Les jaugeages dans les ouvrages et les centrales hydroélectriques

(Résumé historique)

PAR LE PROF. STEPONAS KOLUPAILA

NOTRE DAME (INDIANA), U.S.A.

Water measurements in hydraulic structures and power plants

(Historical sketch)

BY PROF. STEPONAS KOLUPAILA

NOTRE DAME (INDIANA), U.S.A.

Ce mémoire présente une revue du développement de la technique des jaugeages en milieux artificiels.

La méthode volumétrique, l'écoulement par orifices et déversoirs, les tuyères et modules, l'écran hydrométrique, les jaugeages par tubes de Pitot et par moulinets dans les canaux découverts et dans les conduites forcées, les méthodes d'Allen et de Gibson, les méthodes chimiques et électriques, ainsi que d'autres, sont présentés.

La mention de quelques essais comparatifs termine le mémoire.

Paper presents a short review of the development of hydrometric technique in artificial conditions.

Volumetric measurements, orifices, weirs, throats and flumes, hydrometric screen, Pitot tubes and current meters, in open channels and in penstocks, salt-velocity, dilution, impact, ultrasonic, magnetic, thermodynamic and other methods are mentioned.

Some comparative tests are listed.

Les mesures hydrauliques sont aussi anciennes que l'hydraulique même. On ne peut guère s'imaginer que les exploitants des anciens réseaux d'irrigation en Egypte, Mésopotamie et en Asie centrale aient pu assurer une juste répartition des eaux parmi les irrigants, sans avoir recours à des appareils de jaugeage quelconques. Frontin (Sextus Julius Frontinus), curateur des eaux à Rome à la fin du premier siècle de notre ère, nous a laissé une description de la méthode de mesure employée à l'époque, méthode utilisant des buses et négligeant la vitesse et la pression. L'évolution des techniques de jaugeage a suivi le progrès de la technique en général, surtout pendant les cent dernières années. De très nombreuses idées ont été adoptées et exploitées dans ce domaine.

Water measurement is as old as is the hydraulic engineering. The old irrigation systems of Egypt, Mesopotamia, Central Asia, must have used certain devices for a just water distribution among the customers. Sextus Julius Frontinus, the water commissioner in Rome at the end of the first century A.D., described the water measuring of those times through nozzles dis-regarding velocity and pressure. Development of water measurement technique followed the progress of engineering, particularly during the last 100 years. Very many ideas were adopted and put into practice in this field.

An attempt is made here to show the variety of hydrometric methods and instruments as

L'auteur essaie de mettre en évidence la grande diversité des méthodes hydrométriques et des appareils utilisés dans les milieux « artificiels » des barrages, canaux, centrales hydroélectriques et des laboratoires d'hydraulique.

MESURES VOLUMÉTRIQUES

La méthode volumétrique de mesure des débits est la plus précise de toutes. Son seul inconvénient pourrait résider en la nécessité de prévoir un très grand réservoir. Le réservoir construit pour le jaugeage du débit en aval du barrage d'Assouan, en Egypte, est le plus grand que l'on connaisse. Construit en 1912, il présentait une surface de 70×72 m, une profondeur de 5 mètres, soit un volume utile de 22 000 m³.

Les réservoirs d'accumulation, les écluses, des canaux amont et de fuite cloisonnés, ont tous été utilisés comme réservoirs pour les essais de turbines et de déversoirs. Les faibles débits, tels que débits de fuite des vannes et des robinets, sont normalement mesurés à l'aide de capacités jaugées portatives.

Tous les laboratoires d'hydraulique se servent de la méthode volumétrique comme étant la plus sûre, soit en mesurant les variations de niveau dans un réservoir, soit en pesant le débit sortant au moyen d'une balance. Le laboratoire à ciel ouvert de Walchensee, en Bavière, comporte un lac constituant un réservoir volumétrique de 1 600 m³.

ORIFICES

La mesure des débits se fait très facilement en faisant passer l'eau par un orifice; il suffit alors de mesurer seulement la hauteur d'eau. De nombreux dispositifs anciens étaient basés sur l'écoulement de l'eau à travers un ou plusieurs orifices ou fentes, dans des conditions d'approche en amont données; tels sont les modules utilisés dans les réseaux d'irrigation, le « pouce d'eau », le « pouce du mineur », la jauge de Max Clark, le pouce normalisé de l'Etat du Colorado, le « pouce du constructeur de moulins », le calice romain. Des dispositifs ingénieux et admirés par tous, dénommés « châteaux d'eau » (*castellum aquae*, *Wasserschloss*, *Wasserkunst*) furent mis au point par S.J. Frontin en l'an 97, M. Mersenne en 1644, E. Mariotte en 1686, M. Bion en 1709, J. Leupold en 1724, J.-V. Poncelet en 1832, K.R. Bornemann en 1849, H. Mangon en 1863, et K.M. Ignatov en 1914.

Une « danaïde » fut mise au point par E. Brauer en 1892, sous forme d'un « tonneau sans fond » comportant une série d'orifices alignés

applied in artificial conditions of dams, canals, power plants, and hydraulic laboratories.

VOLUMETRIC MEASUREMENTS

The volumetric method of discharge measurement is the most correct. The only objection could be the size of the container. The largest known container for calibration of a dam outlet was built in 1912 below the Asswan Dam in Egypt. It had an area of 230×236 feet, a depth of 17 feet, a working volume of 776,000 cubic feet.

Storage reservoirs, ship locks, bulkheaded forebays and tailraces, sometimes penstocks were used as containers for turbine and spillway tests. Small discharges, like leakage through gates and valves, are usually measured by portable volumetric tanks.

Every hydraulic laboratory uses the most reliable volumetric method, either by level difference in a tank, or by weighing outflow on scales. The Walchensee open-air laboratory in Bavaria has a volumetric pond of 56,500 cubic feet volume.

ORIFICES

Flow measurement is very convenient when water is compelled to pass through an orifice and head of water is to be observed only. Many old devices were based on water flow through one or more orifices or slots under certain approach conditions: irrigation modulus, water inch, miner's inch, the Max Clark's gauge, Colorado State inch, millwright inch, Roman calix. S.J. Frontinus in 97, M. Mersenne in 1644, E. Mariotte in 1686, N. Bion in 1709, J. Leupold in 1724, J.V. Poncelet in 1832, K.R. Bornemann in 1849, H. Mangon in 1863, K.M. Ignatov in 1914, designed ingenious devices, admired by people as water castles (*castellum aquae*, *Wasserschloss*, *Wasserkunst*).

In 1892, E. Brauer introduced a *danaide*, a "bottomless barrel", with series of orifices in a row, to use for measurement of large flows. Such an installation was used about 1900 in France for water wheel tests: "The discharge is passed into a large funnel shape vessel the upper part of which is cylindrical and pierced with 80 rectangular openings disposed around the periphery. The water flows out of the openings, 80 in all, and one of these streams is passed through a water meter as a measure of the total volume".

sur un rang, pour la mesure des grands débits. Une telle installation fut employée en France vers 1900 pour des essais sur des roues hydrauliques: « On fait passer le débit dans un grand récipient en forme d'entonnoir, dont la partie supérieure, cylindrique, est percée de 80 trous rectangulaires disposés autour de la périphérie. L'eau s'échappe par ces 80 ouvertures, et l'on fait passer l'un de ces jets par un compteur d'eau afin de pouvoir déterminer le volume total » (*).

Le même principe est parfois employé pour le jaugeage des débits en rivière. Les vannes du barrage d'Assouan servent depuis 1912 pour la mesure des débits sortant du barrage. Celui-ci comporte 180 orifices rectangulaires, larges de 2,0 m et hauts de 3,50 et de 7 m.

DÉVERSOIRS

La mesure des débits s'écoulant par un déversoir est encore plus pratique et plus sûre. Le

JAMES BICHENO FRANCIS
(1815-1899)

marquis G. Poleni fut le premier à utiliser un déversoir en 1717, suivi par P.L.G. du Buat en 1779, et par J. Weisbach en 1841. L'inventeur d'une turbine à réaction, J.-B. Francis, établit le premier laboratoire d'essais hydrauliques sur des turbines, à Lowell, dans l'Etat de Massachusetts. Un déversoir rectangulaire, d'une longueur de 4,26 m, y fut installé et étudié en 1852,

(*) *The Engineering Record*, 49 (1904), n° 7, 13 février, p. 187, New York.

Sometimes this principle is applied for river discharge measurement. Sluice gates in the Asswan Dam are used for outflow measurement since 1912. There are 180 rectangular orifices in the dam, 6.5 feet wide, 11.5 and 23 feet high.

WEIRS

Measurement of overflow over a weir is still more convenient and reliable. Marquis G. Poleni was the first man to apply a weir in 1717, P.L.G. du Buat followed in 1779, J. Weisbach in 1841. J.B. Francis, inventor of a reaction turbine, established the first hydraulic laboratory for turbine testing in Lowell, Massachusetts. In 1852 a rectangular weir, 14 feet long, was installed and investigated, a simple formula derived. A classical work "Lowell Hydraulic Experiments" by Francis was published in 1855 and five editions were issued through 1909.

Rectangular weirs were investigated by H.E.

CESARE CIPOLLETTI
(1843-1903)

Bazin in 1888-1896, V.W. Hansen in 1892, F. Frese in 1890, K. Kinzer in 1897, Th. Rehbock in 1909-1929, R.R. Lyman in 1912, F.A. Nagler in 1917, V.M. Hégly in 1921, R. Dubs in 1924, E.W. Schoder and K.B. Turner in 1927, Ch. Keutner in 1929. Some other forms of weir notches were tried and applied. A triangular weir, distinguished by perfect similarity, was invented by

(*) *The Engineering Record*, 49 (1904), No. 7, Feb. 13, p. 187, New York.

et une formule simple put en être dégagée. L'œuvre classique « Lowell Hydraulic Experiments » (Etudes hydrauliques effectuées à Lowell), par Francis, parut en 1855, et cinq éditions en furent publiées pendant la période 1855-1909.

