

**UTILISATION DES CANNES
DÉRIVÉES DU TUBE DE PITOT POUR
L'ÉTUDE DES DÉBITS
DANS LES CONDUITES**

Communication
présentée au Comité technique
de la Société Hydrotechnique de France
le 20 mars 1969

PAR P. MATHIVET *

Les raisons qui justifient un nouveau débitmètre

La Ville de Paris, comme tous les distributeurs d'eau, pour augmenter la qualité du service, a été dans l'obligation de mailler ses réseaux et de réaliser même certaines interconnexions avec d'autres réseaux afin qu'en toute circonstance et quelle que soit la gravité d'un accident, un îlot ne puisse jamais manquer d'eau.

Le calcul de tels réseaux est difficile, et même en faisant, comme cela eut lieu à une certaine époque, l'analogie avec un réseau maillé constitué de résistances électriques pour simuler un réseau hydraulique quelconque, les écarts observés entre la mesure sur le simulateur électrique et la mesure sur le réseau réel, restaient importants.

Plusieurs bureaux d'études ont tenté de résoudre le problème au moyen de calculateurs électroniques mais le nombre de variables étant tellement important, ils durent reconnaître que la précision obtenue laissait encore trop à désirer.

C'est à la lumière de ces constatations que j'ai été amené à rechercher un appareil simple pouvant s'introduire en tout point d'une conduite d'un réseau sans pratiquement être obligé de démonter un tronçon quelconque de tuyauterie, afin de pouvoir mesurer facilement le débit dans cette conduite.

Cette condition excluait d'utiliser les organes déprimogènes classiques et m'obligeait à m'orienter

vers l'utilisation d'un débitmètre dérivé du tube de Pitot.

Toutefois, celui-ci avait l'inconvénient de donner une pression différentielle très faible pour les petites vitesses. En outre, il était influencé par la position de la prise dynamique sur le diamètre de mesure. Ce sont ces problèmes qui ont été résolus progressivement et qui, par l'utilisation industrielle constante de cet appareil appelé « canne », ont permis les mises au point définitives qui, aujourd'hui, assurent même les mesures permanentes en certain point du réseau parisien long de 3 300 km.

Solution retenue

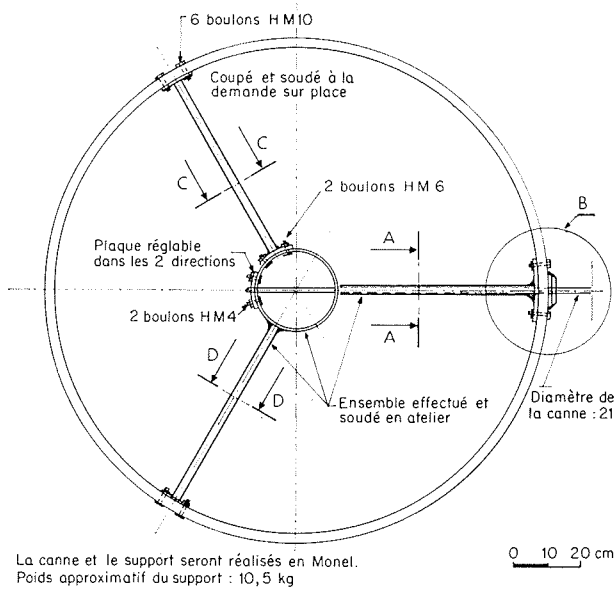
Après avoir pris connaissance de la littérature technique traitant de cette question, je me suis orienté vers une canne cylindrique comportant deux prises dynamiques à 180° l'une de l'autre et dirigées suivant l'axe de la conduite.

D'autre part, pour utiliser le matériel classique employé pour la pose des robinets de prise en charge standardisés à la Ville de Paris, j'ai dû restreindre le nombre de diamètres des cannes qui aurait dû varier avec celui des conduites.

Pratiquement nous utilisons les diamètres suivants :

- Canne de \varnothing 13 mm pour les conduites de 100 à 400 ou 500 mm;
- Canne de \varnothing 21 mm pour les conduites de 400 à 1 000 mm.

* Ingénieur E.S.E., Ingénieur des Services Techniques, chargé des Etudes et Réalisations au Service des Eaux de la Direction des Services Industriels et Commerciaux, Préfecture de Paris.



