COMMISSION DES MESURES HYDRAULIQUES
Rapport 7

RAPPORT SUR LE TUBE DE PITOT APPLIQUÉ A LA MESURE DE LA VITESSE DES LIQUIDES

PAR M. CAMICHEL,
Membre de l'Institut, Directeur de l'Institut Électrotechnique de Toulouse.

PRINCIPE.

Le tube de Pitot, sous sa forme primitive, donnée par Pitot en 1732, était simplement constitué par un tube vertical ouvert aux deux bouts et recourbé de manière à diriger son extrémité inférieure à l'encontre du courant, dans lequel il était plongé. Dans ces conditions, le niveau de l'eau à l'intérieur du tube s'élevait au-dessus de celui de la surface libre du liquide (*fig.* 1) d'une hauteur h, que Pitot

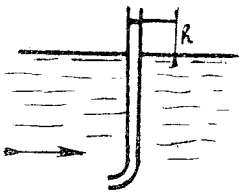

Fig. 1.

supposait liée à la vitesse du courant au point correspondant du fluide par la relation

$$h = \frac{V^2}{2g}.$$

Sous cette forme, le tube de Pitot, n'était guère pratique, la mesure de la hauteur h étant rendue difficile par suite des mouvements de la surface libre du courant. Darcy a perfectionné le dispositif en

adjoignant un second tube (*fig.* 2) dont l'extrémité recourbée vient se placer dans le prolongement de celle du premier tube et se termine par un orifice identique.

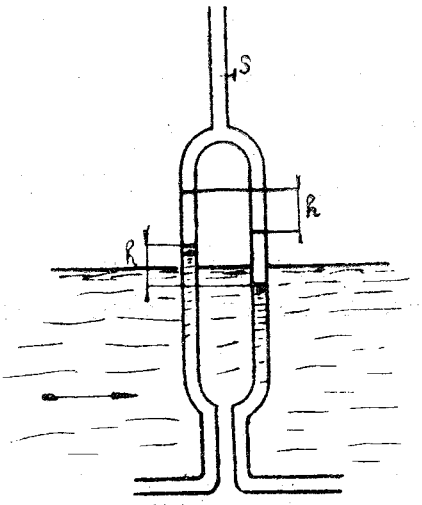

Fig. 2.

Dans ces conditions, en réunissant les deux tubes de verre par leur partie supérieure que l'on munit d'une prise verticale sur laquelle est placé un robinet S, on peut, en aspirant au moyen de cette prise verticale, faire remonter les niveaux de l'eau dans les tubes, à une hauteur qui rende facile l'observation de la différence de cote qui existe entre ces niveaux; cette différence de cote varie comme le terme $\frac{V^2}{2g}$ et permet par suite d'obtenir la vitesse au moyen d'une formule telle que

$$V = K\sqrt{2gh}, \qquad (1)$$

dans laquelle K est une constante que l'on détermine par un tarage préalable.

Dans les modèles utilisés actuellement (*fig.* 3), l'appareil se compose d'un tube orienté parallèlement aux filets liquides et percé de deux orifices dont l'un, placé à l'extrémité, est normal au courant, tandis que l'autre, percé dans la paroi latérale du tube, mesure la pression au point considéré. Ces orifices, au moyen de conduits distincts, placés dans la monture du tube, sont réunis à deux tubes piézométriques qui permettent, soit directement, soit par aspiration, de repérer les positions respectives des deux niveaux correspondants et de déduire, de

la dénivellation h correspondante, la vitesse par la formule (1); la constante K peut prendre différentes valeurs, mais elle est, comme

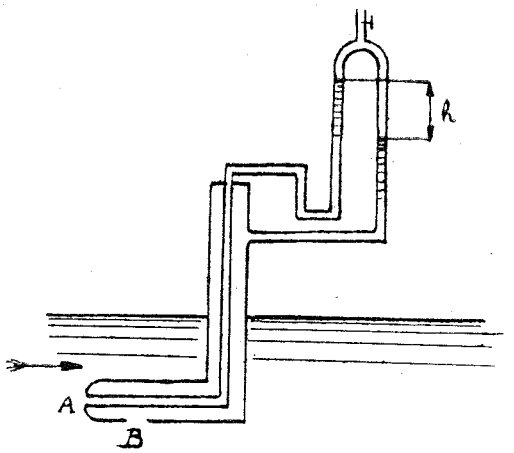

Fig. 3.

nous le verrons, généralement égale à l'unité pour les formes courantes de tubes et les modes d'écoulement usuels de l'hydraulique.

