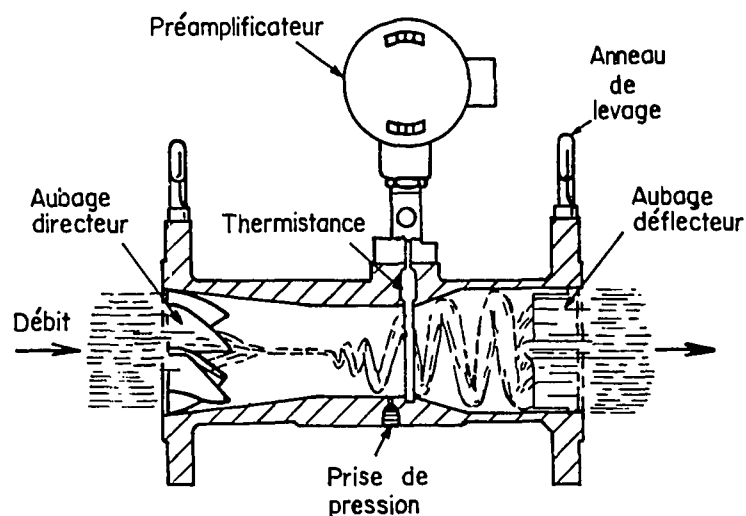


Fig. 23

La vitesse de rotation du vortex c'est à dire le nombre de tours par seconde est proportionnel au volume de fluide traversant le tube de mesure, elle est mesurée par une thermistance. Le courant gazeux est redressé à la sortie du tube par un aubage déflecteur.

En réalité l'écoulement n'est pas strictement permanent à cause des pompes, de la configuration du circuit, de la nature du gaz, etc.....

L'aubage directeur supprime une grande partie de ces bruits.

## 2. LE PREAMPLIFICATEUR-DETECTEUR

Il fournit un courant constant à la thermistance et amplifie le signal alternatif de sortie ; son gain varie avec la fréquence de façon à compenser la perte de sensibilité de la thermistance à fort débit.

## 3. LE CONVERTISSEUR DE SIGNAUX

Il fournit un signal carré dont la fréquence est identique à celle des boucles du vortex.

Le tube de mesure est en acier inoxydable et la thermistance est gainée de verre ou de tout autre matériau chimiquement résistant. L'appareil ne possède aucune pièce mobile, il mesure des débits volumiques de gaz. L'étalonnage est fait par le constructeur qui assure une précision de 1% de l'échelle de mesure et une fidélité supérieure à 1%. La méthode d'étalonnage n'est pas précisée par les constructeurs.

Citons pour mémoire un autre type d'anémomètre à vortex [COLTON R.F. 1976] fabriqué par J.TEC Associates Inc. ; c'est un appareil utilisé en météorologie et conçu plus spécialement pour les mesures en mer ; l'effort des chercheurs a porté sur l'endurance de l'appareil plus que sur sa précision.

Il s'agit d'une girouette montée sur un boîtier fixe dans lequel se trouve la partie électronique, le tube de mesure se trouvant dans la queue de l'appareil (Fig.24).

Les dimensions totales sont de 37,5 x 25 x 10 cm.

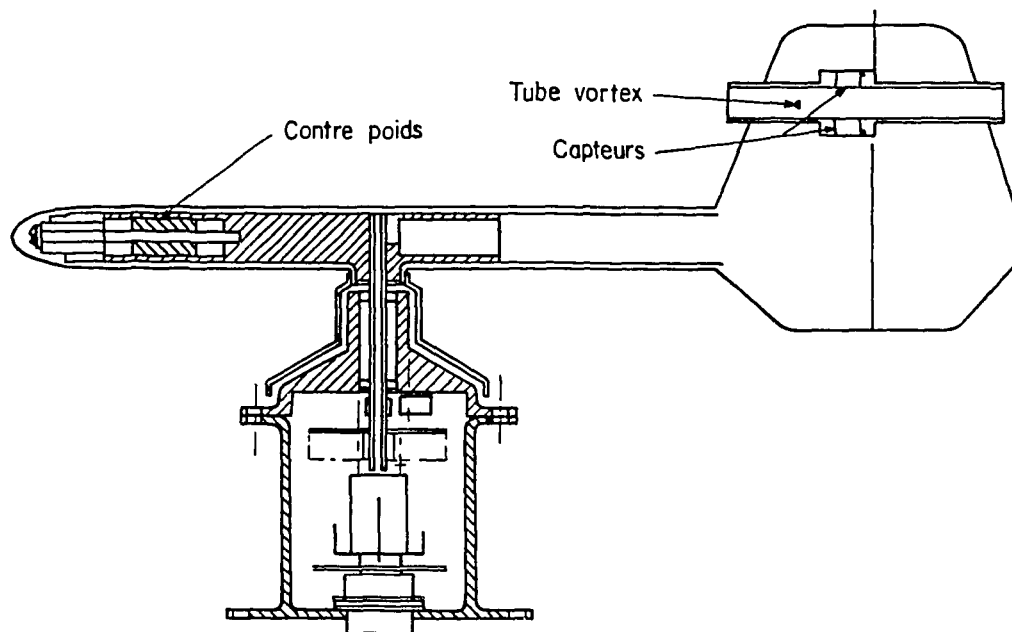


Fig. 24

9. L'ETALONNAGE DES DEBITMÈTRES A GAZ

[PLUNIAN 1963, ARNBERG et BRITTON 1974, CASTILLON 1974, OLSEN et BAUMGARTEN 1974  
RUEGG et JOHNSON 1974, ALASIA et CIGNOLO 1975]

Ce chapitre ne traite que des méthodes générales d'étalonnages ; il existe d'autres méthodes adaptées à certains types particuliers de débitmètres et qui ont été indiquées aux chapitres correspondants (Rotamètres, Moulinets,...)