I/ Fixation de la canne pour la conduite \varnothing 1 500 Ménilmontant-Les Lilas.
 Probe mounting for the 1,500 mm dia. Ménilmontant-Les Lilas pipe.

— Au-delà, la canne de \varnothing 21 mm est placée dans un support profilé pour avoir une résistance mécanique suffisante et ne pas vibrer. Voir figures 1 et 2.

Compte tenu que les prises sont placées dans l'axe de la conduite, il pourrait y avoir des vibrations de la canne créant une erreur de mesure supplémentaire si la canne était montée en porte à faux. Il a donc été décidé d'utiliser des cannes régnant sur tout un diamètre de la conduite, sous l'une des formes suivantes :

- Canne butée sur la paroi dans le cas d'exploration d'un champ de vitesse;
- Canne traversante dans le cas d'une mesure devant durer plusieurs jours et même plusieurs années.

Enfin, la nature même des métaux entrant dans la composition de la canne a fait l'objet de nombreux essais pratiques afin que, quel que soit l'oxydant utilisé pour la stérilisation de l'eau, on ne puisse jamais avoir un effet galvanique avec transport de métal entre la conduite et la canne.

Recherche d'un coefficient de tarage Étalonnages des cannes

Étalonnages en milieu infini.

Une série de cannes différentes a été étalonnée au bassin des Carènes de la Marine Nationale afin de choisir parmi les différents modèles ceux qui donnaient :

- une loi de variation symétrique vis-à-vis du sens de déplacement de l'eau;
- des indications toujours semblables à elles-mêmes;
- une perturbation dorsale minimale.

Étalonnages en conduites.

La première phase terminée et le choix d'un seul type de canne définitivement adopté, les essais en conduites (plus d'un millier d'essais) commencent. Leurs buts étaient multiples :

- Déterminer le coefficient de tarage de la canne dans des diamètres de conduites différents.
- Mettre en lumière les influences diverses telles que :
 - l'orientation des deux prises dynamiques;
 - les alignements droits minimaux nécessaires en amont et en aval d'une canne, pour les points singuliers que l'on rencontre le plus couramment dans les installations;
 - l'influence de la forme de la courbe de répartition des vitesses sur le diamètre où était placée la canne, etc.

Ces étalonnages furent répartis en deux séries :

- a) La première, la plus précise, consistait à placer une canne en un point d'une conduite où il était possible de mesurer le débit traversant par empotage d'un réservoir.
- b) La seconde, malheureusement la plus importante, consistait à installer la canne à 30 D d'un organe déprimogène normalisé (tube de Venturi ou diaphragme).

Les essais ont été exécutés sur des conduites dont les diamètres étaient compris entre 0,30 m et 1,25 m.

Exposé et discussion des résultats de mesure.

Dès l'origine des mesures un point était acquis, concernant le choix de l'emplacement des deux prises dynamiques.

Quelle que soit la forme de la courbe de répartition des vitesses sur le diamètre d'introduction de la canne, il ne fallait pas chercher à se placer au point où la vitesse était supposée être égale à la vitesse moyenne, parce que :

- ce point est toujours mal connu;
- la tangente y a une valeur suffisamment grande pour que le moindre écart de position introduise une erreur importante (voir figure 3 a).

Dans ces conditions il fut décidé de placer les prises dynamiques au centre de la conduite où on appellera la vitesse V_0 .

La variation de la tangente en ce point est toujours assez lente pour qu'un écart de position ne crée pas une erreur importante (voir figure 3 b).

Ce choix fait, il convenait de rechercher la relation entre V_0 et la vitesse moyenne V_m pour avoir le débit Q traversant la conduite.

La forme de la courbe de répartition des vitesses doit avoir apparemment une grande importance. Or, l'expérience a prouvé que le rapport de la vitesse moyenne à la vitesse au centre était com-

pris entre 0,845 et 0,940 suivant la figure 4 pour les mesures effectuées, soit une centaine :

- sur des conduites en fonte, en acier ou en béton armé;
- sur des diamètres de conduites compris entre 0,20 et 1,100 m.

Nous avons posé la relation classique, reliant le débit Q à la pression différentielle H :

$$Q = KD^2 H^\alpha \quad (1)$$

Avec K , coefficient de tarage de la canne, fonction du diamètre D .