THÉORIE DU TUBE DE PITOT, INFLUENCE DE LA POSITION DE L'ORIFICE AVAL.

La formule

$$V = \sqrt{2g(H_1 - H_2)}, \tag{2}$$

dans laquelle H_1 représente la hauteur d'eau correspondant à l'orifice A normal aux filets, et H_2 celle qui correspond à l'orifice B parallèle aux filets, est celle qui convient pour les formes usuelles de tubes, le coefficient étant, comme indiqué plus haut, égal à l'unité.

L'étude chronophotographique nous a montré (1) qu'en disposant le tube parallèlement aux filets, la vitesse des particules liquides arrivant contre l'orifice A devient très faible au voisinage de celui-ci, puis change de direction et croît le long des parois latérales du tube pour reprendre en B sa valeur normale; plus exactement, ce phénomène se passe sur la trajectoire qui limite la couche frontière extrêmement mince qui existe le long de la paroi du tube. En raison de la

(1) L. Escande et M. Ricaud, *C. R. Acad. Sc.*, t. 179, p. 1590.

continuité des pressions dans la traversée de cette couche frontière, et, d'autre part, de l'absence de perte d'énergie appréciable sur cette portion de trajectoire, on voit que l'équation de Bernoulli est rigoureusement applicable entre les points A et B, à condition que ces points soient convenablement choisis; il faut, en particulier, que ces points aient une distance suffisante pour que les conditions que nous venons d'indiquer soient réalisées.

Il résulte de ceci que la différence des hauteurs piézométriques correspondant aux orifices A et B représente exactement le terme $\frac{V^2}{2g}$, ce qui justifie la formule (2).

Nous signalerons, à ce sujet, les erreurs d'interprétation faites parfois au sujet de l'application du théorème de Bernoulli à l'écoulement autour d'un corps immergé. C'est ainsi que, dans le cas d'une sphère, certains auteurs prétendent que la pression devrait être la même aux deux points C et D (*fig.* 4), si l'équation de Bernoulli était appli-

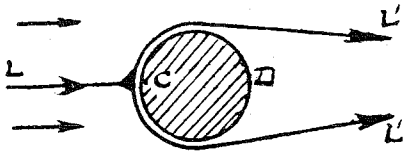

Fig. 4.

cable, du fait qu'en ces deux points la vitesse doit être nulle par raison de symétrie. Il n'en est rien, car l'expérience montre que les points C et D ne sont pas situés sur une même trajectoire; il existe, en effet, à l'aval de la sphère, une zone tourbillonnaire, séparée de la zone de mouvement direct par une surface limite L'. Or, comme l'on sait, l'équation de Bernoulli n'est applicable que le long d'un même filet, la constante de Bernoulli pouvant, *a priori*, être différente pour des trajectoires distinctes, et ne prenant une valeur commune pour l'ensemble des lignes de courant que dans l'hypothèse où toute la masse serait en mouvement irrotationnel, d'après le théorème de Lagrange.

Si l'on suppose en première approximation les vitesses assez faibles à l'intérieur de la zone limitée par la ligne L', pour que leur carré soit négligeable, il en résulte que la pression conservera dans toute cette zone une valeur constante et égale à la valeur qu'elle possède sur la ligne de discontinuité L'; or, sur cette ligne, qui constitue la partie terminale de la trajectoire LL' passant par le point C, la vitesse n'est pas nulle, et, si V désigne sa valeur, la pression sur cette ligne

sera inférieure à la pression en C du terme $\frac{V^2}{2g}$. On peut donc expliquer, sans faire appel à la viscosité et sans contradiction vis-à-vis du théorème de Bernoulli, que la pression C soit inférieure à ce qu'elle est en D.

L'influence de la position de l'orifice aval résulte de la théorie précédente qui montre qu'il est nécessaire, comme nous l'avons indiqué, d'éloigner assez la prise B, pour obtenir un coefficient égal à l'unité.

Ce point a été précisé dans une série de recherches faites par M. Teissié-Solier (1).

Dans ces expériences, M. Teissié-Solier a recherché la variation du coefficient d'un tube de Pitot en fonction de la position de l'orifice B parallèle à la direction générale de l'écoulement. Le tube de Pitot étudié était immergé dans un champ uniforme de vecteurs vitesses réalisé dans un ajutage de 30 cm de diamètre. La branche horizontale de l'appareil était constituée par un tube en laiton de 16 mm. de diamètre extérieur et 50 mm. de longueur. Cette branche était terminée à sa partie amont par un hémisphère ajusté sur le tube. La branche verticale, servant de support, comprenait une première partie fuselée, soudée à l'équerre avec la branche horizontale, et une deuxième partie, formée d'un tube de 10 mm de diamètre. Ce dernier traversait la paroi de la conduite à l'intérieur d'un presse-étoupe et permettait d'assurer, d'une part, la fixation de l'appareil et, d'autre part, son raccordement avec un tube piézométrique.