Parmi les méthodes générales, il est nécessaire de distinguer :

- (1) - les méthodes primaires permettant un étalonnage très précis mais bien souvent long à mettre en oeuvre et nécessitant un matériel lourd comme le gazomètre ou la pesée.
- (2) - les méthodes secondaires qui consistent à effectuer l'étalonnage à l'aide d'un débitmètre précédemment étalonné par une méthode primaire.

1. LE GAZOMETRE [PLUNIAN 1963, RUEGG et JOHNSON 1974]

L'article de E. PLUNIAN dans les Techniques de l'Ingénieur explique de façon simple et claire le principe du gazomètre, puis son utilisation pour vérifier et étalonner les débitmètres. Le schéma du gazomètre est reproduit à la figure 25.

La cloche F plonge plus ou moins profondément dans la cuve L contenant un liquide qui fait étanchéité. Le gaz à mesurer est contenu dans la cloche.

On peut chronométrer un déplacement connu de la cloche alors qu'elle s'élève à vitesse constante au dessus du liquide.

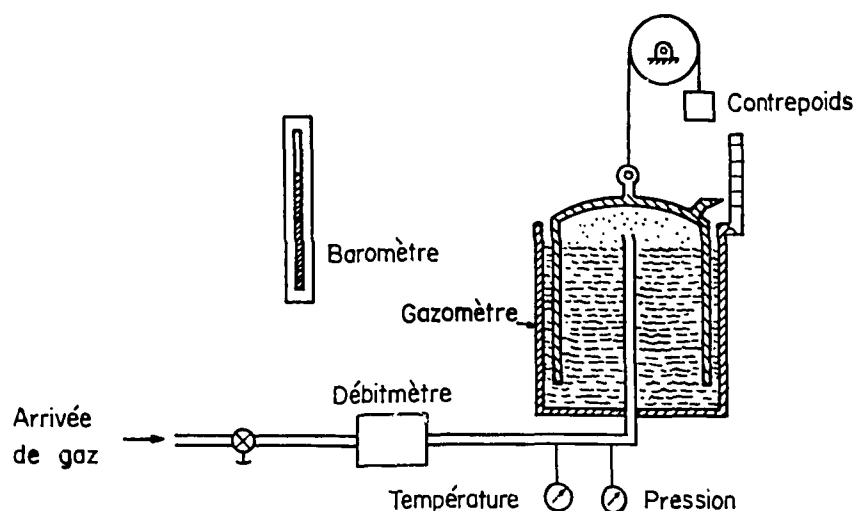


Fig. 25

Gazomètre pour l'étalonnage des débitmètres à gaz

RUEGG et JOHNSON ont analysé le mouvement du fluide et des parties mécaniques du gazomètre pour définir les critères d'utilisation, estimer les erreurs associées au mouvement de la cloche et déterminer leur origine, trouver les améliorations possibles.

A partir des équations différentielles du mouvement de la cloche, du liquide et du gaz, ils ont tenté de mettre sur pied une simulation susceptible d'être utilisée sur ordinateur.

## 2. METHODES MASSE-TEMPS ET $pVTt$ [ARNBERG et BRITTON 1974]

Ces méthodes permettent de mesurer des débits massiques moyens pendant le temps de l'essai. Elles se complètent pour pouvoir couvrir une large gamme de débit.

Le débit est calculé à partir de l'intervalle de temps nécessaire pour que la masse du récipient de stockage augmente d'une valeur donnée. Il est nécessaire que le régime dans le circuit soit permanent avant de brancher le récipient de stockage (Fig.26).

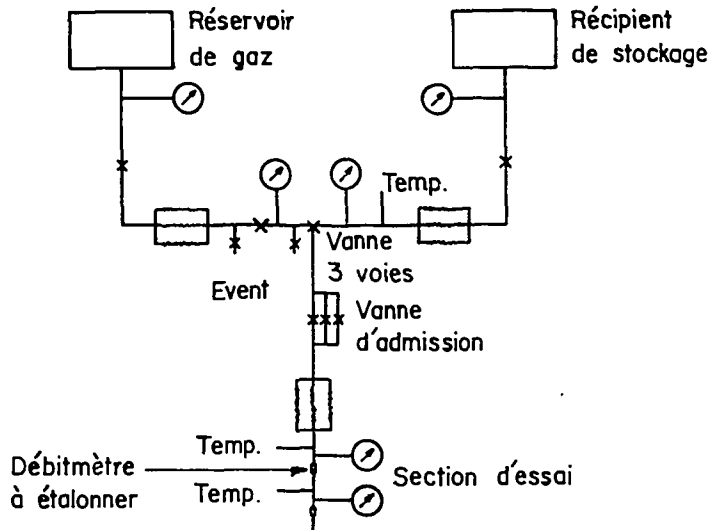
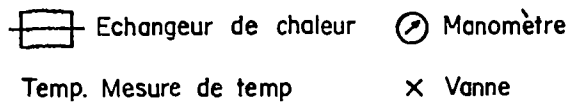


Fig. 26

Schéma de montage des méthodes PVTt et masse-temps pour mesure de débit



Les deux méthodes nécessitent la détermination de la masse du récipient de stockage au début et à la fin de l'essai. La différence entre les deux méthodes étant la façon de déterminer cette masse.