Nous avons d'abord constaté que pour une valeur

donnée de D , quelle qu'elle soit, on obtenait en coordonnées bilogarithmiques, une droite brisée dont le point de discontinuité se situait toujours aux environs de $V = 1$ m/s.

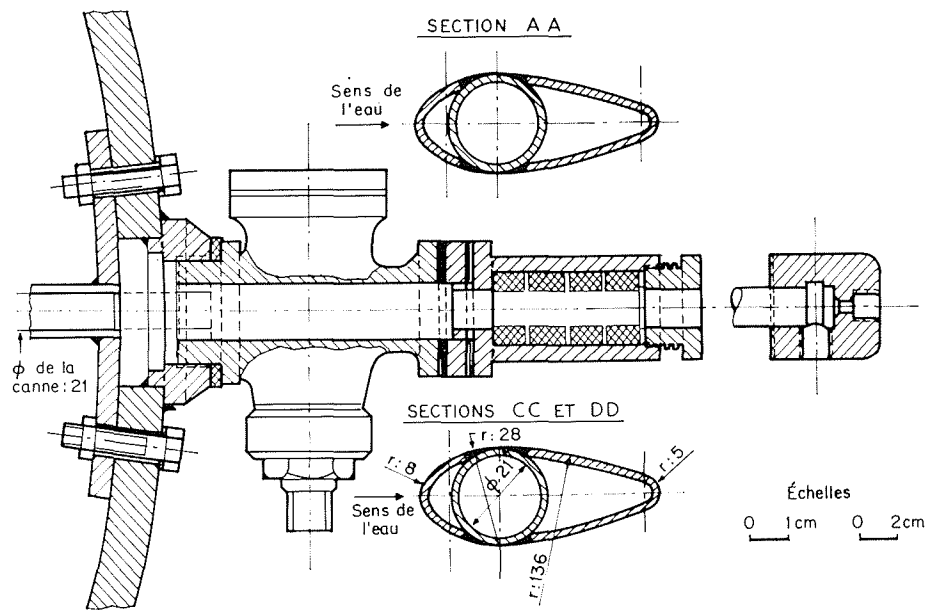
Ce phénomène, qui correspond probablement à un changement du régime d'écoulement, n'a pas pu être explicité. A noter qu'il s'identifie avec la discontinuité constatée dans la portance des ailes d'avions.

Il y a donc un écart de l'exposant α dans la formule (1), mais celui-ci est relativement faible et permet, pour une mesure industrielle, de prendre la valeur moyenne de α pour faire une totalisation, par intégration des débits.

2/

Détails de fixation de la canne pour la conduite Ménilmontant-Les Lilas.

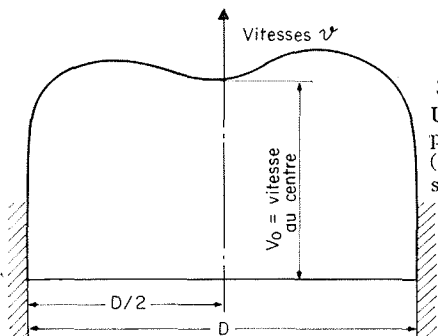
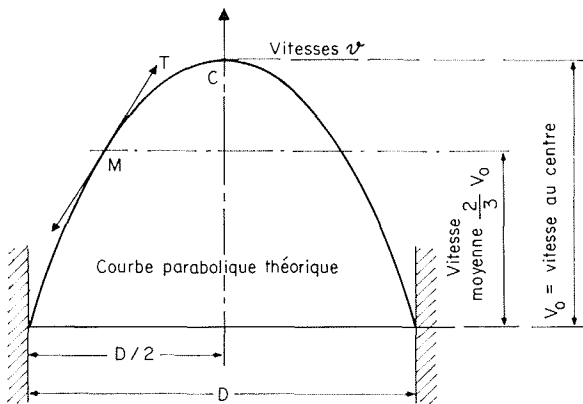
Probe mounting details for the Ménilmontant-Les Lilas pipe.