Le but de cette étude étant de rechercher la variation de coefficient du tube en fonction de la position du deuxième orifice de prise de pression, cela revient à déterminer la répartition des pressions le long de la section du tube horizontal par un plan méridien quelconque; dans ce but on a étudié une série de tubes identiques à celui qui vient d'être décrit et dans lesquels le deuxième orifice occupe une position différente le long de la courbe méridienne. Partant d'un premier tube, pour lequel l'orifice était percé à l'extrémité amont de l'hémisphère, suivant l'axe de la branche horizontale, M. Teissié-Solier a successivement fait réaliser des appareils dans lesquels l'axe de cette prise de pression était successivement décalé de 10° en 10° jusqu'à atteindre un décalage total de 90°, l'orifice se trouvant alors placé sur la verticale passant par le centre de l'hémisphère. Au delà de cette dernière position, la deuxième prise de pression était percée sur la génératrice

---

(1) M. TEISSIÉ-SOLIER, *Thèse de Doctorat*, Faculté des Sciences de Toulouse, n° 51, 23 décembre 1931.

supérieure du tube horizontal, à des distances croissantes de l'extrémité amont de ce tube.

Chacun des tubes construits était étudié pour des vitesses variant de 0,50 à 2,75 m par seconde, vitesses déterminées par la méthode chronophotographique.

Les valeurs correspondantes de la pression H_1 étaient dans chaque cas, mesurées à l'aide d'un tube piézométrique; un deuxième tube permettait de contrôler la charge du réservoir alimentant la conduite et qui était maintenue constante, pour une vitesse déterminée V.

Si H_1 est la valeur de la pression indiquée par le tube possédant son orifice percé à l'amont sur l'axe de la branche horizontale et si Hn est la valeur de la pression indiquée par l'un des autres tubes utilisés, on peut écrire

$$V = K\sqrt{2g(H_1 - H_n)},$$

K étant le coefficient de l'appareil obtenu en assemblant le tube à orifice normal à la direction générale de l'écoulement et le tube particulier donnant la pression Hn.

M. Teissié-Solier représente les résultats qu'il a obtenus en prenant comme variable la quantité

$$y = 1 - \frac{H_1 - H_n}{\frac{V^2}{2g}},$$

dans laquelle $\frac{V^2}{2g}$ représente la hauteur correspondant à la vitesse V; d'autre part, les distances s sont comptées le long de la courbe méridienne, depuis l'orifice amont.

Si l'on construit les courbes donnant les valeurs de $H_1 - Hn$ en fonction de $\frac{V^2}{2g}$ on obtient, comme le montrent les figures 5 et 6 des droites qui permettent de déterminer la valeur du rapport

$$\frac{H_1 - H_n}{\frac{V^2}{2g}},$$

correspondant à chaque appareil.

Si l'on passe à la représentation de la quantité y on voit (*fig.* 7) que celle-ci, égale à l'unité pour $s = 0$ commence à décroître lorsque s augmente, devient nulle pour une position de l'orifice défini par $s = 6{,}7$ mm (soit 48°), et atteint un minimum égal à 0,63 pour θ voisin de 78°. Elle devient ensuite croissante, puis tend pratiquement vers 0. Cette dernière valeur est atteinte à nouveau pour une abscisse s sensiblement égale à quatre fois le diamètre du tube. Les variations

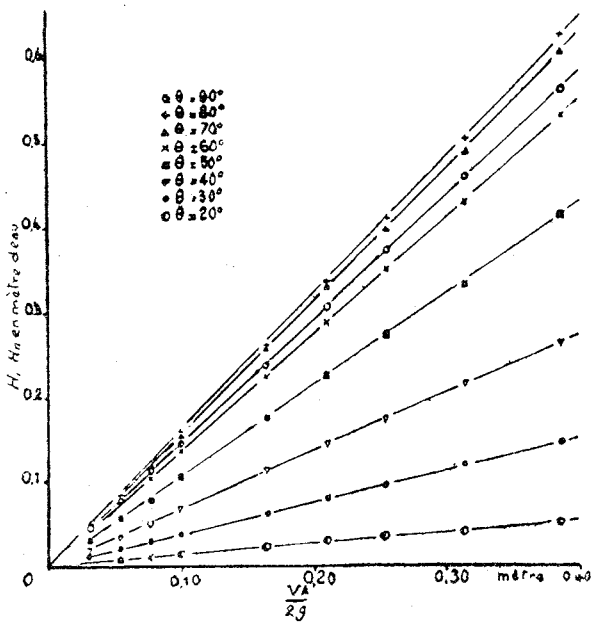
θ = 90°
θ = 80°
θ = 70°
θ = 60°
θ = 50°
θ = 40°
θ = 30°
θ = 20°
H, Ha en mètre d'eau
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0
0,10
0,20
0,30
mètre
V²/2g

Fig. 5.