Pendant l'essai c'est le récipient de stockage qui fournit le gaz. Le chronomètre est enclenché automatiquement au moment où on manoeuvre la vanne 3 voies.

Dans la méthode Masse-Temps le changement de masse est déterminé en effectuant des doubles pesées sur le récipient de stockage avant et après l'essai à l'aide d'une balance analytique munie d'un fléau de 2,50 m. L'erreur estimée est inférieure à 0,011 % et la fidélité est de 0,006 %.

Dans la méthode pVTt la masse est calculée à partir du volume-étalon du récipient de stockage ; on mesure la pression et la température à l'intérieur du récipient avant et après l'essai. La masse du gaz est obtenue à partir de l'équation d'état du gaz considéré.

Dans les deux cas le temps est mesuré à l'aide d'un système électronique. Les deux méthodes se complètent pour couvrir des débits de 0 à 9 kg/s ; la méthode Masse-Temps étant utilisée pour les petits débits jusqu'à 230 g/s et la méthode pVTt au-dessus. La précision est de 0,011 % pour les petits débits et de 0,02 % pour les gros débits. Ces deux méthodes permettent en particulier d'étalonner des débitmètres qui serviront par la suite d'étalons secondaires. Elles ont le gros inconvénient d'être très lentes. En effet il n'est guère possible de faire plus de 3 à 5 essais par jour.

### 3. METHODE D'OLSEN ET BAUMGARTEN 1974 POUR L'ETALONNAGE DES TUYERES SONIQUES

Elle s'apparente à la méthode pVTt de ARNBERG et BRITTON. On calcule le débit massique du gaz à partir de la mesure du temps mis pour remplir un récipient de volume connu suivant le schéma de la figure 27.

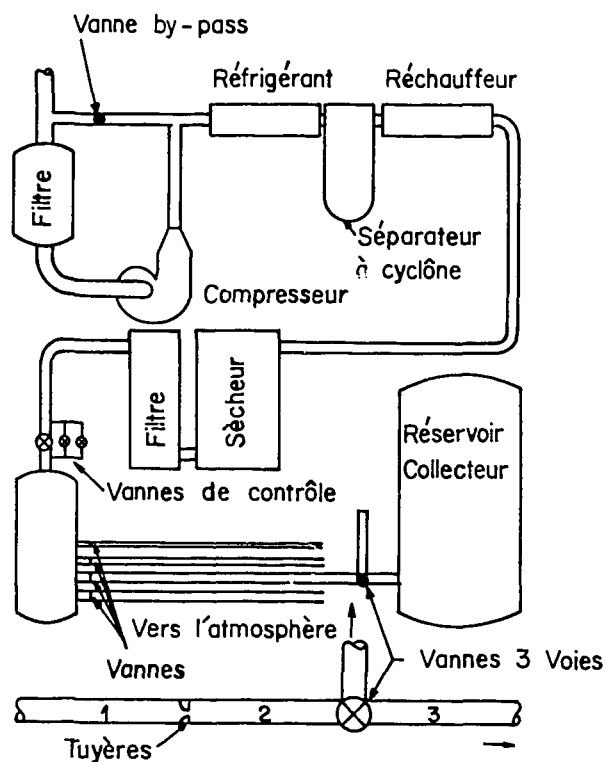


Fig. 27

Le fluide (air) qui circule dans l'appareil est envoyé pendant un intervalle de temps mesuré dans le réservoir collecteur à l'aide de la vanne 3 voies ; une mesure de pression et de température à l'intérieur du réservoir est effectuée pour connaître la masse  $m$  de fluide collecté.

On envoie un débit constant à travers la section 1 (fig.27) en maintenant la pression et la température constante et l'écoulement critique à travers la tuyère. Quand la vanne 3 voies dirige le fluide vers l'extérieur, le débit massique à travers les sections 1,2 et la tuyère est le même.

$$M = \rho_1 S_1 v_1 = \rho_2 S_2 v_2$$

Quand la vanne 3 voies est réglée de façon à ce que l'air pénètre dans le récipient, le débit de fluide entrant dans le réservoir est d'abord supérieur à celui qui passe dans la tuyère, puis quand la pression en 2 augmente le débit dans le réservoir est inférieur à celui qui traverse la tuyère. Il faut donc corriger le débit massique à travers la tuyère, calculé à partir de la masse de gaz collecté dans le réservoir pendant le temps  $t$ , en tenant compte du changement de la masse du fluide dans la section 2. En appliquant la loi de la conservation de la masse et en tenant compte de la correction ci-dessus, il vient,

$$M = \rho_1 S_1 v_1 = \frac{\rho_3 V_3 + V_2 (\rho_{22} - \rho_{21})}{t}$$

$\rho_{21}$  et  $\rho_{22}$  sont les masses volumiques du gaz dans le volume  $V_2$  au début et à la fin de l'expérience.

OLSEN et BAUMGARTEN ont étalonné de cette manière dix tuyères soniques dont le diamètre au col était compris entre 0,36 et 3,3 cm pour une pression amont jusqu'à 6,5 bar et des débits jusqu'à 1275 l/s. Ils ont trouvé que l'erreur systématique était au plus de 0,03 % et l'erreur totale de 0,11 %.

#### 4. METHODE GAZ DE FRANCE (CASTILLON 1974)

Gaz de France a recherché une méthode d'étalonnage à haute pression et pour de forts débits, conditions qui correspondent à celles du gaz naturel.



A cet effet, on a cherché une méthode simple qui permette l'étalonnage directe des tuyères soniques (figure 28).