3 a/

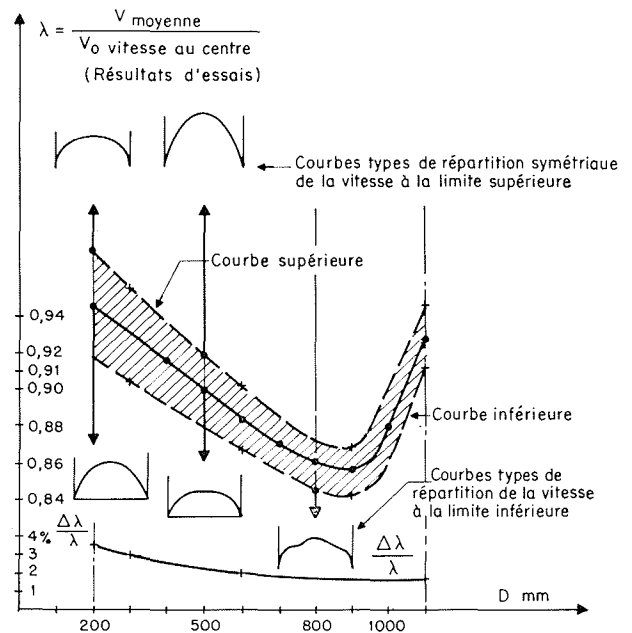
Canne. Répartition théorique parabolique des vitesses sur un diamètre.

Probes. Theoretical parabolic velocity distribution across one diameter.



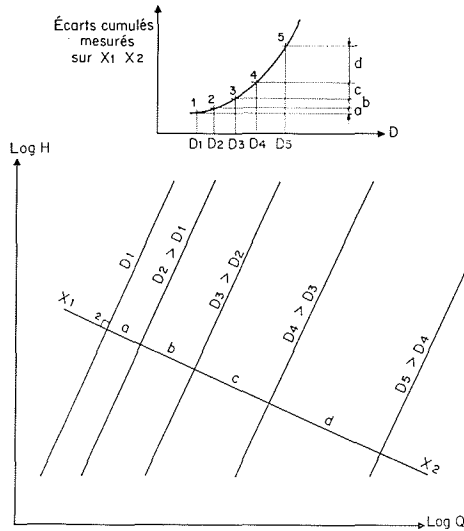
3 b/

Une des courbes pratiques relevées (avec légère dissymétrie).

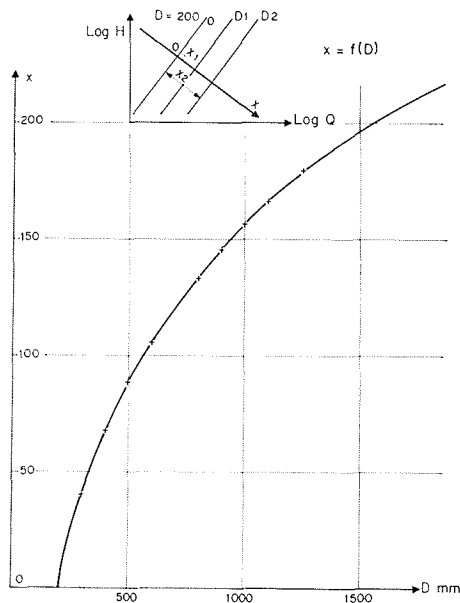


4/ Zone de variation pratique du coefficient λ : relevé sur différentes conduites ayant des courbes de répartition des vitesses très différentes.

Actual variation range of coefficient λ measured on pipes with widely differing velocity distributions.

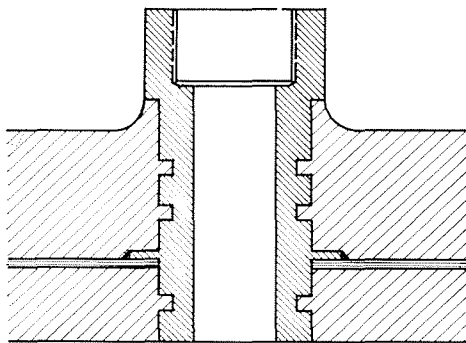


5/ Cannes / Probes.



6/ Loi de variation de la distance x entre les droites parallèles représentatives de $\text{Log } H = f(\text{log } Q)$ en fonction du diamètre D de conduite.

Distance x between parallels for $\text{Log } H = f(\text{log } Q)$ vs. pipe diameter.



7/ Conduite en béton armé. Prise soudée de 27. Soudage extérieur.

27 welded reinforced concrete pipe tapping.