H.-E. Bazin étudia les déversoirs rectangulaires en 1888-1896, de même V.W. Hansen en 1892, F. Frese en 1890, K. Kinzer en 1897, Th. Rehbock en 1909-1929, R.R. Lyman en 1912, F.A. Nagler en 1917, V.M. Hégly en 1921, R. Dubs en 1924, E.W. Schoder et K.B. Turner en 1927, et Ch. Keutner en 1929. Des déversoirs de formes différentes furent également étudiés et utilisés, notamment un déversoir triangulaire permettant une similitude parfaite, qui fut inventé par J. Thomson en 1858 et étudié par J. Barr en 1910, D.H. Yarnall en 1912-1926, F.W. Greve en 1930, et A.T. Lenz en 1941. En 1870, Cipolletti inventa un déversoir trapézoïdal, avec un coefficient de débit compensé pour les contractions latérales; ce dispositif fut étudié par la suite par W.G. Steward et J.S. Longwell en 1911, et par V.M. Cone en 1916. P.W. Greve étudia un déversoir parabolique à loi quadratique en 1921, et un déversoir hyperbolique (déversoir proportionnel) à loi linéaire fut inventé par O.V.P. Stout en 1896, modifié par H.H. Sutro en 1908, et étudié par E.W. Rettger en 1914, E.A. Pratt en 1914, M. Rother en 1921, H. Janert en 1930, et G. di Ricco en 1940. Un déversoir circulaire fut étudié par V.M. Cone en 1913, J.L.W. Lillja en 1920, P.W. Greve en 1921-1928, et défini théoriquement par A. Staus en 1926.

Les déversoirs sont généralement utilisés pour le jaugeage des débits dans les petits canaux d'irrigation et de drainage. On installe également des déversoirs fixes dans des petits cours d'eau, ainsi que pour la régularisation des rivières caractérisées par des changements de lit. Les déversoirs de crue des barrages existants sont également utilisés pour le jaugeage des débits déversés. Le barrage de Keokuk, sur le Mississippi comporte 119 déversoirs, d'une largeur unitaire de 9,15 m, sous une charge de 3,35 m. F.A. Nagler et A. Davis effectuèrent des essais sur l'une de ces sections en 1924, à l'aide de moulinets hydrométriques; la même section fut également vérifiée sur un modèle réduit au laboratoire d'hydraulique de l'Iowa. Le déversoir des crues du barrage Wilson, sur le fleuve Tennessee, fut étudié de la même façon par L.G. Puls en 1928.

Les déversoirs ont également été utilisés pour les essais des turbines, étant alors provisoirement aménagés dans un des canaux de fuite. Certains de ces déversoirs étaient de taille assez importante et relativement coûteux. Un déver-

J. Thomson en 1858 et investigated by J. Barr in 1910, D.R. Yarnall in 1912-1926, F.W. Greve in 1930, A.T. Lenz in 1941. A trapezoidal weir with a discharge coefficient compensated for side contractions was invented by C. Cipolletti in 1870, investigated by W.G. Steward and J.S. Longwell in 1911, V.M. Cone in 1916. A parabolic notch with second power formula was tested by F.W. Greve in 1921. A hyperbolic notch or proportional weir with first power formula was invented by O.V.P. Stout in 1896, modified by H.H. Sutro in 1908, investigated by E.W. Rettger in 1914, E.A. Pratt in 1914, M. Rother in 1921, H. Janert in 1930, G. di Ricco in 1940. A circular weir was investigated by V.M. Cone, in 1915, J.L.W. Lillja in 1920, F.W. Greve

OSCAR VAN PELT STOUT
(1865-1935)

in 1921-1928, theoretically defined by A. Staus in 1926.

Weirs are usually applied for flow measurement in small drainage and irrigation canals. Permanent weirs are arranged in creeks or as an artificial control in rivers with shifting bed. Spillways of existing dams are also used for overflow measurements. The Keokuk Dam across the Mississippi River has 119 spillway sections, each 30 feet wide, the water head is up to 11 feet. In 1924 one section was tested by F.A. Nagler and A. Davis, applying current meters, and also checked on a model in the Iowa hydraulic laboratory. The spillway of the

soir d'une longueur de 34,75 m fut construit en 1914 sur la rivière Ausable, en aval du barrage Loud (Michigan) pour les essais des turbines. Le plus grand déversoir provisoire construit était celui placé à l'aval du barrage Wilson, sur la rivière Tennessee, et qui fut installé en 1926. Il comportait 15 éléments en tôle d'acier à arêtes vives, d'une longueur unitaire de 9,15 m; la longueur totale de la crête de ce barrage était de 152 m. Le montage coûta 63 000 dollars et le démontage 5 000.

ÉCOULEMENT NON-UNIFORME

Les tuyères, diaphragmes, coudes et autres étranglements sont utilisés dans les tuyaux, la vitesse et le débit étant déterminés par la différence entre les pressions en amont et en aval de l'obstacle. Un dispositif très couramment utilisé consiste en un passage convergent-divergent à l'intérieur d'un tuyau, qui fut inventé par C. Herschel, à Holyoke (Massachusetts) en 1887, et appelé « Venturimètre » en l'honneur de G.B. Venturi, qui fut le premier chercheur à démontrer la perte de charge due à un rétrécissement

CLEMENS HERSCHEL
(1842-1930)

(1797). Les Venturimètres se sont montrés des dispositifs précis et d'utilisation facile pour l'eau, les gaz, l'air et d'autres fluides. On y a ajouté, par la suite, à l'aval du rétrécissement, un diffuseur ayant pour objet de récupérer une partie de l'énergie perdue.

Cette conception fut appliquée aux canaux

Wilson Dam on Tennessee River was tested in the same manner by L.G. Puls in 1928.

Weirs also were used for turbine testing. They were temporarily built in a tailrace of the plant, and sometimes they were quite large and expensive. In 1914 a weir of 114 feet length was built across the Ausable River below the Loud Dam, in Michigan, for turbine testing. The largest temporary weir was built below the Wilson Dam in Tennessee River in 1926. It had 15 sections of sharp-edged steel plates, each 30 feet long; the total length of the crest was 500 feet. Construction of that weir took 63,000 \$, dismantling 5,000 \$.

NON-UNIFORM FLOW

Nozzles, diaphragms, bends and other restrictions are used in pipes. Difference in pressure

RALPH LEROY PARSHALL
(1881-1959)

before and past the obstacle determines the velocity and the discharge. Particularly popular is a throat inside a pipe, invented by C. Herschel in Holyoke, Massachusetts, in 1887, and called venturimeter in honor of G.B. Venturi, who was the first scientist to demonstrate pressure decrease in a constriction in 1797. Venturimeter

découverts par V.M. Cone en 1916, sous la forme d'un rétrécissement appelé « canal de Venturi ». Ce canal fut amélioré par R.L. Parshall, qui détermina un écoulement critique. Depuis 1929, on a vu se répandre considérablement l'utilisation de ce dispositif, connu sous le nom de « canal de Parshall », et remplaçant souvent les déversoirs dans les campagnes de mesures. En 1931, un grand canal de Parshall, large de 12,19 m à la section rétrécie, fut installé dans un canal à La Junta (Californie), pour un débit maximum de 51 m³/s. D'autres canaux, appelés « canaux à écoulement critique » ou « canaux à onde stationnaire », sont également utilisés.

Les différences de pression en des points opposés dans un coude peuvent être utilisées pour la mesure des débits. L'utilisation à cette fin d'un coude réducteur à l'entrée d'une turbine Pelton fut proposée par E.A. Dow en 1922, et le même principe fut appliqué à un coude dans un tuyau en 1936 par W.M. Lansford. L'utilisation des coudes pour déterminer les débits était également connue en Allemagne dès 1870.

Deux méthodes ont été proposées pour la mesure permanente des débits à travers les turbines à réaction :

1. En 1928, J.A. Winter et A.M. Kennedy branchèrent des manomètres sur plusieurs points répartis sur la bache spirale d'une turbine; ils notèrent les valeurs obtenues au cours des essais, et choisirent les deux points convenant le mieux à un contrôle permanent;
2. En 1933, J.A. Peck installa deux piézomètres dans une aube de vannage de l'avant-distributeur, dont l'un sur le bord face à l'écoulement, et l'autre sur un bord latéral; cette disposition fut ensuite étalonnée pendant des essais de rendement de la turbine.

Toutes les méthodes basées sur les différences de pression supposent une certaine perte d'énergie, ce qui constitue un élément défavorable dans les installations de production d'énergie. Le tube d'écoulement de Dall, mis au point par H.E. Dall en 1953, donne lieu à des pertes plus faibles que celles d'un Venturi.

MÉTHODES BASÉES SUR LES VITESSES DANS UNE SECTION D'ÉCOULEMENT

La mesure des débits basée sur les vitesses dans une section d'écoulement n'entraîne pratiquement aucune perte d'énergie. Il est nécessaire de mesurer les vitesses en plusieurs points, étant donné qu'elles varient à travers la section. Il est particulièrement souhaitable de pouvoir

proved to be a convenient and accurate device for water, gas, air and other fluids. Diffuser was introduced past throat to regain a part of lost energy.

In 1916 V.M. Cone applied this idea to open channels by introducing a restriction called venturi flume. R.L. Parshall improved this flume, ascertaining a critical flow, and since 1929 this device is widely in use, known as Parshall measuring flume. It often replaces weir in field conditions. In 1931 a large Parshall flume, 40 feet wide in the throat, was built in a canal at La Junta, California, for a maximum water discharge of 1,800 cubic feet per second. Other designs of flumes, called critical-flow or standing wave flumes, are also used.

Pressure difference in opposite points of bend in a pipe can be applied for discharge measurements. In 1922 E.A. Dow suggested the use of a reducing bend at the inlet to an impulse turbine. In 1936 W.M. Lansford adopted this principle to an elbow in a pipe. The use of elbows was known in Germany since 1870.