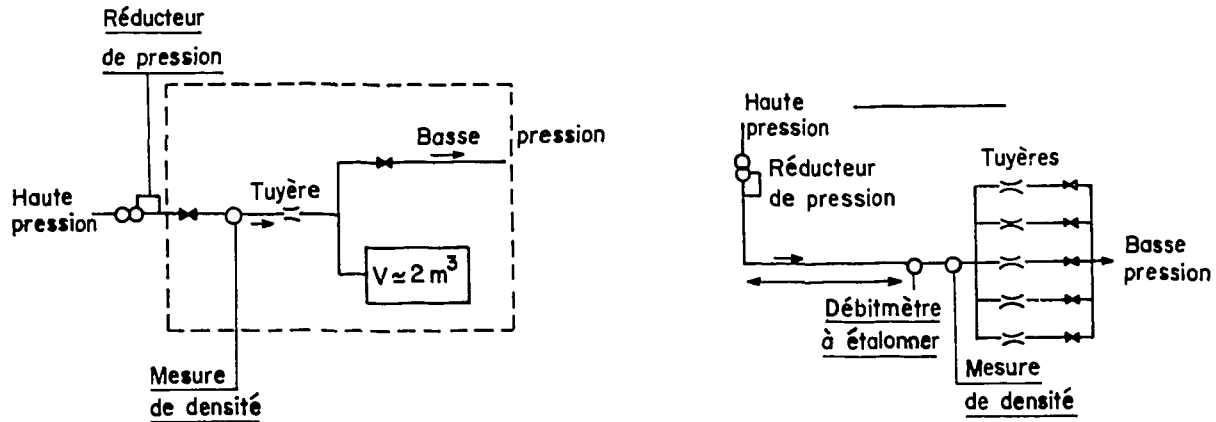


Fig. 28

Les tuyères ainsi étalonnées sont ensuite utilisées pour étalonner d'autres débitmètres ou placées directement sur des conduites de gaz naturel. Ce sont des tuyères à col cylindrique prolongées par un divergent de 7°.

Ce système d'étalonnage précis et simple à mettre en oeuvre permet d'éviter, pour les hautes pressions, d'avoir à extrapoler des courbes d'étalonnage à pression atmosphérique comme cela se fait couramment.

## 5. CONCLUSIONS

Les circuits d'étalonnage du type de ceux de OLSEN ou de CASTILLON relativement simples et pouvant fonctionner sous pression sont intéressants. Ils permettent d'éviter deux extrapolations qui se font souvent : celle qui consiste à passer de l'eau à l'air et celle qui passe de la pression atmosphérique à plusieurs bars.

CONCLUSIONS

Cette étude, non exhaustive, nous a permis de comparer les avantages et inconvénients des différentes méthodes de mesures de débits de gaz (Tableaux 1 et 2).

Lorsqu'une grande précision n'est pas nécessaire le rotamètre est un appareil commode. En revanche, pour des mesures plus précises, il semble que les cols soniques correctement calculés et étalonnés soient plus performants.

Dans le cas de débit de gaz de l'ordre du litre par seconde nous pensons qu'une tuyère sonique est bien adaptée. Le calcul peut être fait à partir des résultats donnés par GODT (1964), pour des pressions de 4 à 21 bars, et par les formules données par ARNBERG pour des pressions inférieures.

Il reste le problème de l'étalonnage qui ne peut être résolu que par un banc d'étalonnage construit en tenant compte des remarques de OLSEN et BAUMGARTEN (figure 29).

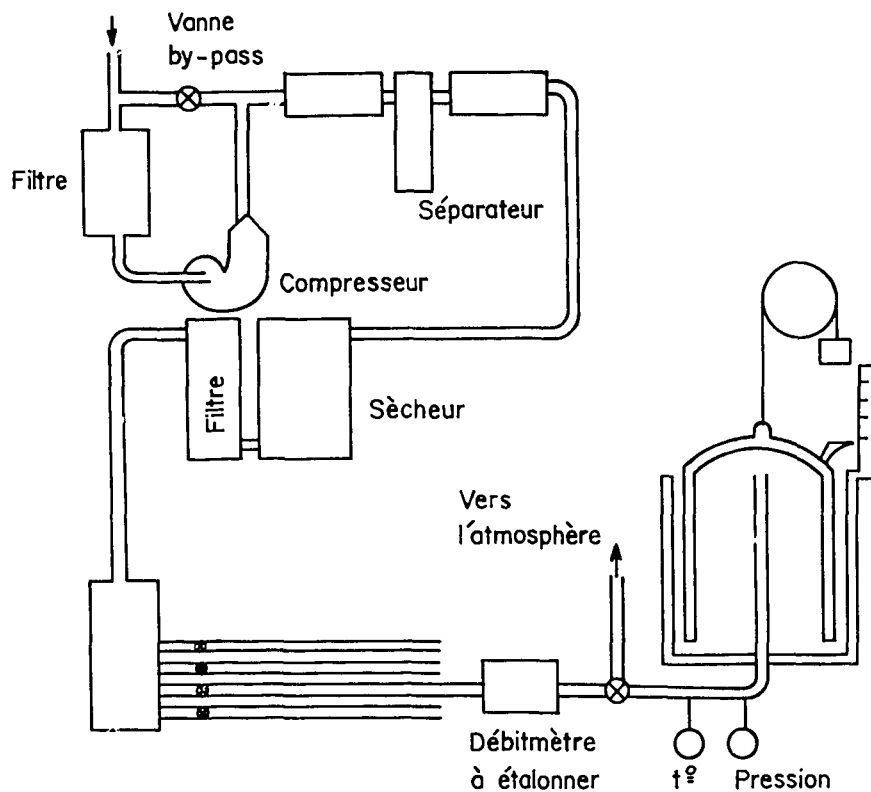


Fig. 29

TABLEAU 1 - TYPES DE DEBITMETRES Les débits volumiques sont ramenés aux conditions standard 1,01 bar à 21,4°C

