



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

ÉVOLUTION RÉCENTE DE LA TECHNIQUE DES JAUGEAGES INDUSTRIELS AUX MOULINETS DANS LES ÉCOULEMENTS EN CHARGE

PAR J. GABAUDAN *
ET B. NOIRET *

Le moulinet est un instrument de mesure ancien puisque c'est en 1795 que l'on situe son invention par Woltmann sous sa forme à hélice, seule utilisée en Europe, et en 1882 par Price sous la forme à coupelles très répandue aux Etats-Unis. Depuis, dans de nombreux pays, des travaux ont été motivés par l'établissement de la théorie et le perfectionnement de cet appareil. Il n'entre pas dans le cadre de cette communication de les citer, mais il convient de dire ici que des personnalités françaises éminentes ont apporté leur contribution, notamment les directeurs ou ingénieurs de la Société Hydrotechnique de France qui exploite à Beauvert, près de Grenoble, une station d'étalonnage de moulinets. Les travaux anciens ont été très importants et ont évoqué la plupart des questions que l'on peut se poser au sujet de l'emploi de ces appareils. Cependant, ceux-ci échappent à une théorie rigoureuse et la qualité des résultats obtenus dans les jaugeages est liée à l'observation de nombreuses « règles de l'art ». Celles-ci visent essentiellement à maintenir inchangé l'équilibre des incertitudes d'origines diverses et connues, mais mal définies, qui demeurent liées à l'imperfection de principe de l'étalonnage. A titre d'exemple, celui-ci ne peut rendre compte des fluctuations des vitesses locales d'un écoulement en amplitude et direction; de plus, on l'a toujours soupçonné de souffrir du paradoxe de du Buat selon lequel, pour une même vitesse relative, l'impulsion d'un liquide en mouvement sur un corps solide au repos est supérieure à la résistance opposée au déplacement de ce même corps dans le liquide au repos.

Le moulinet peut donc être considéré comme le témoin fidèle de la mesure précise de vitesse que l'on fait en laboratoire. On risque, dans toute tentative d'évolution de sa technique ou de sa construction, de détruire cette fidélité acquise, dans des conditions bien définies, grâce à une somme de connaissances expérimentales dont la valeur est liée à l'homogénéité que l'usage a progressivement sanctionnée et à la comparaison à d'autres méthodes de mesure.

Dans le domaine des machines hydrauliques que nous considérerons plus particulièrement, des conditions nouvelles de mesure ont été créées par les caractéristiques des aménagements récents: conduites forcées de grand diamètre et de faible longueur, pertuis d'entrée des installations de basse chute plus courts et de forme très convergente. Il fallait donc répondre à ce changement. En outre, tout expérimentateur porte en lui le désir d'amélioration et ne peut se résigner à ignorer la valeur des incertitudes dont il connaît l'existence. Lorsqu'il s'agit, par exemple, de déterminer le rendement d'une machine hydraulique, on constate que les incertitudes relatives aux mesures de débit sont nettement supérieures à celles des mesures électriques. Ce défaut d'homogénéité est une forte incitation à la recherche d'une précision accrue. Dans cette recherche, les deux principales orientations choisies ont concerné l'influence de l'ensemble des parties fixes (corps et support du moulinet) et celle des fluctuations turbulentes.

Une deuxième partie des travaux effectués au cours des dix dernières années a été motivée par la simplification du mode opératoire et du matériel, et leur adaptation aux moyens modernes.

Les préoccupations ainsi rapidement définies ont

* Ingénieurs de la Division Technique Générale d'E.D.F., Grenoble.

été celles des quelque vingt-cinq à trente expérimentateurs européens appartenant depuis 1959 à un groupe de travail (International Current Meter Group, I.C.M.G.) qui a choisi pour objectifs de confronter les expériences de ses membres et d'approfondir des sujets particuliers d'étude ou d'expérimentation. Le Président-fondateur de ce groupe est le Professeur Gerber, de l'« Institut des Installations et Machines Hydrauliques » de Zürich. Ce groupe, auquel plusieurs praticiens français appartiennent, est, à notre connaissance, le principal responsable de l'évolution récente dans le domaine considéré. Avec l'accord de son Président actuel, le Dr. Ing. Tonini, chef du Service Hydrologique au Département des Etudes et Recherches de l'E.N.E.L. à Venise, nous vous donnerons un aperçu des recherches entreprises dans les domaines cités plus haut; ensuite nous traiterons plus particulièrement de deux tentatives d'évolution auxquelles nous avons participé.