Two ways were proposed for the permanent measurement of water flow through reaction turbines: 1) In 1928 J.A. Winter and A.M. Kennedy connected manometers to several points of a scroll case of a turbine and observed them during tests; two best suitable were selected for permanent control. 2) In 1933 J.A. Peck installed two piezometers into a stator vane, one at the front edge, another on a side; installation was to be calibrated during efficiency tests of the turbine. All methods based on pressure difference presume a certain waste of energy, which is undesirable in power developments. The Dall flow tube, designed by H.E. Dall in 1953, requires less losses than venturi tube.

AREA-VELOCITY METHODS

Discharge measurements by area and velocity methods are almost entirely free of energy losses.

Velocities of flow must be measured in many points, because they vary across the section. Direct measurement of the average velocity of the whole section is particularly desirable.

In 1841 a large gage-wheel, 16 feet in diameter, was assembled across a supply canal from the Merrimac River in Massachusetts. Seven wheels, each 10 feet wide, were coupled on a horizontal shaft between supporting piers, outfitted with a series of 24 paddles fixed radially around the wheels. Flowing water rotated the immersed paddles, revolutions were counted by a clock-work connected to one end of a shaft. The velocity of water was 2 to 3 1/2 feet per

mesurer directement la vitesse moyenne de la section entière.

Une grande « roue de jaugeage » d'un diamètre de 4,87 m, fut installée en 1841 sur toute la largeur d'un canal d'alimentation partant du fleuve Merrimac (Massachusetts); elle était constituée d'un ensemble de 7 roues individuelles, chacune ayant 3,05 m de largeur, accouplées et montées sur un arbre horizontal, ce dernier étant supporté par des piles latérales. Chaque roue comportait 24 aubes radiales sur sa périphérie. Les pales immergées étaient déplacées par le courant, provoquant la rotation de la roue, le nombre de tours étant compté par un mécanisme d'horlogerie relié à l'une des extrémités de l'arbre. La vitesse du courant mesuré dans ce cas était de 0,61 à 1,06 m/s, ce qui correspondait à un débit de 11,32 à 17 m³/s. Cette énorme roue de jaugeage était probablement la plus grande qui ait jamais été construite.

La vitesse moyenne dans un canal de section régulière peut être mesurée au moyen d'un écran hydrométrique fixé sur un chariot léger. Le courant déplace ce chariot sur des rails installés le long du canal. La détermination du débit se fait à partir du temps nécessaire pour parcourir une distance constante, et de la profondeur d'eau. Ce dispositif fut d'abord essayé sous forme d'un écran flotteur par G.-A. Hirn, en France, en 1846, puis introduit en 1905 en Suède pour les essais de turbines, par E. Andersson, où il est connu sous le nom de « Andersson's skärm » (écran d'Andersson). Des écrans hydrométriques furent également installés par K. Schmitthenner, à Heidenheim, en 1907, et par E. Reichel, à Berlin, en 1908. Reichel utilisa un tel écran pour des essais sur l'installation de Nottoden, en Norvège, en 1909, et O. Lütshg fit de même en 1910, à l'installation d'Ackersand, en Suisse. V. Mann étudia la précision d'un écran hydrométrique en 1920, et des améliorations de ce dispositif furent mises au point par W. Wagenbach et E. Krause en 1932. De nombreux laboratoires, en Europe, utilisent ces écrans pour obtenir des mesures rapides et précises des débits. Cette méthode fut appelée « diaphragm method » par C.R. Weidner, en Amérique, en 1914, mais il fallut attendre l'année 1954 pour la voir employée dans ce pays, lorsqu'un tel écran fut installé au laboratoire d'hydraulique de Notre Dame (Indiana).

Les mesures dans les canaux découverts sont normalement effectuées en divers points sur plusieurs horizontales ou verticales, et sur des lignes transversales dans les conduites fermées. Il est nécessaire de poursuivre les observations de vitesse en chaque point pendant plusieurs minutes, afin de tenir compte des pulsations

second, the water discharge 400 to 600 cubic feet per second. This huge gaging wheel was probably the largest water meter ever built.

The average velocity in a regular channel can be measured by a hydrometric screen attached to a light carriage. Flowing water moves the carriage on rails along the channel. The time needed to travel a constant distance and the depth of water lead to determination of water discharge. First tried by G.-A. Hirn in France in 1846 as a float with a screen (l'écran flotteur), this device was introduced for turbine testing by E. Andersson in Sweden in 1905 and is known there as "Andersson's skärm". K. Schmitthenner arranged a hydrometric screen in Heydenheim in 1907, E. Reichel in Berlin in 1908, he

ERIK ANDERSSON
(1854-1911)

also applied a screen for tests of the Nottoden plant in Norway in 1909, O. Lütshg tested with a screen the Ackersand plant in Switzerland in 1910. V. Mann investigated the accuracy of a hydrometric screen in 1920, W. Wagenbach and H. Krause introduced some improvements in 1932. Many European laboratories use hydrometric screen for quick and accurate discharge measurements. In America this device was described as a diaphragm method by C.R. Weidner in 1914, but was not applied before 1954, when it was installed in the Hydraulic laboratory of the University of Notre Dame, Indiana.

Measurements in open channels are usually performed at different points on series of verticals or horizontals, in closed conduits along transverses. Observation of velocity at every point

irrégulières de l'écoulement. Les mesures en plusieurs points exigent donc un temps considérable, dont on ne dispose pas toujours. L'intégration mécanique est tolérée dans les canaux découverts, de même dans les conduites, mais dans ce dernier cas seulement autour des cercles, et non dans le sens transversal. L'utilisation simultanée de plusieurs appareils de mesure et l'enregistrement automatique de tous les résultats permet un gain de temps. Il est également possible de réduire le nombre de points de mesure pour des mesures approchées ou dans le cas d'un contrôle continu. Dans ce dernier cas, il est nécessaire d'établir des règles suivant lesquelles la vitesse moyenne se déduit des résultats obtenus en un « point de référence » bien déterminé.

Les tubes de Pitot et les moulinets hydrométriques sont couramment utilisés pour les mesures de vitesse en canaux découverts et en conduites.

PITOTMÈTRES (TUBES DE PITOT)

Un tube hydrodynamique permettant de mesurer la pression due à la vitesse fut inventé par H. Pitot en 1732, et amélioré successivement par J.-A. Fabre en 1797, Duchemin en 1842, Reichenbach en 1845, H. Darcy en 1856-1885, Ch. Ritter en 1871, J. Amsler en 1880, E. Gieseler en 1885, E.S. Cole en 1896, J. Danckwerts en 1909, L. Prandtl en 1913, Th. Rehbock en 1926, et J. Szily en 1937.

Le tube de Pitot mesure la vitesse instantanée à son extrémité. Il est nécessaire d'effectuer de nombreuses mesures afin d'éliminer l'influence des pulsations. Le tube de Pitot ne convient pas pour l'intégration, ni par rapport aux distances, ni par rapport au temps. Des pitotmètres intégrateurs proposés par A. Frank en 1895 et W.C. Henning en 1922 ne purent pas être adoptés en raison de leur défaut de précision.

Weinhold fut le premier utilisateur d'un tube de Pitot pour les essais de turbines, en 1872, et H.F. Mills fut le premier Américain à s'en servir pour des études sur les phénomènes d'écoulement, à Lawrence (Massachusetts), en 1877. Dans cette étude, qui fut reprise par J.R. Freeman par la suite, les entrées des tubes étaient disposées en 16 ou 18 points à travers la section d'une conduite d'un diamètre de 30,48 cm, les

must continue several minutes due to irregular pulsation of flow. Measurements in many points need considerable time, which may not be available. Mechanical integration is allowed in open channels, and in pipes around the circles, but not across the pipe. Time can be shortened when a set of instruments is applied simultaneously and all observations are recorded automatically. Number of points can be reduced for approximate measurements or for continuous control. In that case the rules must be established to compute the average velocity from observations in a selected "index point".

Pitot tubes and current meters are widely used for velocity measurements in open channels and in pipes.

PITOMETERS (PITOT TUBES)

A hydrodynamic tube, measuring the velocity head, was invented by H. Pitot in 1732 and

HENRY DE PITOT
(1695-1771)

developed by J.A. Fabre in 1797, Duchemin in 1842, Reichenbach in 1845, H. Darcy in 1856-1885, Ch. Ritter in 1871, J. Amsler in 1880, E. Gieseler in 1885, E.S. Cole in 1896, J. Danckwerts in 1909, L. Prandtl in 1913, Th. Rehbock in 1926, J. Szily in 1937.

Pitot tube measures an instant velocity at the point of nozzle. Many readings should be taken in order to eliminate the influence of pulsation. Pitot tube is not suitable for integration, neither with respect to distance, nor to the time. Integrating pitometers proposed by A. Frank in 1895

hauteurs piézométriques étant enregistrées simultanément. Nous devons à E.S. Cole la méthode de mesure suivant laquelle on déplace un tube de Pitot le long d'une ligne transversale à travers une conduite. Ce chercheur utilisait deux tubes disposés l'un contre l'autre. Le premier pitotmètre à être utilisé pour un contrôle permanent fut celui installé sur la conduite d'eau de Terre Haute (Indiana) en 1896. De nombreux pitotmètres sont utilisés de nos jours. En 1903, Cole mit au point, en collaboration avec H. Flad, un photo-pitotmètre enregistrant sur une plaque sensible toutes les fluctuations de la colonne liquide d'un manomètre.

En 1921, A.L. Collins employa un tube de Pitot qu'il faisait glisser à travers la conduite par deux presse-étoupe; un orifice dans la partie avant du tube faisait office de prise dynamique. La méthode « photoflow » fut brevetée par D.W. Proebstel, en 1927. Dans cette méthode, plusieurs tubes de Pitot sont fixés rigidement à un cadre aménagé dans une section de mesure et reliés à une lyre manométrique par l'intermédiaire de tubes piézométriques. Les résultats sont enregistrés immédiatement par un appareil photographique et peuvent être évalués après le développement de la plaque. Les tubes de Pitot doivent être étalonnés, pour les mesures précises, en établissant des comparaisons avec d'autres méthodes; c'est un procédé assez compliqué.