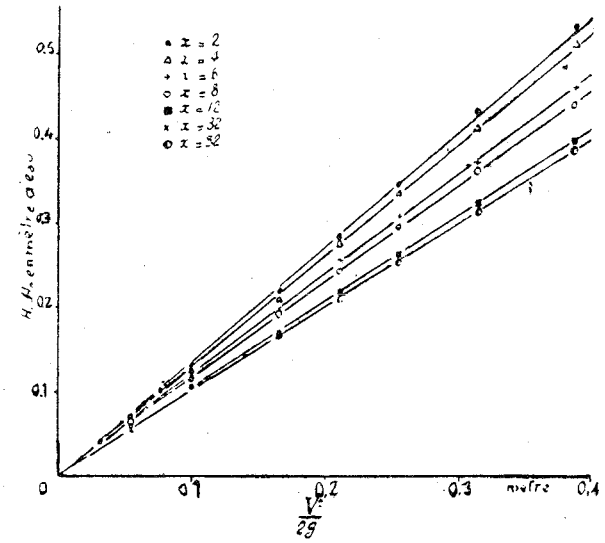
x = 2
x = 4
x = 6
x = 8
x = 12
x = 32
x = 52
H, Ha en mètre d'eau
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0
0,1
0,2
0,3
mètre
0,4
V²/2g

Fig. 6.

du coefficient K en fonction de la distance s sont représentées sur la figure 8.

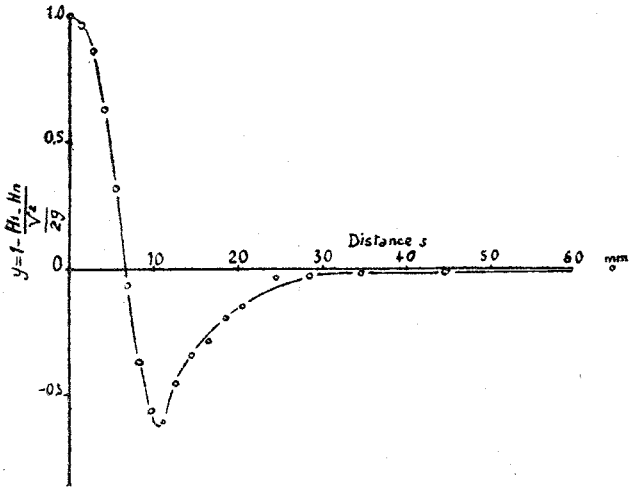

Fig. 7.

Les expériences de M. Teissié-Solier lui permettent donc de conclure de la manière suivante : pour une première position de l'orifice aval

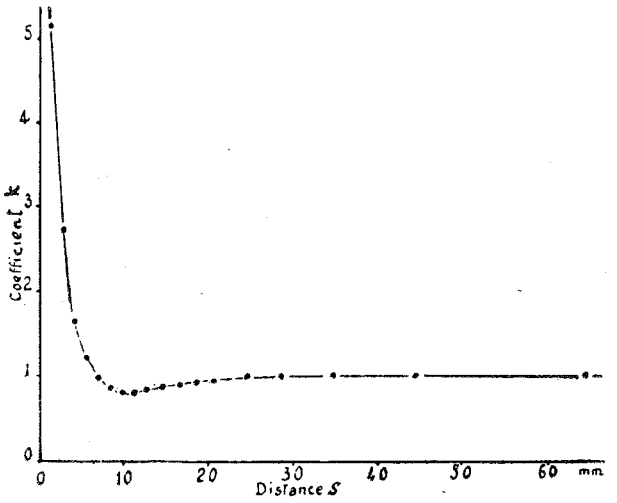

Fig. 8.

située sur l'hémisphère, pour $\theta = 48°$, le coefficient K prend la valeur unité; de plus, et, pratiquement, ce sera cette possibilité qu'il conviendra d'utiliser dans la construction du tube de Pitot, cette valeur

K = 1 est obtenue à nouveau, dès que le deuxième orifice est situé sur le tube horizontal à une distance s supérieure à quatre fois le diamètre du tube.