La formule (1) peut encore se mettre sous la forme :

$$\text{Log } Q = \text{Log } K + 2 \text{Log } D + \alpha \text{Log } H \quad (2)$$

Pratiquement nous avons constaté que :

a) Pour une valeur de D on a, en coordonnées bilogarithmiques, une droite brisée dont les coefficients angulaires sont très voisins.

b) Pour une série de valeurs de D , ces droites sont sensiblement parallèles.

c) Les écartements des droites tels que x_1, x_2 etc., comptés sur la perpendiculaire commune $X_1 X_2$, figure 5, reportés sur un graphique millimétrique en fonction des valeurs de D , se plaçaient sensiblement sur un arc de parabole (voir figure 6).

d) Cette constatation est intéressante puisqu'elle permet :

- de rectifier des erreurs éventuelles de tarage;
- d'extrapoler ou d'interpoler pour obtenir la valeur du coefficient K pour un diamètre de conduite non essayé.

A partir des tarages industriels ainsi réalisés, il a été possible de dresser :

- un abaque destiné aux mesures instantanées pour lesquelles la pression différentielle est contrôlée au moyen d'un manomètre à eau;

Les mesures de débits peuvent être faites, dans ces conditions, avec une erreur totale inférieure à $\pm 4 \%$.

- un tableau des coefficients utilisés pour les mesures permanentes avec enregistrement ou totalisation des débits. L'erreur commise sur la mesure atteint alors $\pm 6 \%$ au maximum.

Limite d'utilisation des cannes.

Grâce à la mise au point d'appareils industriels, soit enregistreurs, soit transmetteurs de pression différentielle dont l'échelle peut être modifiée, sans changer le couple actif, par simple changement du diamètre de l'une des branches de l'U, il est possible d'utiliser une échelle totale de 0,20 m d'eau donnant une lecture encore possible avec une différentielle de l'ordre de 10 mm d'eau correspondant à une vitesse de l'ordre de 0,30 m/s dans la conduite.

A première vue, il ne semble pas que l'on soit limité pour la mesure des grandes vitesses. En réalité, l'expérience a montré qu'au-delà de 4 m/s il pouvait se produire des vibrations susceptibles de provoquer la rupture de la canne.

En pratique, on se limitera aux mesures correspondant à des vitesses d'écoulement dans la conduite, comprises entre 0,30 m/s et 3 m/s.

Pour que ces vibrations ne compromettent pas la résistance mécanique de la canne de $d = 21$ mm, nous nous limitons pratiquement à :

$$V = 2 \text{ m/s pour } D = 1 \text{ m}$$

Au-delà, il faut envisager un support profilé supportant et guidant la canne, tel que celui représenté par les figures 1 et 2, qui a été exécuté pour une conduite de $D = 1,50$ m.

Influence de l'orientation de deux prises dynamiques.

L'axe commun aux deux prises de pression dynamiques doit coïncider avec l'axe de la conduite.

Nous avons, à l'occasion du tarage de chaque nouvelle canne, procédé au tracé de la pression différentielle en fonction de l'angle entre les prises de la canne et l'axe de la conduite. Jusqu'à 10° de part et d'autre de l'axe de la conduite, l'erreur de mesure était nulle.

Symétrie des lectures et inversion du débit.

La canne étant symétrique, pour déceler un défaut d'usinage, il est toujours procédé, à l'occasion de la première mise en service, à deux mesures avec inversion de 180° de l'axe des prises entre les deux relevés.

Cette vérification est importante si la conduite doit véhiculer un fluide dont le sens de circulation peut s'inverser. Il suffit alors d'utiliser un enregistreur à zéro décalé.

Pertes de charge créées par une canne.

Il est indéniable que la présence d'une canne cylindrique dans un écoulement crée une perturbation.

Toutefois, il n'a jamais été possible de mesurer avec une précision suffisante, la perte de charge pouvant résulter de la présence de la canne dans la conduite. Celle-ci peut, en première approximation, être admise comme étant négligeable.

Prix de revient d'une canne.

Le coût de la main-d'œuvre représente la plus grande partie du prix de revient d'une canne, bien que le métal utilisé (alliage inoxydable spécial) coûte environ 18 F le kg.

En outre, les temps d'usinage diffèrent peu quel que soit le diamètre de la canne.

Pratiquement, le prix de fourniture peut être considéré comme indépendant du diamètre pour les valeurs comprises entre 0,20 et 1 m.