TYPES DE DEBITMETRES	TYPES DE DEBITS MESURE	GAMME DE DEBITS	GAMME DE PRESSION	PRECISION	REMARQUES
A rotor hélicoïdal	Volumique Instantané	3 à 36 000 m <sup>3</sup> /h	jusqu'à 70 bar peut atteindre 250 bar	1 %	souvent bidirectionnel
Thermiques	Massique Instantané	5 g/h à quelques milliers kg/h	jusqu'à 300 bar	1 %  peut atteindre 0,1 %	
Rotamètres	Volumique Instantané	100 cm <sup>3</sup> /mn à 5000 m <sup>3</sup> /h		2 %  peut atteindre 0,25 %	Ne nécessite pas de section droite amont
Organes déprimogènes	Volumique Instantané	limité par le circuit	limité par le circuit	1 %	En condition sonique mesure un débit massique
Traceurs	Volumique Moyen	30 à 60 m <sup>3</sup> /s	14 à 55 bar	0,5 %	
Déviations d'ions	Massique	0 à 100 g/s	0,3 à 2 bar	1 %	Bidirectionnel
Piézo-précessif	Volumique	0,2 à 5000 m <sup>3</sup> /h	jusqu'à 100 bar	0,75 %	pas pour gaz corrosif


TABLEAU 2 - MARQUES DES DEBITMETRES

MARQUES	TYPES DEBITMETRES	TYPES DEBIT	GAMME DEBITS l/s OU g/s	GAMME PRESSIONS bar	GAMME TEMP. °C	PRECISION	REMARQUES	
<u>FAURE-HERMAN</u>	à rotor	volumique moyen	0,7 à 11000l/s	jusqu'à 140	- 30 à + 110	1% de la mesure	12 modèles	
Type TG			vitesse supérieure à 1 m/s	" 100	jusqu'à 90	3% "	2 modèles	
Type GT			vitesse > 1 m/s	" 100	" 90	3% "	2 "	
<u>FLOW TECHNOLOGY INC</u>	à rotor	"	Standard 'line	"	"	0,1 %		
Omniflo			"	"	"	0,1 %	pour petits débits	
<u>METAFLON Ltd</u>	"	"	Type MG	0,5 à 11	à partir de 6 10 <sup>-5</sup>	- 200 à + 200	5 %	17 modèles
<u>E.I.V.S.</u>			à flotteur	"	Type 150	3 10 <sup>-4</sup> à 11/s	1 bar	21,4°C
Type 65	2 10 <sup>-5</sup> à 11/s	"			"	10 % "	24 modèles	
<u>GILMONT. Instrum. INC.</u>	"	"	seul	1,6 10 <sup>-5</sup> à 1,3 l/s	insensible	insensible	2% de la lecture	5 modèles
avec vanes micro- métrique			0,33 10 <sup>-6</sup> à 0,2 l/s	"	"	"	"	
<u>METRA</u>	"	"	Tubux	0,56 10 <sup>-3</sup> à 110	insensible	jusqu'à 150	2% val.fin d'échelle	
Unox			0,9 10 <sup>-2</sup> à 500	"	"	"	"	
RE			0,9 10 <sup>-2</sup> à 900	10 à 320	jusqu'à 400	1% "		
PANZAY			1,25 à 830	jusqu'à 25	jusqu'à 350	2% "		

TABEAU 2 - MARQUES DES DEBITMETRES (suite 1)

MARQUES	TYPES DEBITMETRES	TYPES DEBIT	GAMME DEBITS l/s OU g/s	GAMME PRESSIONS bar	GAMME TEMP. °C	PRECISION	REMARQUES
<u>RAMAPO</u> Mark X	à flotteur	volumique moyen	$1,4 \cdot 10^{-3}$ à 2 l/s	jusqu'à 240	jusqu'à 120	1 %	petits débits 7 modèles
<u>BROOKS</u>	"	"	0 à 1	jusqu'à 14	"	1 % max	
<u>HASTINGS</u> Modèle LF (non linéaire) Modèle ALL (linéaire)	thermiques	massique moyen	0 à 1/3 l/s 0 à 1 l/s	insensible "	jusqu'à 100°C insensible	5 % 1 %	8 modèles pour petits débits
<u>D.A.M.</u> U 60 Flodam	"	"	$1,4 \cdot 10^{-6}$ à $2,78 \cdot 10^{-3}$ l/s 0,6 à 28 g/s	sans influence jusqu'à 20 bar sans influence jusqu'à 50 bar	" jusqu'à 100°C	1 % 2 %	volume ramené aux conditions normales 8 modèles
Sonidam	thermique + tuyère sonique	"	$5,6 \cdot 10^{-3}$ à 1,65 g/s	pression amont max. 10 bar		2 %	
<u>SETARAM</u>	thermique	"	seul 0 à $3 \cdot 10^{-3}$ l/s avec deriv. 0 à $8,3 \cdot 10^{-2}$ avec vent. 0 à $3 \cdot 10^{-2}$	0 à 10	0 à 100	1 % de la lecture 1 % " 2 % "	ramené à température et pression normale
<u>BROOKS</u> Modèles 5810, 5811, 5812	thermique + organe déprimogène	"	0 à 8,3 l/s	0 à 35	- 20 à 65	1 % du maxi de l'échelle	15 modèles
<u>C.G.S. DATAMETRICS</u> Débitmètre série 800 + capteur série 1000	Anémomètres à fil ou film chaud	Massique moyen	correspondent à des vitesses de 0,5 à 200 cm/s		0 à 60°C	2 %	3 modèles