On peut encore remarquer qu'il est possible d'augmenter la sensibilité du tube en utilisant comme position du deuxième orifice aval, celle qui correspond à une valeur de $\theta = 78^0$ et qui donne au coefficient K une valeur inférieure à l'unité.

LE TUBE DE PITOT DANS LES DEUX RÉGIMES.

Dans d'autres expériences, M. Teissié-Solier a étudié l'emploi du tube de Pitot dans le régime non turbulent et le régime turbulent naturel de conduite, pour des vitesses atteignant jusqu'à 23 m/s.

On sait que l'expression donnant la valeur de la vitesse V mesurée au tube de Pitot, peut s'écrire sous la forme

$$V = K\sqrt{2g(H_1 - H_2)},$$

K étant le coefficient de cet appareil, H_1 et H_2, les pressions en hauteur d'eau, correspondant respectivement à l'orifice A, normal à la direction générale de l'écoulement, et à l'orifice B, parallèle à cette même direction.

Le tube de Pitot étudié était constitué par deux appareils distincts, la mesure étant faite en deux fois; chacun d'eux était formé d'une aiguille hypodermique de 0,8 mm de diamètre. L'une de ces aiguilles comportait un orifice percé en bout, l'autre, un orifice percé dans la surface latérale. Ces appareils étaient utilisés pour explorer, pour des charges variant de trois mètres à vingt-sept mètres :

a. La section droite d'un écoulement non turbulent correspondant au débouché à l'air libre d'un ajutage en forme de veine moulée, correspondant à un diamètre de 30 mm (*fig.* 9).

b. La section droite d'un écoulement turbulent constitué par la section d'un tube de laiton de 2 m de long et 30 mm de diamètre, distante de 20 mm de son extrémité aval.

L'aspect du jet, à la sortie, permettait de préciser la nature de l'écoulement : en régime non turbulent, la veine restait limpide sur une longueur de 10 mm; en régime turbulent, elle était, au contraire, nettement trouble, dès sa sortie.

Les deux tubes utilisés étaient successivement fixés dans l'étau d'une fraiseuse, ce qui permettait de réaliser facilement leur déplace-

ment dans la section étudiée. Les graduations correspondant au mouvement de cette machine assuraient d'autre part, le contrôle des diverses positions occupées par les tubes.

La comparaison, dans les deux cas envisagés, des débits réels Q_r et mesurés Q_m les premiers étant obtenus par jaugeage, les deuxièmes

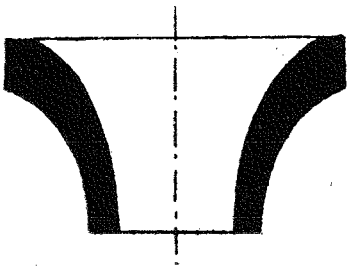

Fig. 9.

par intégration des vitesses, montrait que le coefficient du tube utilisé, dans les conditions ci-dessus précisées, demeurait constant et pratiquement égal à l'unité, dans les deux régimes d'écoulement étudiés, avec un écart inférieur à 1 %.

La figure 10 donne les variations, en régime non turbulent, de la

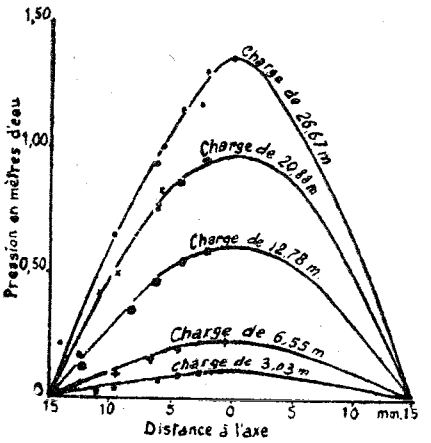

Fig. 10.

pression H_2 en fonction de la distance au centre de la section, pour diverses charges; la figure 11 donne la répartition des vitesses en régime turbulent dans un plan diamétral de la section du tube exploré. Enfin, le graphique de la figure 12 montre la comparaison des valeurs du coefficient K déduites de la considération des débits mesurés par

jaugeage et par les indications du tube de Pitot dans les deux expériences précédentes; les points correspondant au régime turbulent ou au régime non turbulent se groupent tous sur la première bissectrice.