Il est, au 1^{er} janvier 1969, de 26 100 F hors taxes, télémesure et pose comprise, sauf pour les conduites en béton armé où les frais de pose sont relativement importants.

Le prix de la canne proprement dite n'est que de 15 % du prix ci-dessus.

Quelques réalisations.

Les investigations d'un champ de vitesse mises à part, mon service utilise actuellement des cannes pour la mesure des débits depuis une douzaine d'années environ.

Il a été installé, en permanence dans des cas très particuliers, environ quinze cannes réparties dans le réseau de distribution. Les mesures sont transmises par lignes P.T.T. dites « liaisons spécialisées » au dispatching du service, c'est-à-dire à une distance à vol d'oiseau comprise entre 3 et 15 km.

La figure 7 représente la pièce spéciale qui doit être mise en place sur une conduite en béton.

Ces cannes sont visitées périodiquement, à la même cadence que les débitmètres ordinaires, par l'équipe d'entretien préventif, sans qu'aucune sujétion spéciale ne soit appliquée.

Je vais, avant de répondre à vos questions et en vous remerciant de votre aimable attention, vous présenter quelques clichés caractéristiques des cannes et de leurs équipements standardisés.

Conclusions

Arrivé au terme de mon exposé, au cours duquel je vous ai présenté un appareil de mesure de débit peu connu, je crois utile, pour conclure, de vous rappeler ses principales caractéristiques :

C'est un appareil simple et relativement à bon marché, conçu pour pouvoir être introduit aussi facilement que possible dans une conduite afin de pouvoir suivre, soit l'évolution, soit la répartition des débits dans les mailles d'un réseau de distribution en fonction des différents paramètres d'exploitation.

A ce titre, il est un instrument précieux pour la détermination des données de base permettant de fixer les conditions économiques optimales d'exploitation.

En contrepartie, il ne permet pas d'obtenir la précision donnée par les appareils déprimogènes.

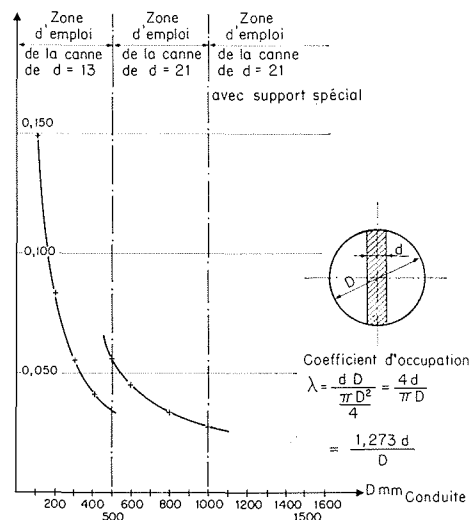
Ce n'est pas son rôle. Il n'a pas été conçu pour cela.

Grosso modo, on peut estimer qu'il permet, en moyenne, de mesurer un débit à ± 5 % près.

Par contre, ses indications restent constantes et comparatives dans le temps. Son coefficient est le même pour des cannes identiques quant à l'usinage, la vérification en est facile.

Il répond donc bien au problème qui était posé. Il a rendu des services importants qui, par les économies d'exploitation réalisées, ont permis d'amortir largement les frais d'études. La figure 8 résume les conditions d'utilisation de la canne.

J'espère qu'il vous a été agréable d'en connaître l'existence et les principales caractéristiques.



8/ Cannes traversantes.

$$\text{Rapport } \lambda = \frac{S. \text{ Canne}}{S.O. \text{ section conduite}} = \frac{4}{\pi} \frac{d}{D} = 1,273 \frac{d}{D}$$

$$\text{Traversing probes. } \lambda = \frac{S. \text{ probe}}{S.O. \text{ pipe cross-section}} = \frac{4}{\pi} \frac{d}{D}$$

M. le Président remercie M. MATHIVET de son exposé très complet et ouvre la discussion.

M. ORGERON (du Laboratoire Central d'Hydraulique de France, à Maisons-Alfort) décrit, en s'aidant de projections, un appareil — mis au point par le Laboratoire à l'instigation de la S.A.F.E.G.E. et fabriqué par la Société HYDROTECHNICA — destiné à déterminer la vitesse et le sens de l'écoulement dans une conduite (en particulier d'adduction d'eau) sans que son installation et son fonctionnement perturbent le réseau alimentant celle-ci.