TABLEAU 2 - MARQUES DES DEBITMETRES (suite 2)

MARQUES	TYPES DEBITMETRES	TYPES DEBIT	GAMME DEBITS l/s OU g/s	GAMME PRESSIONS bar	GAMME TEMP. °C	PRECISION	REMARQUES
<u>ANNUBAR</u>	Tube de Pitot + électronique	volumique moyen	1,6 à 12600 l/s			0,5 à 1,5 % de la lecture	
<u>GILFO</u>	organe déprimogène à orifice variable	"					
linéaire semi-long			10 <sup>-4</sup> à 0,67 l/s "	jusqu'à 35 "	10 à 300 "	1 % de l'échelle 1 % de la lecture	gaz propres
<u>THERMO SYSTEM</u>	déviations d'ions	massique moyen	0,1 à 1000g/s			0,1% de l'échelle 0,3% de la lecture	
<u>OTIS FISCHER</u> Série 10 S 100	à vortex	volumique moyen	0,06 à 6,6 l/s	20 à 100 bar	- 45 à 105	0,75 %	
<u>EASTECH</u> 2200 et 2300 2600	"	"	6 à 600 80 à 4500		- 50 à 150 "	1 % "	Re <sub>min</sub> = 5000
<u>HAMWORTHY</u>	"	"				1 %	
<u>RAMAPO</u> Mark V	jauge de contrainte	volumique local	0,2 à 380	jusqu'à 240	jusqu'à 120	1 %	17 modèles
<u>ERDCO</u> Série 400/600 Série 2500/2600		volumique moyen	0,1 à 450 l/s 0 à 4500 l/s	jusqu'à 3,5 ou 14 jusqu'à 14,28, 70 et 125	jusqu'à 120 jusqu'à 120 175 et 320	2 % "	

BIBLIOGRAPHIE

- ALASIA F., CIGNOLO G. and al. 1975  
A fast flow diverter for use in a laboratory in primary flowmeter calibration  
Alta Frequenza, 46, 10, 553-557
- ARNBERG B.T. 1962  
Review of critical flowmeters for gas flow measurements  
J. of Basic Engineering, Dec., 447-460
- ARNBERG B.T., BRITTON C.L. 1974  
Two primary methods of proving gas flow meters  
Flow, its measurement and control in Science and Industry, Vol.I (DOWDELL R.B. Ed.) Part III Flow measurement and control, pp. 1308-1314
- BENEDICT R.P. 1969  
Fundamentals of temperature, pressure and flow measurements  
J. Wiley, 353 pages
- BENEDICT R.P., GLEED A.R., SCHULTE R.D. 1973  
Air and water studies on a diffuser-modified flow nozzle  
J. of Fluids Engineering, Juin, 169-179
- BENEDICT R.P., SCHULTE R.D. 1973a  
A note on the critical pressure ratio across a fluid meter  
J. of Fluids Engineering, Sept., 337-341
- BENEDICT R.P., WYLER J.S., BRANDT G.B. 1975  
The effect of edge sharpness on the discharge coefficient of an orifice  
J. of Engineering for Power, 97, Oct., 576-582
- BENEDICT R.P. 1977  
Loss coefficients for fluid meters  
J. of Fluids Engineering, Mars, 245-248
- BOURGET P.L. 1976  
Méthode d'étalonnage d'un anémomètre à fil chaud  
J. of Scientific Instruments, 9, 353-358
- BURTON J. 1958  
Pratique de la mesure et du contrôle dans l'industrie - Tome I - Pressions, niveaux, débits  
Dunod, 400 pages
- BURTON J. 1965  
Mesure des faibles débits de gaz à l'aide d'organes déprimogènes  
Cirulaire d'information technique du C.D.S. n° 9, sept. pp.2057-2063
- CASTILLON M.P. 1974  
Calibration of gas meters with sonic nozzles  
Flow, its measurement and control in Science and Industry Vol.I (DOWDELL R.B. Ed.) Part I Flow characteristics, pp.279-288