MOULINETS HYDROMÉTRIQUES

Un moulinet hydrométrique est un appareil comportant des aubes ou des coupelles rotatives; c'est l'appareil le plus sûr pour les mesures de vitesse dans les canaux découverts et les conduites. Il convient pour l'intégration. Tout moulinet doit être étalonné en eau statique.

Il existe deux types principaux de moulinet, les uns comportant une hélice tournant sur un axe dirigé dans le sens de l'écoulement, et les autres comportant des coupelles tournant sur un axe perpendiculaire à l'écoulement et mis en rotation par la différence entre les traînées de deux coupelles opposées.

Le premier appareil à hélice fut introduit par Woltman en 1790, et amélioré successivement par A. Baumgarten en 1837, P. Boileau en 1845, L.G. Treviranus en 1820-1859, J. Amsler en 1872, A. Fteley en 1875, A.R. Harlacher en 1881, A. Ott depuis 1881, E.E. Haskell en 1886, J. Epper en 1899, S. Hajós en 1903, W. Albrecht en 1908, E.J. Hoff en 1921, et H. Dumas en 1948.

Le moulinet à coupelles fut introduit en 1867

and by W.C. Henning in 1922 were rejected as erroneous.

Pitot tube was applied for turbine testing by Weinhold in 1872. H.F. Mills was the first American to use pitometer for flow studies in Lawrence, Massachusetts, in 1877. His work was continued by J.R. Freeman. The nozzles were located at 16 or 18 points across a 12-inch pipe. Piezometric levels were recorded simultaneously. E.S. Cole was the promoter of the application of pitometers in the traverse method. He introduced two opposite nozzles. The first pitometer for permanent control was installed in the water main of Terre Haute, Indiana, in 1896. A large number of pitometers are in use now. In 1903, in cooperation with H. Flad, Cole developed a photo-pitometer, which registers on a sensitive plate all fluctuations of the liquid column in a manometer.

In 1921 A.L. Collins applied a tube, sliding across the pipe through two packings. An orifice in the front of the tube served as a nozzle. In 1927 D.W. Proebstel patented the "photoflow" method. Multiple pitot nozzles are rigidly fixed to the frame in a measuring section. Piezometric tubes, connected to them, are located on a common board ("bank"), their readings are recorded by a photo camera instantly and evaluated after processing the plate.

Pitot tubes need calibration for precise measurements. Rating can be performed by comparison with other methods, and is quite complicated.

CURRENT METERS

A current meter is an instrument with rotating vanes or cups, and is the most reliable for velocity measurements in both open channels and pipes. It can be successfully applied for integration. Every current meter must be calibrated: the rating is performed in still water.

There are two principal types of current meters, with vanes rotating like a screw about an axis directed toward the flow, or with cups circulating around an axis located across the flow and acting due to the different drag on opposite cups.

The screw type was introduced by R. Woltman in 1790 and improved by A. Baumgarten in

par D.F. Henry, qui adopta un rotor de l'anémomètre de T.R. Robinson. Ce modèle fut utilisé par Th. G. Ellis en 1871, puis mis au point et breveté par W.C. Price en 1882, de sorte qu'il devint connu surtout sous le nom de « moulinet de Price ».

Les tours de l'hélice du moulinet sont transmis par un système électrique et enregistrés. La vitesse d'un courant s'obtient à partir d'une courbe ou d'une loi d'étalonnage. Dans un canal découvert, les moulinets peuvent être utilisés montés sur perche, ou bien montés sur un contrepoids suspendu à un câble. L'attache du moulinet à la perche peut être fixe, coulisser le long de la perche, ou bien être conçue pour permettre de soulever l'appareil avec la perche. Les moulinets suspendus à un câble doivent être suffisamment lourds pour pouvoir résister à toute tendance à dériver.

Le modèle à hélice est sensible au sens du courant. Il est nécessaire de corriger les vitesses des courants obliques mesurées avec un moulinet fixe, afin d'obtenir la projection normale correspondante. Une hélice « auto-composante » mise au point récemment permet de mesurer cette projection directement. L'appareil à coupelles, par contre, ne réagit qu'à la vitesse maximum, quelle qu'en soit la direction; il ne convient donc guère aux mesures précises.

Un seul jaugeage du débit d'un cours d'eau naturel exige plusieurs heures de travail, bien qu'il soit possible de gagner énormément de temps en intégrant. Les essais sur les groupes énergétiques nécessitent l'emploi de jeux de moulinets, le temps disponible pour chaque essai étant limité à environ 10 minutes. Les moulinets sont alors fixés sur un cadre, et l'ensemble ainsi constitué est déplacé à volonté dans une section de la conduite. L'enregistrement automatique, sur bande de papier, des impulsions fournies par chaque moulinet de l'ensemble, est assuré par un chronographe. Lorsqu'un tel appareil n'est pas disponible, il est nécessaire de prévoir un observateur pour chaque moulinet. Lors des essais effectués à la centrale de Chancy-Pougny, sur le Rhône, en 1926, par exemple, 9 agents étaient assis l'un à côté de l'autre, observant les résultats de 9 moulinets montés sur un cadre horizontal.

En 1909, S. Rice utilisa un cadre comportant 4 moulinets dans un canal de la station de pompage de Chicago. B.F. Groat exécuta, en 1914, des mesures avec 5 appareils sur une perche horizontale, et A. Streiff effectua des essais sur des turbines en utilisant 11 moulinets à la fois. En 1922, H. Thoresen utilisa deux jeux de 14 moulinets en Norvège, et les Suédois firent des essais avec 17 appareils. S. Bitterly en employa 14 pour les essais de la centrale de Faal, en

1837, P. Boileau en 1845, L.G. Treviranus en 1820-1859, J. Amsler en 1872, A. Fteley en 1875, A.R. Harlacher en 1881, A. Ott since 1881, E.E. Haskell en 1886, J. Epper en 1899, S. Hajós en 1903, W. Albrecht en 1908, E.J. Hoff en 1921, H. Dumas en 1948.

The cup type was introduced by D.F. Henry in 1867, who adopted a flier (rotor) of the T.R. Robinson's anemometer. This type was applied by Th. G. Ellis in 1871 and developed and patented by W.C. Price in 1882, therefore is mostly known as a Price meter.

The revolutions of a meter are transmitted electrically and recorded. The velocity of a stream is obtained from a rating curve or equation. A current meter can be applied in open channel on a rod or on a cable with a weight. It might be fixed on the rod, shifted along the rod or lifted with the rod. When suspended on a cable, it should be sufficiently heavy to withstand the drift.

The screw type is sensitive to the direction of the stream. The velocity of oblique currents measured by a fixed meter is to be corrected in order to get the necessary normal projection. A new "component runner" measures that projection directly. The cup type reacts only to the maximum velocity from any direction, therefore it is not suitable for precise measurements.

Several hours are necessary to complete one measurement of a discharge of a natural stream. Integration can save considerable time. Series of meters must be available for tests in power plants, where the time is limited to some 10 minutes for every test. Meters are fixed to a frame, with which they are placed or shifted in a cross section. A chronograph is necessary to record automatically the signals of every meter on a paper tape. If not available, each meter needs its own observer. Thus, in 1926, during tests of the Chancy-Pougny plant on the Rhône River nine observers were sitting in a row while nine meters were in operation, attached to a horizontal frame.

In 1909 S. Rice used a frame with four meters in a channel of the Chicago pumping plant. In 1914 B.F. Groat applied five meters on a horizontal rod, and A. Streiff tested turbines with 11 meters simultaneously. In 1922 H. Thoresen applied two sets of 14 meters in Norway, 17 meters were used in Sweden. In 1927 S. Bitterly tested the Faal power plant in Yugoslavia with 14 current meters and in 1930 the Ryburg-Schwörstadt in Switzerland with 30 me-

Yougoslavie, en 1927, et 30 pour les essais de l'installation de Ryburg-Schwörstadt (Suisse), qu'il effectua en 1930. D. Thoma installa 20 moulinets dans un canal trapézoïdal de l'installation de Pfrombach, en Bavière, en 1929, et 27 dans la rivière l'Isar, à Aufkirchen. En 1931, W. Dietrich utilisa 12 moulinets, constituant deux jeux, pour les mesures qu'il exécuta sur les groupes de Handeck, en Suisse, et enfin, G.F. Merriam et J.M. Mousson installèrent 27 moulinets dans la centrale de Safe Harbor, sur le fleuve Susquehanna, en 1932. Ces derniers appareils comportaient deux hélices de formes différentes, qui furent utilisées successivement aux mêmes points de mesure afin de permettre la détermi-

ters. In 1929 D. Thoma applied 20 meters in a trapezoidal canal of the Pfrombach plant in Bavaria and 27 meters in the Isar River at Aufkirchen. W. Dietrich used 12 meters in two sets during tests of Handeck plant in Switzerland in 1931. In 1932 C.F. Merriam and J.M. Mousson applied 27 meters in the Safe Harbor plant on the Susquehanna River. The meters were equipped with two types of runners of different form, they were applied subsequently in the same points in order to determine corrections for the oblique flow. The idea of use of different types of current meters was suggested by L.F. Moody in 1914: one type would overregister, another underregister in oblique stream. In

REINHARD WEIZMAN
(1857-1937)

nation des corrections nécessaires pour tenir compte de l'obliquité du courant. L'idée d'utiliser différents types de moulinet fut suggérée par L.F. Moody en 1914: l'un devait fournir des valeurs trop élevées en écoulement oblique, et l'autre des valeurs trop faibles. En 1934, C.E. Streiff et H. Gerber mesurèrent les directions des filets liquides pendant les essais de la centrale de Wellingén, au moyen de 14 moulinets inclinés aux angles correspondants; les projections voulues furent calculées ensuite. En 1945, S. Kolupaila proposa une méthode de doubles mesures, utilisant les mêmes moulinets inclinés à des angles définis en régime d'écoulement oblique. L'hélice « auto-composante » fut inventée en 1948, permettant des mesures précises dans les galeries d'aménée des groupes à basse chute. Des essais satisfaisants ont depuis été effectués

WILLIAM GUNN PRICE
(1853-1928)

1934 C.E. Streiff and H. Gerber measured the directions of stream filaments during the tests of Wellingén power plant; 14 current meters were tilted at those angles, and the correct projections computed. In 1945 S. Kolupaila proposed a method of double measurements with the same current meters tilted at certain angles for conditions of oblique currents. In 1948 the "component runner" was invented, which permits correct measurements in inlets of low-head power plants. H.P. Müller and H. Eschler successfully tested turbines with the component runners.