Les expériences précédentes sont relatives à une forme assez particulière du tube de Pitot. Toutefois, le résultat présente un caractère général, comme des expériences effectuées récemment sur le canal de 1,48 m de largeur du Laboratoire, avec un tube de Pitot à double

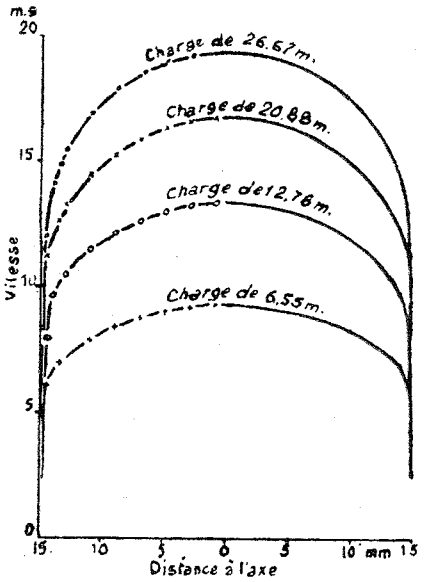

Fig. 11.

enveloppe, permettant la mesure de la vitesse en une seule fois, l'ont montré. On a trouvé, dans le régime turbulent étudié dans ces conditions, que le coefficient K du tube conservait une valeur peu différente de celle qu'il avait en régime non turbulent.

A propos du tube de Pitot, signalons une autre série d'expériences de M. Teissié-Solier, relatives à l'influence sur le coefficient K, des dimensions de la surface entourant l'extrémité amont d'un tube de Pitot.

Le Colonel Duchemin avait signalé, en 1842, que les indications données par l'orifice amont d'un tube de Pitot se trouvaient modifiées lorsqu'on augmentait les dimensions de la surface entourant cet orifice. Pour examiner le bien fondé de ces assertions, M. Teissié-Solier a étudié un tube de Pitot formé de deux appareils distincts, pour mesure en deux fois, et dont le tube portant l'orifice normal aux filets consistait en un tube de laiton, de 3 mm de diamètre intérieur et 5 mm

de diamètre extérieur. L'extrémité amont de ce tube était munie

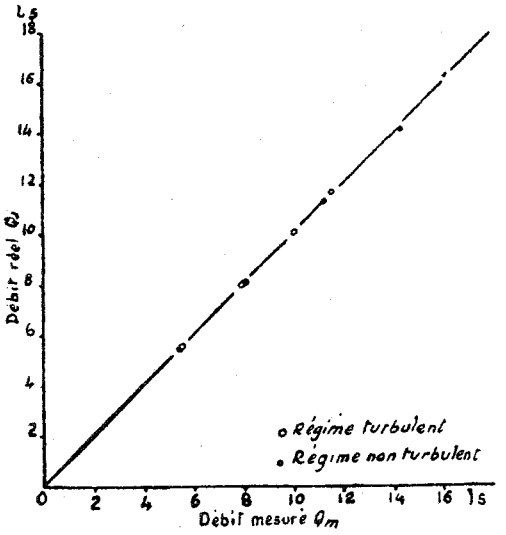

Fig. 12.

successivement de disques dont le diamètre variait de 10 à 40 mm (*fig.* 13) et le coefficient de cet appareil était déterminé, pour des

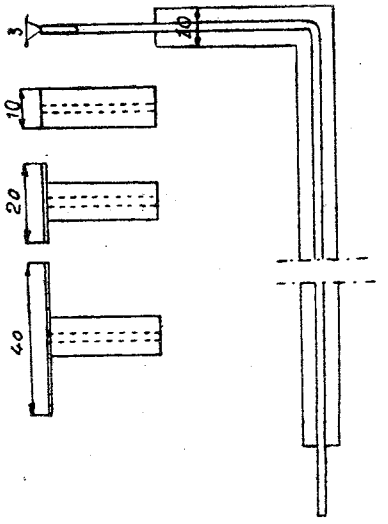

Fig. 13.

vitesses variant de 0,60 à 1,80 m par sec. Cette détermination était faite systématiquement dans les deux conditions suivantes :

a. En régime non turbulent, dans un champ uniforme de vecteurs vitesses;

b. En régime turbulent, au centre d'une conduite de 30 cm de diamètre.