- CHANAUD R.C. 1963  
Experiments concerning the vortex whistle  
J. of the Acoustical Soc. America, 35, 953-960
- CHANAUD R.C. 1965  
Observations of oscillatory motion in certain swirling flows  
J. of Fluid Mechanics, 21, 1, 111-127
- COGNIAT M., MERCIER J. 1970  
Débitmètres thermiques et anémomètres à fil chaud  
Techniques de l'Ingénieur - Mesures et Contrôle, R 2270, 6 pages
- COLTON R.F. 1976  
Vortex anemometers - Second generation  
ISA Transactions, 15, 4, 343-353
- COMTE-BELLOT G. 1976  
Hot film anemometry  
Annual Review of Fluid Mechanics, Vol.8 (VAN DYKE M. VINCENTI W.G. WEHAUSEN  
J.V. Eds). pp.209-231
- CONSIDINE D.M. (Ed) 1971  
Encyclopedia of instrumentation and control  
Mc Graw Hill, 788 pages
- CROCKETT K.A. LUPP E.L. 1973  
The measurement and effects of edge sharpness on the flow coefficients  
of standard orifices  
J. of Fluids Engineering, Juin, 271-275
- DEMARLES F. 1960  
Utilisation pratique des débitmètres à ajutage  
Techniques de l'Ingénieur - Mesures et Contrôle, R 2250, 12 pages
- DEMARLES F. 1975  
Débit-masses  
Techniques de l'Ingénieur - Mesures et Contrôle, R 2300, 21 pages
- DOEBELIN E.O. 1966  
Measurement systems - Application and design  
Mc Graw Hill, 743 pages
- DOWDELL R.B. (Ed.) 1974  
Flow, its measurement and control in sciences and industry - vol. I  
Part.I Flow characteristics and A.S.M.E. fluid engineering conference pp.1-456  
Part.II Flow measuring devices, pp. 457-1048  
Part.III Flow measurement and control in biological fluid flows pp.1049-1493  
I.S.A. 1493 pages
- DUCOUSSET R. 1969  
Mesure du débit-masse par organe déprimogène  
Mesures, régulations, automatismes, Nov, 71-80
- DUDZINSKI T.J., JOHNSON R.C., KRAUSE L.N.  
Performance of a venturi meter with separable diffuser  
NASA TMX 1570, Avril, 15 pages



EL-KHAFAJI A.H.A., TINDAL H.J., WILLIAMS T.J. 1974  
Engine cylinder gas flow measurements by hot-wire anemometers  
Flow, its measurement and control in science and industry, Vol.I (DOWDELL R.B.Ed.)  
Part.II Flow measuring devices, pp.639-646

EVANS E.C., RAY G.W. 1965  
Gas mass flow rate measurement to 0.1%  
Instruments and control systems, 38, 105-109

FAUQUET A. 1960  
Moulinets pour les gaz  
Techniques de l'Ingénieur - Mesures et Contrôle R. 2130, 4 pages

FAUQUET A. 1960 a  
Mesure de la vitesse d'un gaz par sonde de pression  
Techniques de l'Ingénieur - Mesures et Contrôle, R.2150, 14 pages

FAUQUET A., BONNAFOUX P. 1971  
Détermination du débit des fluides par intégration du champ des vitesses  
Techniques de l'Ingénieur - Mesures et Contrôle, R.2210, 12 pages

FIORA M. 1972  
Débitmètres à rotor hélicoïdal  
Techniques de l'Ingénieur - Mesures et Contrôle - R.2280, 16 pages - R 2281,  
10 pages - R 2282, 4 pages.

GODT P.W. 1974  
Experimental correlation fo air, nitrogen, helium and argon flowrates through  
critical flow nozzles  
Flow, its measurement and control in science and industry. Vol.I (DOWDELL R.B.  
Ed.) Part.I : Flow characteristics, pp.263-267

HALMI D. 1973  
Practical guide to the evaluation of the metering performance of differential  
producers  
J. of Fluids Engineering, Mars, 127-140

HEAD V.P. 1977  
Statistical improvenent in differential producer type flowmeters  
J. of Fluids Engineering, Mars, 249-255

HERZL P.J. 1974  
The system approach to high performance gas flow measurement with the swirlmeter  
Flow, its measurement and control in science and industry. Vol.I (DOWDELL R.B.  
Ed.) Part.II Flow measuring devices, pp.963-966

HILLBRATH H.S. 1974  
The critials flow venturi : A useful device for flow measurement and control.  
Flow, its measurement and control in science and industry. Vol.I (DOWDELL R.B.  
Ed.) Part.I : Flow characteristics pp.289-297

I.A.E.A. 1967  
Radioisotope tracers in industry and geophysics.Proceedings of a Symposium  
Prague, 21-25 Novembre 1966, 710 pages.

- JOHNSON R.C. 1974  
Real-gas effects in flow metering  
Flow, its measurement and control in science and industry. Vol.I (DOWDELL R.B. Ed.)  
Part.I : Flow characteristics, pp.269-278
- KINGHORN F.C., P.C., Mc HUGH.A 1977  
An international comparison of integration techniques for traverse methods  
in flow measurement  
La Houille Blanche, n° 1, 49-58
- KURZ J.L., OLIN J.G. 1974  
A new instrument for air flow measurements  
Flow, its measurement and control in science and industry, Vol.I (DOWDELL R.B.  
Ed) Part.II : Flow measuring devices pp.765-772
- LIEBAUT A. 1960  
Débitmètres à ajustage. Mesure du débit instantané dans les conduites  
pleines à section circulaire.  
Techniques de l'Ingénieur - Mesures et contrôle, R 2220, 8 pages - R 2222,  
11 pages R 2224, 10 pages.
- MASURE B., SOLIGNAC J.L., LAVAL P. 1974  
Mass flow rate measurement by means of a sonic throat  
Flow, its measurement and control in science and industry, Vol.I (DOWDELL R.B.  
Ed.) Part.I : Flow characteristics, pp.247-261
- MAUCONDUIT B., TRINITE M. 1976  
Nouvel anémomètre basse vitesse utilisant une thermistance maintenue à  
température constante  
J. of Scientific Instruments, 9, 1091-1096
- MERCIER J., 1969  
Les débitmètres thermiques et leurs emplois  
Automatisme, 14, 10, 505-510
- MICHELSON I., 1955  
Theory of vortex whistle  
J. of Acoustical Society of America, 27, 5, 930-931
- OLLIVIER L. 1960  
Débitmètres à flotteur (rotamètres)  
Techniques de l'Ingénieur - Mesures et Contrôle, R 2260, 11 pages
- OLSEN L., BAUMGARTEN G.P. 1974  
Gas flow measurement by collection time and density in a constant volume  
Flow, its measurement and control in science and industry. Vol.I (DOWDELL R.B. Ed.)  
Part.III Flow measurement and control, pp.1287-1295
- OWER E., PANKHURST R.C. 1966  
The measurement of air flow - 4 th Edition  
Pergamon Press, 367 pages
- PAVLOVSKII A.N. 1975  
Calibration of rotameters and rheometers  
Measurement Techniques, 18, 3, 393-396
- PLUNIAN E., 1963  
Étalonnage et vérification des compteurs à gaz  
Techniques de l'Ingénieur - Mesures et Contrôle, R 1445, 8 pages - Fiche R 1445,  
2 pages