Multiple current meters have been applied also for investigation of velocity distribution in rivers. In 1879 six meters were used in the Mississippi River near Burlington, Iowa, by G.A. Marr and A. Mackenzie. In 1899 eleven

sur des turbines par H.P. Müller et H. Eschler, au moyen des hélices auto-composantes.

Des moulinets multiples ont également été employés pour étudier la répartition des vitesses dans les cours d'eau. 6 moulinets furent employés à cette fin par G.A. Marr et A. Mackenzie, en 1879, dans le Mississippi, près de Burlington (Iowa). En 1899, 11 moulinets montés sur un seul câble furent utilisés dans la rivière Saint Clair, près de Detroit (Michigan) par L.C. Sabin, et dans la rivière Detroit, par M. Blanchard, en 1900.

MOULINETS INSTALLÉS DANS LES CONDUITES

L'utilisation des moulinets dans les conduites fermées, surtout celles fonctionnant en charge, est plus délicate. F.P. Stearns a effectué des mesures de débit dans un conduit d'évacuation d'eaux usées, à Boston, en 1883, en introduisant par un trou d'homme un moulinet monté à l'extrémité d'une perche. Le moulinet était maintenu au point voulu de la section de mesure, au moyen d'un dispositif spécial. En 1916, G. Sundby utilisa, en Norvège, deux perches commandées à travers des presse-étoupe à rotules articulées; le moulinet était monté sur les extrémités jointes de ces perches. La Société Kristinehamn, en Suède, mit au point un presse-étoupe articulé convenant pour une seule perche; celle-ci se déplaçait le long d'un seul diamètre, sans s'incliner.

En 1908, H. Dufour utilisa un passage comportant un joint étanche. Le moulinet s'introduisait à travers ce dispositif dans la conduite en charge, dans laquelle il se déplaçait au bout d'une perche. Aucune vidange préalable de la conduite n'était nécessaire pour installer et retirer les appareils. Dès 1912, H. Dufour faisait toutes ses mesures le long de deux lignes transversales perpendiculaires l'une à l'autre; toutes deux étaient inclinées pour faciliter les mesures. Une méthode analogue fut employée par K.A. Heron, au Colorado, en 1914, avec, en plus, un compte-tours mécanique relié à un cadran à l'extérieur du joint par l'intermédiaire d'une limonerie.

De nombreuses dispositions permettant de déplacer les moulinets à l'intérieur de la conduite ont été proposés et essayés. Les uns cherchaient à déplacer l'appareil autour du point central de la conduite, pour obtenir des mesures individuelles, ou pour permettre d'intégrer suivant des cercles concentriques. Tous ces dispositifs de rotation et de déplacement des moulinets étaient assez compliqués. De plus, ils n'étaient pas toujours très sûrs, car les vibrations à l'intérieur de la conduite faussaient sérieusement

meters, mounted on one cable, were applied in the St. Clair River near Detroit, Michigan, by L.S. Sabin, and in 1900 in the Detroit River by M. Blanchard.

CURRENT METERS IN PIPES

More complicated is the operation of current meters in closed conduits, particularly under pressure.

F.P. Stearns measured the flow in a Boston drainage conduit in 1883. Current meter was mounted at the end of a rod and introduced through a manhole. A special device was designed to keep the meter at any point of the section. In 1916 G. Sundby used in Norway two rods operated through hinged valves; the joined ends carried the current meter. The firm Werkstaden Kristinehamn in Sweden improved the hinged valve for a single rod, which actually was shifted along diameter only, without tilting.

In 1908 H. Dufour constructed a valve with a packing gasket. The current meter was introduced through this lock into a pipe under pressure and shifted across at the end of a rod. It was not necessary to empty the penstock for installation and removal of instruments. After 1912 H. Dufour always measured two perpendicular traverses across the penstock: both were inclined for convenience of operation. In 1914 a similar traverse method was applied by K.A. Heron in Colorado. A mechanical counter of revolutions was connected by a beam to a dial outside the gasket.

Many arrangements were proposed and tested for shifting of current meters inside the pipe. Some of them provided movement of the meter around the center of the pipe for separate measurements or for integration along concentric circles. All devices for rotation and shifting of current meters were rather complicated and not always reliable. Vibration of the rod inside pipe interfered seriously with accuracy of observations. Firm J.M. Voith suggested the installation of permanent traverses, as supports for shifting rod with a meter attached to it.

Discharge measurements in penstocks of power plants should assure high accuracy and must be made in short period of time. The most appropriate solution is the installation of a series of current meters fixed at selected points of a cross section. In 1926 20 meters on two perpendicular traverses were installed in penstocks of the Töging plant in Bavaria; 25 meters were applied on the same traverses in 1948. In 1929 three traverses were installed in the penstock of the Eitting power plant in Bavaria, at 60° one to another. Four meters were fixed

la précision des mesures. La Société J.M. Voith proposa l'installation permanente de traverses à l'intérieur d'une conduite, comme supports pour une perche mobile portant un moulinet.

Les mesures de débit dans les conduites forcées des centrales devraient permettre une bonne précision et pouvoir s'effectuer en peu de temps. La solution la plus appropriée est d'installer une série de moulinets en des points choisis à l'avance dans une section. En 1926, une vingtaine de moulinets montés sur un croisillon à bras perpendiculaires furent installés dans des conduites forcées de la centrale de Töging, en Bavière; on fit de même en 1948, mais cette fois avec 25 moulinets. En 1929, trois traverses furent installées dans la conduite forcée de la centrale d'Eiting, en Bavière, chacune étant inclinée à 60° par rapport à l'autre. Quatre moulinets furent montés sur chaque rayon, et un au centre, soit 25 appareils en tout. Les impulsions de chaque appareil étaient transmises à un chronographe, qui les enregistrerait sur une bande de papier pour chaque essai. Cette méthode est maintenant très répandue: la nouvelle édition des normes allemandes « Abnahmeversuche an Wasserturbinen » (Essais de réception des turbines hydrauliques), 1957, préconise l'emploi de 13, 17, 21, 25, 29 ou 33 moulinets, suivant les dimensions de la conduite. On utilise normalement deux traverses perpendiculaires et inclinées. Le plus grand nombre de moulinets jamais utilisés (61) fut installé pour les essais des turbines de Génissiat, en 1950; chacun des 6 rayons comportait 9 appareils, un moulinet était monté au point central, et six autres étaient disposés le long des tirants.

Des moulinets ont souvent été utilisés pour permettre un contrôle permanent du débit. En 1898, A. Thiem installa un moulinet du type Woltman, équipé d'un système de comptage de tours mécanique, dans une conduite d'eau, à Leipzig. Un principe analogue est encore appliqué de nos jours dans plusieurs modèles de compteurs pour les distributions d'eau.

Des moulinets spéciaux de grande taille ont également été mis au point et installés dans des conduites forcées à titre permanent. En 1924, 6 moulinets de ce genre furent installés à la centrale de Walchensee. Leur fonctionnement était excellent, mais il a malheureusement été écourté par des avaries mécaniques.

La théorie et l'étalonnage des moulinets ont été améliorés par L.A. Ott; c'est surtout grâce à lui que les possibilités d'emploi de ces appareils précis et sûrs sont devenues si nombreuses.

along each radius, and one at the center, 25 meters were employed altogether. Signals given by each meter were transmitted to a chronograph and registered on a paper tape during each test. This method now is widely accepted: the new edition of German standards, "Abnahmeversuche an Wasserturbinen", 1957, suggests 13, 17, 21, 25, 29 and 33 meters for different size of penstocks. Two perpendicular traverses, both inclined, are usually selected. The greatest number of meters, namely 61, was installed for the tests of the Genissiat power plant in 1950: each of the six radiuses carried nine meters, six meters were attached to the strengthening chords and one was at the center.

LUDWIG ALBERT OTT
(1883-1946)

Several times current meters were adapted for a permanent control of the flow. In 1898 A. Thiem installed a current meter of Woltman type in a water main of Leipzig; it was equipped with mechanical transmission of revolutions. Similar principle is still used in many types of water meters for water supply.

Special large size current meters were built and installed in penstocks for permanent operation. In 1924 six meters were installed in Walchensee power plant. The performance was excellent, however mechanical damage discontinued their operation.

The theory and rating of current meters were advanced by L.A. Ott, who contributed very much to the manifold application of those accurate and reliable instruments.

JAUGEAGE PAR ÉCRAN SALÉ

Un flotteur constitue le dispositif le plus simple pour les mesures de vitesses. Il peut être employé sous la forme liquide, d'une matière colorante, d'une huile ou d'une solution saline.