« L'élément de mesure comporte deux dispositifs : le capteur de vitesse qui est une hélice dont la rotation détermine des variations d'impédance entre deux électrodes, et l'indicateur de direction qui est une girouette installée dans une tuyère. L'axe de l'hélice et celui de la tuyère sont parallèles à l'axe de la conduite. Selon le sens de l'écoulement, la girouette occulte, ou non, un faisceau lumineux dirigé sur un élément photosensible. Au point de vue encombrement, l'élément de mesure est inscrit dans un cylindre de 38 mm de diamètre, mais, sauf au droit de la tuyère, il est profilé comme une canne ovoïde et ne mesure que 20 mm d'épaisseur perpendiculairement au courant. Cela permet de réduire les perturbations et les risques de vibrations.

« L'appareil est construit en matière plastique. Un dispositif électronique enregistre les impulsions électriques émises par l'hélice et donne directement la vitesse moyenne et le débit dans la conduite. Placé au centre d'une conduite, il mesure le débit dans la conduite à 4 % près en moyenne. »

M. VEYRIE signale que la S.A.F.E.G.E. a utilisé le micromoulinet présenté par M. ORGERON pour l'étude du réseau de Madrid. Ce micromoulinet a été conçu pour être utilisé dans un collier de prise en charge \varnothing 40 mm.

Les mesures ont pour but la détermination des coefficients de pertes de charge qui permettent ensuite de mener le calcul sur ordinateur.

Les difficultés pratiques portent sur :

- la connaissance des sections; il faut récupérer la « rondelle de perçage » pour préciser le diamètre de la conduite;
- la réalisation de la simultanéité des différentes mesures de débit et de pression sur les manomètres reportés sur le réseau.

La mesure de la vitesse de l'eau se fait au centre de la conduite, car on constate que le rapport entre la vitesse au centre et la vitesse moyenne ne varie pas de plus de $\pm 2\%$ quand le débit varie (de 1 à 2) pour un point considéré.

La détermination de ce rapport est obtenue par une expérimentation préliminaire au cours de laquelle on établit le profil des vitesses dans la section considérée par une série de mesures faites en déplaçant le moulinet le long d'un diamètre de la conduite. Une mesure initiale et une finale au centre de cette conduite permettent de contrôler si le débit a varié et donnent éventuellement les éléments pour des corrections des mesures par interpolation. On vérifie que le rapport de la vitesse au centre à la vitesse moyenne est constant en déterminant ce rapport pour deux débits extrêmes.

Abstract

The use of probes derived from the Pitot tube for pipe flow measurement

by P. Mathivet *

1. The author states the problem as having to determine a simple instrument capable of being introduced without difficulty and at little cost at any point in the pipes constituting the Paris Prefecture's water distribution loop system.

His choice fell on a cylindrical tube derived from the Pitot tube, featuring two dynamic pressure tappings and no static pressure hole in order to increase the differential pressure.

2. On calibrating this probe in an infinite medium in the French Navy's hull testing tank, it was found that the conventional formula $Q = K D^2 H^\alpha$ relating discharge to average velocity V_m gave two values of the exponent α , both of which were close to 1/2, and that the discontinuity invariably occurred at a velocity in the neighbourhood of 1 m/sec.

3. The author decided to always measure the velocity in the centre V_0 in order to reduce the margin of uncertainty to a minimum. He made measurements on a large number of pipes with widely varying velocity distribution curves in order to determine the maximum probable variation range of coefficient $v = \frac{\text{mean velocity}}{\text{central velocity}}$

4. The author was then able to plot a graph consisting of a family of straight lines on a double logarithmic scale, the spacing of which was related to pipe diameter by a parabolic law.

5. The author then goes on to show successive applications of the probe in the Paris Prefecture's water distribution system, including one probe permanently installed in a 1.5 m diameter pipe.

6. Finally, the author argues in favour of the use of these probes for investigation and supervisory purposes—and not as precision instruments—as a means of establishing basic requirements for operation ensuring optimum running economy, combined with satisfactory service to the consumer.

* Ingénieur E.S.E., Ingénieur des Services Techniques, chargé des Etudes et Réalisations au Service des Eaux de la Direction des Services Industriels et Commerciaux, Préfecture de Paris.