On voit, sur la droite de la figure 14, la correspondance entre les

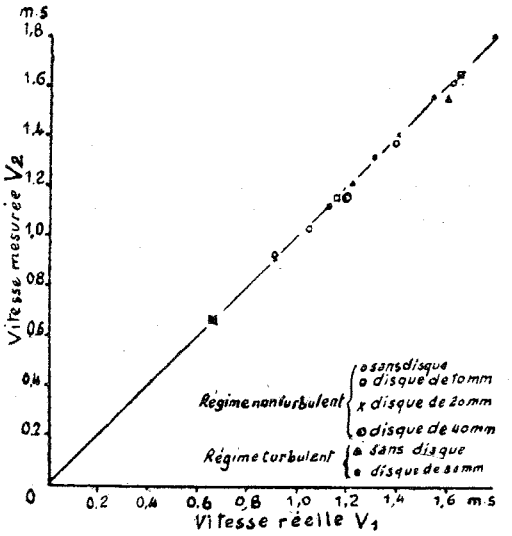

Fig. 14.

vitesses réelles V_1, déterminées par la méthode chronophotographique et les vitesses V_2 déduites des indications du tube. Cette figure montre, en particulier, que, quelles que soient les dimensions de la surface entourant l'orifice amont du tube, le coefficient de cet appareil reste constant et égal à l'unité. D'autre part, avec cette forme très particulière du tube de Pitot, on trouve à nouveau qu'il n'existe aucune différence systématique entre les indications correspondant au régime turbulent et au régime non turbulent.

EMPLOI DU TUBE DE PITOT AUX FAIBLES VITESSES.

Les faibles dimensions des modèles réduits et les vitesses peu élevées qui y sont souvent réalisées rendent parfois illusoire l'emploi du tube de Pitot; la graduation parabolique, qui correspond à une dénivellation de 0,05 m pour une vitesse de 1 m. par sec. ne permet pas de mesure précise, à moins de précautions très grandes, pour les vitesses inférieures à 0,50 m/s.

L'un de nous (1) a imaginé un dispositif qui supprime cet inconvénient en substituant au procédé habituel de mesure des pressions, un procédé de mesure des vitesses.

On forme un circuit (*fig.* 15); comprenant l'orifice A normal aux filets, une pompe P, entraînée par un moteur muni d'un tachymètre

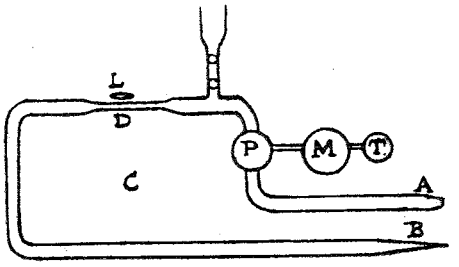

Fig. 15.

T, un tube de faible diamètre D, enfin l'orifice B, parallèle aux filets. La différence de pression $P_A - P_B$, entre les deux orifices du tube de Pitot, détermine une circulation d'eau à l'intérieur du circuit. On règle alors la vitesse de la pompe P de façon à réduire à zéro la vitesse de l'eau dans le circuit; la contre-pression produite par cette pompe

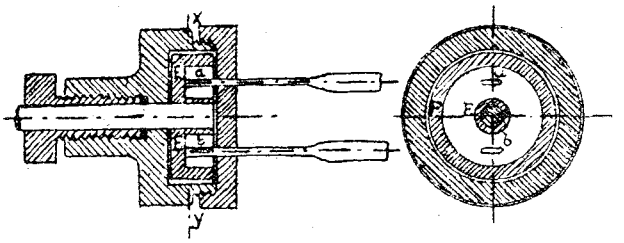

Fig. 16.

neutralise alors exactement la différence de pression $P_A - P_B$; on s'en rend compte en observant soit un flotteur, soit, au moyen d'une loupe L, des poussières en suspension dans le tube D et qui demeurent immobiles lorsque l'équilibre est réalisé.

Le tachymètre T donne la vitesse de la pompe au moment de l'équilibre et, de cette vitesse, on déduit, par un tarage préalable, la vitesse V de l'eau.

La pompe est constituée (*fig.* 16) par une cloche E, tournant dans

(1) C. Camichel, L. Escande et M. Ricaud, Sur la détermination des vitesses dans les liquides et le paradoxe de Du Buat (*C. R. Acad. Sc.*, t. 132, p. 29). — C. Camichel, L. Escande et M. Ricaud, Sur les lois de la similitude et la technique des modèles réduits (*Rev. gén. Élec.*, t. 20, 10 juillet 1926, p. 54-60).

un carter; les orifices *a* et *b* jouent le même rôle que ceux d'un tube de Pitot placé dans le courant d'eau provoqué par la rotation de la cloche E; ces orifices sont, conformément aux résultats indiqués antérieurement, placés à la proue et à la poupe du corps immergé.