En 1920, S.M. Woodward et I.E. Hook effectuèrent des mesures de vitesse, dans une conduite de dragage hydraulique, en utilisant comme flotteurs des écrans salés et colorés, et en observant le temps qu'ils mettaient à parcourir une certaine distance. En 1922, Ch. M. Allen et E.A. Taylor firent des enregistrements électriques du mouvement d'un écran salé au laboratoire d'hydraulique de Worcester. Une bonne précision fut obtenue grâce aux enregistrements précis de la conductivité de l'écran salé. Ce procédé fut mis au point et devint connu sous le nom de « méthode Allen de jaugeage par écran salé ». Allen et ses assistants effectuèrent par la suite des essais sur plus de 160 groupes, avec des débits allant jusqu'à 277,5 m³/s. La méthode fut également essayée dans des galeries de grandes dimensions, tel qu'une galerie, dans l'Etat de Delaware, de 37,8 km de long et d'un diamètre de 4,57 m. Une demi-tonne de sel fut dissoute pour ces mesures, qui ont donné une précision de 2 %.

SALT-VELOCITY METHOD

A float is the simplest device for velocity measurements. If used in pipes the float can be in liquid form, as dye, oil, salt solution.

In 1920 S.M. Woodward and I.E. Hook made some velocity tests in a hydraulic dredge conduit, applying salt and dyes for floats. The time necessary to travel a certain distance was observed. In 1922 Ch. M. Allen and E.A. Taylor registered electrically the movement of salt solution in the Worcester hydraulic laboratory. The electric conductivity of a salt wave, precisely recorded, assured high accuracy. The procedure was well developed and known as the Allen salt-velocity method. Over 160 power plants were tested by Allen and his personnel, with a flow as high as 9,800 cubic feet per second. This method was also tried in large tunnels: one tunnel in Delaware was 23,3 miles long, 15 feet in diameter. One half ton of salt was dissolved for measurements, a 2 per cent accuracy was obtained.

CHARLES MEICALF ALLEN

(1871-1950)

La méthode Allen fut étudiée en Suède par E. Lindquist, en Allemagne par O. Kirschmer, en France par M.A. Mason, en Suisse par P. de Haller, en Italie par E. Scimemi, tant dans les conduites que dans les canaux découverts. Elle fut jugée moins précise que d'autres méthodes.

The Allen method was investigated by E. Lindquist in Sweden, by O. Kirschmer in Germany, by M.A. Mason in France, by P. de Haller in Switzerland, by E. Scimemi in Italy, in pipes as well as in open channels. It was judged as less accurate than other methods. This method is

La méthode Allen est utilisée de nos jours, et elle a été mise au point par L.J. Hooper et d'autres spécialistes.

La méthode de jaugeage par écran salé fut également employée pour des mesures sur la nappe phréatique par G. Thiem, en Allemagne, en 1887, et par Ch. S. Slichter, en Amérique, en 1902.

MÉTHODES CHIMIQUES

Ce fut un physicien français, Th. Schloesing, qui, en 1863, eut l'idée de mesurer les débits par une méthode chimique, en se basant sur le principe suivant lequel le rapport des concentrations d'une solution est inversement proportionnel au rapport des débits. Un ingénieur français, Ch. Ritter, adapta ce principe aux mesures de température dans une rivière et dans son affluent, en 1883. En connaissant l'un des débits, on peut calculer l'autre à partir de la variation des températures. En 1896, Ch. E. Stromeyer essaya, en Angleterre, des méthodes colorimétriques et chimiques de mesure des concentrations. En 1900, un ingénieur hollandais, F. van Iterson, améliora la technique des mesures chimiques par titration. Les savants suisses, A. Boucher et R. Mellet appliquèrent, pour la première fois, la méthode chimique à des mesures sur des groupes énergétiques en 1909, ainsi qu'à des petites rivières, en 1915. Les ingénieurs russes, N.M. Bernadskii et A.O. Jurkov, utilisèrent la méthode avec succès sur le cours supérieur de la Volga, en 1912. En Amérique, R.D. Johnson employa des matières colorantes pour des essais par la méthode colorimétrique effectués dans une centrale, en 1913. A. Streiff utilisa une solution salée pour turbines, en 1913, ainsi que R. Taylor, en 1915. En 1916, B.F. Groat utilisa la méthode par solution de sel pour les essais de turbine, méthode qu'il nomma « chemi-hydrométrie », F.A. Nagler vérifia des lois de déversoir au moyen de « jaugeages hydro-chimiques », en 1913. R.C. Starr utilisa la même méthode à la centrale de Kerekhof, sur la rivière San Joaquin (Californie), en 1921, pour des essais durant lesquels 6 tonnes de sel ordinaire furent dissous dans 28,4 m³ d'eau pour un essai.

Ce fut W.D. Peaslee qui, en 1915, remplaça le premier la titration par des mesures de conductivité électrique. Cette méthode fut mise au point et brevetée en Allemagne par L.A. Ott, en 1921. W. Braun l'étudia également en 1924. Une méthode analogue fut introduite en Italie en 1925 par A. Barbagelata et E. Bottani, et brevetée en Norvège par J. Aastad et R. Sögnen, en 1927. V. Pisa fut le premier, en 1935, à intégrer

still applied and developed by L.J. Hooper and others.

The salt-velocity method was applied for underground water investigations by G. Thiem in Germany in 1887 and by Ch. S. Slichter in America in 1902.

DILUTION METHODS

The idea of a dilution method was originated by a French physicist Th. Schloesing in 1863: the ratio of concentration of an ingredient is inversely proportional to the ratio of discharges. In 1883 a French engineer Ch. Ritter adopted this idea to temperature observations in a river and in its tributary. When one discharge is known, the other can be computed from the change in temperatures. In 1896 Ch. E. Stromeyer tested colorimetric and chemical methods of concentration measurement in England. In 1900 a Dutch engineer F. van Iterson improved the technique of chemical measurement by titration. The Swiss scientists A. Boucher and R. Mellet introduced the chemical method into power plant testing in 1909, and also applied it in small rivers in 1915. The Russian engineers N.M. Bernadskii and A.O. Jurkov successfully applied the chemical method on the upper Volga River in 1912. In America R.D. Johnson applied dyes for testing a power plant by colorimetric method in 1913, A. Streiff tested turbines with salt solution in 1913, R. Taylor did it in 1915. In 1916 B.F. Groat applied salt dilution method to turbine tests and called this "chemi-hydrometry". F.A. Nagler checked weir formulas with "hydro-chemical gaugings" in 1913. R.C. Starr used this method for tests of Kerekhof power plant on San Joaquin River in California in 1921: six tons of common salt were dissolved in 7,500 gallons of water for a test.

In 1915 W.D. Peaslee was the first to replace titration by the measurement of electric conductivity. This method was developed and patented in Germany by L.A. Ott in 1921. W. Braun investigated this method in 1924. Similar method was introduced in Italy by A. Barbagelata and E. Bottani in 1925, and patented in Norway by J. Aastad and R. Sögnen in 1927. V. Pisa introduced the integration of dilution rate instead of the observation of maximum concentration in 1935. In 1929 H. Neuzil applied fluorescein-sodium for colorimetric measurement of mountain creeks with good results. In 1937 B. Esterer investigated this method in Walchensee hydraulic laboratory and obtained very good results with solution as thin as 1 to 4.10⁻⁶, even

le taux de dilution maximum au lieu d'observer la concentration maximum. En 1929, H. Neuzil obtint de bons résultats en utilisant de la fluorescéine-sodium pour des mesures colorimétriques dans les ruisseaux de montagne. En 1937, B. Esterer étudia cette méthode au laboratoire d'hydraulique de Walchensee, où il obtint de très bons résultats avec une solution d'une dilution aussi faible que 1 à $4 \cdot 10^6$, résultats encore meilleurs que ceux obtenus avec des solutions de sel. La concentration fut évaluée au moyen d'un colorimètre photoélectrique.

La méthode chimique est encore courante de nos jours; elle a fait l'objet d'une série d'articles dans *La Houille Blanche*, en 1950-1954. Divers dissolvants ont été utilisés, et tous ont donné de bons résultats. En 1944, A.T. Lenz et C.N. Sawyer déterminèrent l'alcalinité de rivières, dans l'Etat de Wisconsin, en tant qu'indice du débit liquide. En 1956, M. Platzl introduisit l'utilisation d'appareils électroniques pour les mesures par dilution dans les rivières autrichiennes.

Un nouvel aspect des méthodes chimiques est l'application des isotopes radioactifs, comme traceurs, aux jaugeages par la méthode chimique. Le premier rapport à ce sujet a été publié par V.F. Hess, en 1943. Cette possibilité est du plus haut intérêt.

MÉTHODE DU "COUP DE BÉLIER"

Une méthode tout à fait originale pour la mesure des débits dans les conduites fut introduite par N.R. Gibson en 1920, basée sur le phénomène du coup de bélier. Dans cette méthode, on ferme une vanne progressivement à l'extrémité aval de la conduite, et on établit en même temps la courbe des variations de pression en fonction du temps pour un point situé immédiatement à l'amont de la vanne. Une autre méthode, dite « méthode différentielle », donne des résultats plus précis; elle consiste à noter les variations de pression en deux points différents de la conduite, éliminant ainsi certaines sources d'erreurs. Le débit initial se calcule à partir de l'aire limitée par la courbe obtenue, qui montre les fluctuations de la pression entre les deux points de mesure.

La méthode de Gibson est très précise. Elle a été utilisée pour des essais de rendement sur plus de 350 groupes énergétiques, dont la plupart sont installés en Amérique. D. Thoma étudia cette méthode en Allemagne en 1928, et F. Salgat en Suisse en 1926.

better than by salt dilution. A photoelectrical colorimeter was used for evaluation of concentration.

The chemical method is still popular. A series of articles appeared in the magazine "La Houille Blanche" in 1950-1954. Different solvents were applied, always successfully. In 1944 A.T. Lenz and C.N. Sawyer measured alkalinity of rivers in Wisconsin as an index of water discharge. In 1956 M. Platzl introduced electronic instrumentation into dilution method in Austrian rivers.

A novelty in dilution methods is the application of radioactive isotopes as tracers. The first paper on this matter was published by V.F. Hess in 1943. This possibility is very promising.