- RUEGG F.W., JOHNSON D.P. 1974  
Dynamics of the bell prover  
Flow, its measurement and control in science and industry, Vol.I (DOWDELL R. B. Ed.). Part.III Flow measurement and control, pp.1297-1307
- SERGESKETTER M.J. 1975  
Mass measurement means money  
Australian J. of Instrumentation and Control, Dec 85-87
- SIEV R. 1960  
Mass flow measurement  
Instruments and Control Systems, 33, 966-970
- SMITH R.E. Jr, MATZ R.J. 1962  
A theoretical method of determining discharge coefficient for venturis operating at critical flow conditions  
J. of Basic Engineering, 84, 434-446
- Techniques de l'Ingénieur - Mesures et Controle  
Tome III - Grandeurs hydrauliques et pneumatiques - Grandeurs thermiques
- Techniques de mesure dans les écoulements - Cycle de conférences tenu à Ermenonville du 24 au 28 Septembre 1973  
Eyrolles, 1974, 684 pages
- UHL A.E. 1974  
Tracer metering of compressible fluids  
Flow, its measurement and control in science and industry Vol.I (DOWDELL R.B. Ed.)  
Part.II Flow measuring devices, pp.809-821
- VERNIER Ph. 1963  
Etalonnage des débitmètres  
Note TT/63-19 C/PV, 13 pages (CEN-Grenoble, Service des Transferts Thermiques)
- VONNEGUT B. 1954  
A vortex Whistle  
The J. of Acoustical Society of America, 26, 1, 18-20
- WARD SMITH A.J. 1976  
A new parameter for correlating discharge coefficient data  
Appl. Sci.Res., 32, 145-148
- WEIDMAN F.D., BROWAND F.K. 1975  
Analysis of a simple circuit for constant temperature anemometry  
J. of Scientific Instruments, 8, 553,560
- WOOD R.D. 1963  
Steam measurement by orifice meter  
Instruments and Control Systems, 36, Avril, 135-137
- WYLER J.S., BENEDICT R.P. 1975  
Comparisons between throat and pipe wall tap nozzles  
J. of Engineering for Power, 97, Oct. 569-575
- NORMES**  
Mesures des débits de fluides au moyen de diaphragmes, tuyères et tubes de venturi. 1ère partie : éléments primaires insérés dans des conduites de section circulaire.  
Norme NF X 10-102, Décembre 1970, 77 pages

Mesure de débits des fluides au moyen de diaphragmes et de tuyères  
Recommandation ISO/R 541, Janvier 1967, 42 pages

Mesure de débit des liquides. Méthodes d'exploration du champ des vitesses  
Recommandation ISO/R 748, Juin 1968.

Mesure du débit des fluides dans les conduites fermées. Méthode d'exploration  
du champ des vitesses au moyen de tubes de Pitot doubles.  
Norme NF X 10-112, Novembre 1975, 47 pages

Mesure de débit des fluides au moyen de tubes de venturi  
Recommandation ISO/R 781 Juillet 1968, 39 pages

Débit des fluides dans les conduites fermées. Liaisons pour la transmission  
du signal de pression entre les éléments primaires et secondaires  
Norme ISO 2186, Mars 1973, 34 pages

Mesure du débit des fluides dans les conduites fermées. Méthode d'exploration  
du champ des vitesses au moyen de tubes de Pitot doubles.  
Norme ISO 3966, Juin 1977, 39 pages

Mesure de débit des fluides dans les conduites fermées - Vocabulaire et  
Symboles  
Norme ISO 4006, Septembre 1977, 23 pages

Mesurage de débits de gaz dans les conduites - Méthodes par traceurs -  
Partie I : généralités  
Norme ISO 4053/I, Septembre 1977, 10 pages

*Manuscrit reçu le 28 février 1978*

*Achévé d'imprimer*  
*par*  
*le CEA, Service de Documentation, Saclay*

*Mai 1978*

*DEPOT LEGAL*  
*2ème trimestre 1978*

*La diffusion, à titre d'échange, des rapports et bibliographies du Commissariat à l'Energie Atomique est assurée par le Service de Documentation, CEN-Saclay, B.P. n° 2, 91 190 - Gif-sur-Yvette (France).*

*Ces rapports et bibliographies sont également en vente à l'unité auprès de la Documentation Française, 31, quai Voltaire, 75007 - PARIS.*

*Reports and bibliographies of the Commissariat à l'Energie Atomique are available, on an exchange basis, from the Service de Documentation, CEN-Saclay, B.P. n° 2, 91 190 - Gif-sur-Yvette (France).*

*Individual reports and bibliographies are sold by the Documentation Française, 31, quai Voltaire, 75007 - PARIS.*

*Edité par*  
*le Service de Documentation*  
*Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay*  
*Boîte Postale n° 2*  
*91190 - Gif-sur-YVETTE (France)*