Pour le tarage, le tube de Pitot proprement dit est placé à l'intérieur d'un ajutage, où l'on réalise un mouvement en bloc de l'eau, c'est-à-dire un champ de vecteurs vitesses uniforme.

La vitesse V est mesurée par la méthode chronophotographique.

La courbe de tarage (*fig.* 17) montre :

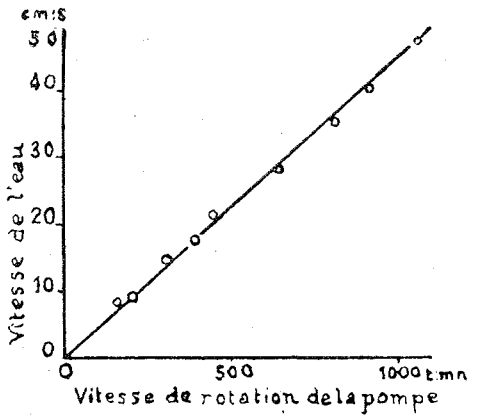

Fig. 17.

a. Que l'appareil permet de mesurer des vitesses de l'ordre de 5 cm /s correspondant à une dénivellation de l'ordre de 3 à 5 centièmes de millimètre, donc bien difficiles à déterminer directement;

b. Que la graduation de l'appareil est linéaire.

On peut d'ailleurs contrôler la vitesse de l'eau dans le circuit par l'emploi d'un fil conducteur, placé diamétralement en D. Ce fil, parcouru par un courant électrique, constitue l'une des branches d'un pont de Wheastone préalablement équilibré. La moindre variation de vitesse, dans le circuit de l'eau, se traduit par une variation de la température et, par suite, de la résistance du fil, de telle sorte qu'il se produit un déséquilibre du pont, qu'un galvanomètre décèle.

Ce procédé a été récemment appliqué par MM. Crausse et Dupin (1) à l'étude des tourbillons alternés qui se produisent derrière un obstacle.

---

(1) P. Dupin, Étude expérimentale sur les tourbillons alternés de Bénard (*Thèse de Doctorat*, 21 juin 1930, p. 20), Édouard Privat, Toulouse et Gauthier-Villars, Paris, éditeurs.

REMARQUES SUR L'INFLUENCE DE LA FORME DES TUBES.

Nous venons d'indiquer le détail des recherches faites par M. Teissié-Solier sur une forme particulière et d'ailleurs courante du tube de Pitot. Il convient de remarquer que la forme même du tube paraît être sans influence sur la valeur du coefficient K, sous réserve des deux conditions suivantes :

a. La forme doit être suffisamment rationnelle pour ne pas troubler notablement l'écoulement;

b. La position du deuxième orifice doit être suffisamment éloignée vers l'aval.

En effet, dans des expériences relatives à l'étude de l'écoulement sur les barrages déversoirs, M. Escande (1) a eu l'occasion de faire varier la forme du tube, tant en ce qui concerne la mesure face au courant que celle de la pression relevée par l'orifice latéral. Les différents modèles utilisés lui ont fourni les mêmes résultats; ces résultats étaient d'ailleurs contrôlés, d'une part, par des déterminations chronophotographiques de la vitesse, d'autre part, par la mesure globale du débit; ils ont conduit à adopter, pour le coefficient K, la valeur unité.

M. Boujon (2), en étudiant le déversoir à talus d'Herschel, a obtenu des résultats analogues, tant en ce qui concerne l'influence de la forme du tube qu'en ce qui a trait au coefficient de la formule.

CONCLUSION DE L'ÉTUDE DU TUBE DE PITOT.

On voit, d'après ce qui précède, que le fonctionnement du tube de Pitot est susceptible d'être interprété par une théorie très simple.

Son coefficient, indépendant dans des limites étendues de la forme du tube, pourvu que celle-ci n'apporte pas de perturbation spéciale à l'écoulement, demeure égal à l'unité en régime non turbulent et en régime turbulent naturel.

---

(1) L. Escande, *Thèse de Doctorat*, nº 40, mars 1929, Toulouse.

(2) M. Boujon, Étude du déversoir d'Herschel (*Ann. Ener.*, nº 210, juillet-août 2928).

D'un emploi très pratique, sous sa forme courante, pour la mesure des vitesses supérieures à 1 m/s, le tube de Pitot, au moyen de dispositifs spéciaux comme celui de la pompe compensatrice, peut enfin servir à la mesure des faibles vitesses, ce qui, joint à la possibilité de l'emploi d'aiguilles hypodermiques, permet son utilisation pratique dans les études sur modèles réduits à petite échelle.