IMPACT METHODS

An entirely original method for water measurement in pipes was introduced by N.R. Gibson in 1920. This method is based on the phenomenon of water hammer. A gate at the end of the pipe is gradually closed, a pressure-time diagram is recorded just upstream from the gate. More

NORMAN ROTHWELL GIBSON
(1880-)

precise is the differential method, when change in pressure in two points of the penstock is recorded, eliminating some source of errors. The initial discharge is computed from the area under recorded curve, which shows the impulse of the mass of water.

AUTRES MÉTHODES

De nombreuses nouvelles méthodes de jaugeage des débits ont été proposées, limitées toutefois dans la plupart des cas aux conduites et aux canaux de section régulière.

Une méthode électromagnétique fut mise au point par A. Kolin à partir de 1936. L'idée d'induire des forces électromagnétiques dans un écoulement fut conçue par E.J. Williams, en 1930. En 1939, W.M. Lansford mesure par induction la déviation d'une plaque magnétique montée sur charnières à l'intérieur d'une conduite. La Société Foxboro, au Massachusetts, fabrique, depuis 1954, un débitmètre magnétique dans lequel la tension électrique engendrée par l'écoulement d'un liquide à travers le champ magnétique est détectée par des électrodes introduites dans une section isolée de la conduite, de manière à ne pas perturber l'écoulement.

En 1950, R.C. Swengel proposa la méthode par ultra-sons, basée sur le passage de sons de haute fréquence à travers un écoulement. La méthode acoustique fut introduite par A. Fiorenzi en 1931 et appliquée par H.E. Hartig à partir de 1933. On utilise les appareils ultrasoniques pour les mesures de profondeur (sondeurs à ultra-sons) pour les mesures hydrométriques depuis 1925.

La méthode thermométrique pour les essais de turbines fut proposée par A. Poirson en 1914, et appliquée par L. Barbillon en 1921, et par K.F. Umpfenbach en 1937. Elle se base sur des observations très exactes des températures de l'eau à l'entrée de la turbine et dans le canal de fuite. G. Willm et P. Campmas, en 1954, transformèrent cette méthode en une méthode thermodynamique basée sur la dilatation thermodynamique de l'eau. Ce procédé consiste à dériver un petit débit constant d'un point en amont de la turbine et de le faire passer par un détendeur calorimétrique. La pression dans le calorimètre est réduite de manière à ce que la température devienne égale à celle de l'eau dans le canal de fuite, et il suffit alors de mesurer la pression.

Quelques nouvelles idées ont également été appliquées aux mesures de vitesse:

En 1934, C.E. Bentzel mit au point un tube dans lequel l'eau est contrainte de s'écouler par un tube vertical et légèrement divergent; un flotteur équilibrant la force de traînée indique la vitesse. Cette idée est à la base du débitmètre connu sous le nom de « rotamètre ». O. Falk fit breveter deux dispositifs délicats comportant un dynamomètre à ressort en 1950, et M.C. Boyer mit au point un appareil pour la mesure des faibles vitesses, basé sur l'électrolyse, en 1947;

The Gibson method is very accurate. It was applied for efficiency tests in more than 350 power plants, mostly in America. D. Thoma investigated this method in Germany in 1928. F. Salgat in Switzerland in 1926.

OTHER METHODS

Many new ideas for water measurement were proposed, mostly limited to pipes and regular channels.

An electromagnetic method was developed by A. Kolin since 1936. The idea of induction of electromagnetic forces in a flow was originated by E.J. Williams in 1930. In 1939 W.M. Lansford measured the deflection of a magnetic plate hinged inside a pipe, by induction. The Foxboro Co. in Massachusetts produces a magnetic flow meter since 1954. Electric tension generated by the flow of a liquid through the magnetic field is detected by electrodes introduced inside an insulated link of the pipe and not interfering with the flow.

In 1950 R.C. Swengel proposed the ultrasonic method based on the high-frequency sound transition across a current. The acoustic method was introduced by A. Fiorenzi in 1931 and applied by H.E. Hartig since 1933. Ultrasonic devices for depth measurements, called fathometers, are in use in hydrometric work since 1925.

The thermometric method of turbine testing was introduced by A. Poirson in 1914, applied by L. Barbillon in 1921 and K.J. Umpfenbach in 1937. It is based on a very exact observation of water temperature before entering the turbine and in the tailrace. In 1954 G. Willm and P. Campmas modified this method into thermodynamic, based on the thermodynamic expansion of water. A small steady stream of water is diverted from a point upstream from the turbine through a throttling calorimeter. The pressure in the calorimeter is reduced so that the temperature becomes equal to the tailrace, and pressure only is to be measured.

Some new ideas are applied to velocity measurements.

In 1934 C.E. Bentzel developed a new tube: water is forced to flow through a vertical and

il y apporta des améliorations en 1953. Le même principe avait déjà été employé par W.S.L. Cleverdon en 1916. Cette méthode a récemment été étudiée par W.E. Renz, qui a trouvé que les réactions chimiques en jeu n'étaient pas suffisamment sûres pour permettre des résultats cohérents. En 1950, A.T. Ippen employa une cellule manométrique électronique pour étudier les fluctuations de débit. Avec cette méthode, la hauteur dynamique dans un tube de Pitot est convertie en une pression qui est alors transmise à une cellule manométrique. La déformation de la membrane de la cellule est amplifiée et enregistrée électroniquement.

Un anémomètre à fil chaud, basé sur une perte de la chaleur de convection fournie par un courant électrique est encore une idée nouvelle et intéressante. Ce dispositif, inventé par L. Weber en 1894, et mis au point pour les mesures dans l'air en écoulement par L.V. King, fut appliqué aux écoulements d'eau par G. Gangadharan en 1931, et par T. Ch. Sen en 1933. De meilleurs résultats ont été obtenus à l'Institut de Recherches Hydrauliques d'Iowa en adaptant des techniques électroniques modernes: S.C. Ling réalisa un anémomètre à film chaud en 1955, et Ph. G. Hubbard mit au point un anémomètre à fil chaud utilisant une température constante et relativement basse, et un courant électrique alternatif. Ces appareils délicats sont seulement utilisés dans les laboratoires.

ESSAIS COMPARATIFS

Cette courte revue se termine par une liste des plus importants essais comparatifs réalisés jusqu'à présent:

1912. — Mesures exécutées par O. Lütischg à la centrale de Lonza, à Ackersand (Suisse), comparant les résultats obtenus avec des déversoirs, des moulinets, un écran hydrométrique, et la méthode par dilution saline.
1922. — Expériences réalisées par O. Lütischg à la centrale d'Amsteg (Suisse), dans lesquelles il a comparé les résultats obtenus avec un déversoir, des moulinets, la méthode par dilution saline, avec les résultats de mesures volumétriques.
1929. — Essais comparatifs exécutés par O. Kirschmer dans une conduite forcée de diamètre variant de 1,85 à 2,25 m, à la centrale de Walchensee (Bavière). Dans ces essais, les diverses mesures furent exécutées en même temps par des spécialistes compétents, au moyen de

slightly divergent tube, a float balancing the drag force serves as an index of velocity. This idea was developed into a rotameter, one type of water meters. O. Falk patented two delicate devices with a spring dynamometer in 1950. An instrument for low velocity measurements based on an electrolytic action was developed by M.C. Boyer in 1947 and improved in 1953. The same principle was applied by W.S.L. Cleverdon in 1916. Recently W.E. Renz investigated this method and found that chemical reactions involved were unreliable for consistent results. In 1950 A.T. Ippen applied electronic pressure cell to investigation of flow fluctuations. The dynamic head in a pitot tube is converted into pressure which is transmitted to a pressure cell. The deflection of the diaphragm is amplified and recorded electronically.

A new and promising device for flow investigation is a hot-wire anemometer, based on a loss of convective heat supplied by electric current. Invented by L. Weber in 1894, technically developed for air streams by L.V. King, this method was applied in water by G. Gangadharan in 1931 and T. Ch. Sen in 1933. Modern electronic techniques were adapted with better results in the Iowa Institute for Hydraulic Research, where S.C. Ling constructed a hot-film anemometer in 1955 and Ph. G. Hubbard developed a new hot-wire anemometer, based on a constant and relatively low temperature and an alternating electric current, in 1957. These delicate instruments are in use in laboratories only.

COMPARATIVE TESTS

A list of most significant comparative tests concludes this short review.

In 1912 O. Lütischg performed measurements in the Lonza plant at Ackersand in Switzerland. Weir, current meters, hydrometric screen and salt dilution method were compared.

In 1922 O. Lütischg conducted experiments at the Amsteg power plant in Switzerland. Weir, current meters and salt dilution method were compared with volumetric measurement.

In 1929 O. Kirschmer led comparative experiments in a penstock of the Walchensee power

moulinets, pitoïmètres, écrans salés, et la méthode de Gibson.

1930. — Essais par O. Kirschmer et B. Esterer dans le canal du laboratoire d'hydraulique de Walchensee (longueur 250 m, largeur 2,5 m, profondeur 2,0 m). Dans ces essais, on a vérifié des moulinets de deux modèles, un déversoir, les méthodes par écran salé et par dilution saline, au moyen de mesures volumétriques.
1957. — Essais comparatifs organisés par F.A.L. Winternitz dans une conduite forcée d'un diamètre de 1 m, à la centrale hydroélectrique de Kinlochleven (Ecosse). Comparaison entre des moulinets (13 petits moulinets de laboratoire), des pitoïmètres, les méthodes par écran salé et par dilution saline. Le chronographe classique fut remplacé par des compte-tours électromagnétiques et des enregistrements photographiques.
1958. — Comparaison entre sept méthodes différentes à la centrale de Finlay (Ecosse): Dilution saline, écran salé, moulinets, pitoïmètres, déversoir, méthode thermodynamique et méthode de Gibson.

plant in Bavaria, 73 to 88 inches in diameter. Current meters, pitometers, salt-velocity and the Gibson methods were applied parallelly by competent experts.

In 1930 O. Kirschmer and B. Esterer performed experiments in the Walchensee hydraulic laboratory, in its canal, 820 feet long, 8 feet wide and 6 feet deep. Current meters of both types, weir, salt-velocity and salt-dilution methods were checked by volumetric measurements.

In 1957 F.A.L. Winternitz organized comparative tests in a 40-inch penstock of the Kinlochleven hydroelectric station in Scotland. Current meters (13 small laboratory meters), pitometers, salt-velocity and salt-dilution methods were compared. Electromagnetic counters of revolutions with photographic recording were applied instead of the conventional chronograph.

In 1958 seven different methods were compared in the Finlay power plant in Scotland: salt-dilution, salt-velocity, current meters, pitometers, weir, thermodynamic and the Gibson methods were applied.

BIBLIOGRAPHIE

VOLUMETRIC MEASUREMENTS

- M. MACDONALD and H.E. HURST. The measurement of the discharge of the Nile through the sluices of the Assuan dam. *Minutes of Proceedings of the Institution of Civil Engineers* 212 (1921), pp. 228-301, London.

ORIFICES

- E. BRAUER. Ein neues Verfahren zur Wassermessung. *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure*, 36 (1892), No. 51, pp. 1492-1493, Berlin.
- H.E. HURST and D.A.F. WATT. The measurement of the discharge of the Nile through the sluices of the Assuan dam. *Minutes of Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 218 (1924), pp. 113-180, London.

WEIRS

- J.B. FRANCIS. Lowell hydraulic experiments. Boston, Brown & Co., 1855, 156 p.; 5 ed. New York, Van Nostrand, 1909, 286 p.
- H. BAZIN. Expériences nouvelles sur l'écoulement en déversoir. Paris, Dunod, 1898, 200 p.
- J. THOMSON. On experiments on the measurement of water by triangular notches in weir boards. *Report 28th Meeting of the British Association of the Advancement of Sciences*, 28 (1858), pp. 181-185, London.
- C. CIPOLLETTI. Modulo per la dispensa delle acque ariamazzo libero di forma trapezia e coefficiente di contrazione costante. Milano, Hoepli, 1886, 88 p.
- O.V.P. STOUT. A new form of weir notch. *Transactions*

of the Nebraska Engineering Society, 1 (1897), No. 1, pp. 13-16, Lincoln, Nebr.

- A. STAUS und K. VON SANDEN. Der kreisrunde Ueberfall und seine Abarten. Munchen, Oldenbourg, 1926, 39 p.
- F.A. NAGLER and A. DAVIS. Experiments on discharge over spillways and models, Keokuk Dam. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 94 (1930), pp. 777-844, New York.
- L.B. FEAGIN. Results of efficiency tests at Wilson dam. *Power Plant Engineering*, 31 (1927), No. 15, pp. 832-835, Chicago.

NON-UNIFORM FLOW

- C. HERSCHEL. The Venturi water meter. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 17 (1887), pp. 228-258, New York.
- C. HERSCHEL. A farewell word on the Venturi meter. *Engineering News-Record*, 102 (1929), No 16, pp. 636-637, New York.
- V.M. CONE. The Venturi flume. *Journal of Agricultural Research*, 9 (1917), No. 4, pp. 115-129, Washington.
- R.L. PARSHALL. The improved Venturi flume. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 89 (1926), pp. 841-951, New York.
- I.A. WINTER. Improved type of flow meter for hydraulic turbines. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 99 (1934), pp. 847-872, New York.

AREA-VELOCITY METHODS

- K. SCHMITTHENNER. Ein neues Wassermessverfahren. *Zeit-*

- schrift des Vereins Deutscher Ingenieure*, 51 (1907), No. 16, pp. 627-631, Berlin.
- V. MANN. Beitrag zur Kenntnis der Wassermessung mittels Messschirms. München und Berlin, Oldenbourg, 1920, 35 p.

PITOMETERS

- H. PIROT. Description d'une machine pour mesurer des eaux courantes. *Memoires de l'Académie Royale des Sciences* (1732), 12 nov., pp. 363-376, Paris.
- E. S. COLE. Water waste and its detection. *Journal of the Western Society of Engineers*, 7 (1902), No. 6, pp. 574-595, Chicago.
- D. W. PROEBSTEL. Measuring water flow in conduits. *Electrical World*, 85 (1925), No. 14, pp. 711-712, New York.

CURRENT METERS

- R. WOLTMAN. Theorie und Gebrauch des hydrometrischen Flügels. Hamburg, Hoffmann, 1790.
- D. F. HENRY. Flow of water in rivers and canals. Detroit, Graham, 1873, 86 p.
- W. G. PRICE. Gauging of streams. *Journal of the Western Society of Engineers*, 3 (1898), No. 3, pp. 1025-1038, Chicago.
- J. M. MOUSSON. Water gaging for low-head units of high capacity. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 57 (1935), pp. 303-316, New York.
- S. KOLUPAILA. Use of current meters in turbulent and divergent channels. *International Association of Scientific Hydrology, General Assembly of Toronto, 1957*, 1 vol., pp. 437-444, Gentbrugge, 1958.
- A. MACKENZIE. Report on current meter observations in the Mississippi River, near Burlington, Iowa. Washington, 1884, 80 p.

CURRENT METERS IN PIPES

- H. DUFOUR. Flügel-Wassermessungen in Druckrohrleitungen. *Schweizerische Bauzeitung*, 84 (1924), No. 4, pp. 39-43, Zürich.
- L. A. ORT. Wassermessungen bei Wasserkraftanlagen. *Wasserkraft-Jahrbuch*, 1 (1924), pp. 253-282, München.

SALT-VELOCITY METHOD

- Ch. M. ALLEN and E. A. TAYLOR. The salt velocity method of water measurement. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 45 (1923), pp. 285-341, New York.
- M. A. MASON. Contribution à l'étude de la mesure des débits d'eau par la méthode Allen. *Revue Générale de l'Hydraulique*, 5 (1939), No. 28, pp. 177-194; No. 29, pp. 242-259, Paris.

DILUTION METHODS

- Th. SCHLOESING. Nouvelle méthode pour jauger les fluides. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences*, 57 (1863), 2 sem., No. 3, pp. 164-166, Paris.
- F. VAN IJERSON. Nieuwe methode ter bepaling van de waterhoeveelheid geleverd door centrifugalpomp. *De Ingenieur*, 15 (1900), No. 9, p. 130, s'Gravenhage.

- R. MELLET. Application de la titration des chlorures au jaugeage de débits. *Bulletin Technique de la Suisse Romande*, 36 (1910), No. 11, pp. 125-128, Lausanne.
- W. D. PEASLEE. The saline method of water flow measurement. *Journal of Electricity, Power and Gas*, 35 (1915), No. 8, pp. 130-135; No. 9, pp. 148-149, San Francisco.

IMPACT METHOD

- N. R. GIBSON. The Gibson method and apparatus for measuring the flow of water in closed conduits. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 45 (1923), pp. 343-376, New York.
- N. R. GIBSON. Experience in the use of the Gibson method of water measurement of efficiency tests of hydraulic turbine. *Journal of Basic Engineering, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 81 (1959), D, No 4, dec., pp. 456-487, New York.

OTHER METHODS

- A. KOLIN. Electromagnetic velometry, 1: A method for the determination of fluid velocity distribution in time and space. *Journal of Applied Physics*, 15 (1944), No. 2, pp. 150-164, Lancaster, Pa.
- R. C. SWENDEL and W. B. HESS. Development of the ultrasonic method for measurement of fluid flow. *Proceedings of the Sixth Hydraulics Conference, 1955*, pp. 61-72, Iowa City, 1956.
- P. G. HUBBARD. Operating manual for the IIHR hot-wire and hot-film anemometers. *State University of Iowa, Bulletin 37*, Iowa City, 1957, 31 p.
- L. BARBILLON et A. POIRSON. Méthode thermométrique pour la mesure du rendement des turbines hydrauliques. *Revue Générale d'Electricité*, 10 (1921), No. 21, p. 780, Paris.
- G. WILLM et P. CAMPAS. Mesure du rendement des turbines hydrauliques par la méthode thermométrique Poirson. *La Houille Blanche*, 9 (1954), No. 4, pp. 449-460; No. 5, pp. 590-607, Grenoble.

COMPARATIVE TESTS

- L. W. COLLET, R. MELLET et O. LUTSCHG. Jaugeages par titrations et essais comparatifs effectués à l'usine hydroélectrique de l'Ackersand. *Communications du Service de l'Hydrographie Nationale*, No. 1, Berne, 1913, 24 p.
- F. KUNTSCHEN. Essais comparatifs dans les canaux de fuite de l'usine d'Amsteg. *Communications du Service des Eaux*, No. 18, Berne, 1926, 107 p.
- O. KIRSCHMER. Vergleichs-Wassermessungen am Walchenseewerk. *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure*, 74 (1930), No. 17, pp. 521-528, Berlin.
- O. KIRSCHMER und B. ESTERER. Die Genauigkeit einiger Wassermessverfahren. *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure*, 74 (1930), No. 44, pp. 1499-1504, Berlin.
- F. A. L. WINTERVITZ. Comparison of flow measuring techniques at Kinlochleven hydroelectric station. *Mechanical Engineering Research Laboratory, Fluid Mechanics Division*. Fluids Report No. 59 (Preliminary tests) and No. 65 (Final tests). Kilbride, Glasgow, 1957 and 1958, 53 and 60 p.

Cette liste est très courte. Une bibliographie plus étendue, compilée par l'auteur, est en cours de publication par l'Université de Notre Dame; elle est subventionnée par la Fondation Scientifique Nationale des Etats-Unis.

This bibliography is very short. The author compiled a large Bibliography of hydrometry, which is now being published by the University of Notre Dame with a grant from the National Science Foundation of the United States.