Dans la recherche d'une diminution des incertitudes de mesure, nous évoquerons d'abord l'influence des parties fixes. Le champ des vitesses au voisinage de l'hélice est fortement marqué par l'influence du corps du moulinet et de son support. La forme de ce champ, lié à l'appareil, n'est pas la même en canal d'étalonnage et en conduite forcée par exemple. Dans ce dernier cas, la présence d'un dispositif de jaugeage complet et l'absence de niveau libre ont une influence qui s'apparente à une obstruction de la section de jaugeage: on constate un accroissement des vitesses en rapport direct avec la surface « frontale » des moulinets et de leurs supports. Remarquons à ce sujet qu'un phénomène de ce genre se produit dans le canal d'étalonnage lorsque le moulinet est déplacé près du fond du canal: pour une même vitesse de translation, il est légèrement accéléré par rapport à son déplacement près de la surface. Cette constatation peut s'expliquer par la déformation de la surface libre au voisinage du moulinet; elle montre bien l'intervention nécessaire de « règles de l'art ».

Plusieurs recherches ont eu pour objet la définition du lien entre les paramètres géométriques du dispositif de jaugeage et l'écart entre valeurs de débit mesurées. Dans tous les cas, les auteurs ont choisi comme paramètre géométrique la surface « frontale » et ont admis que la valeur exacte du débit était obtenue par une extrapolation linéaire, jusqu'à une surface frontale nulle, des valeurs obtenues en présence de dispositifs différents. La modification de surface était obtenue par changement de profil des supports, du nombre de ceux-ci, ou du nombre des moulinets. Les mesures ont été conduites selon des procédés différents: on trouve, à l'origine, des mesures faites en laboratoire dans un canal à écoulement libre qui avait conduit à une formulation de l'erreur; plus tard, des mesures ont été effectuées dans un courant d'air en conduite; des jaugeages industriels, spécialement conçus pour que soit atteinte une excellente précision « différentielle », ont complété les résultats précédents. Il faut signaler, en outre, une vérification originale qui consistait en un étalonnage en eau calme, dans un puits vertical de grand diamètre, d'un dispositif

de jaugeage complet. Enfin, des jaugeages ont été réalisés dans une conduite forcée dont un élément de faible longueur portant un croisillon de jaugeage pouvait être retiré par une cheminée et mis à l'air libre pour un changement d'appareillage sans interruption du débit. Les résultats de ces différentes mesures donnent seulement un ordre de grandeur de l'erreur commise: selon les estimations, celle-ci varie de 0,1 à 0,3 % par unité de surface frontale exprimée en pour cent de la surface de la section de jaugeage.

Dans le courant de l'année 1968, une série importante de mesures a été préparée et exécutée en Suisse sous la direction du Professeur Gerber: elle couvre un large domaine de vitesses d'écoulement et de variantes du dispositif de jaugeage. Egalement dans le cadre des travaux de l'I.C.M.G., des mesures d'ampleur plus réduite et de conception pratique différente ont été exécutées récemment en Italie sous la direction du Dr. Ing. Tonini en collaboration avec Electricité de France. Les résultats de ces deux expérimentations ne sont pas encore connus; ils permettront probablement une appréciation plus exacte de l'effet d'« interférence » ou d'« obstruction ». Sur ce même sujet une thèse de doctorat a été présentée récemment à l'Ecole Polytechnique de l'Université de Lausanne; nous n'en avons pas encore la teneur mais un premier état des travaux, présenté en 1966, faisait espérer la possibilité de calculer, *a priori*, la correction applicable à différentes configurations et esquissait les formes de support propres à réduire l'effet d'interférence. Cette dernière perspective rejoint le souhait que nous avions exprimé selon lequel un effort devait être consenti dans la recherche des formes de moulinets et des supports de façon à réduire sensiblement les corrections et, par conséquent, les discussions qu'entraînerait leur prise en considération dans des textes de normalisation. Il est probable que dans les prochaines années un important progrès sera accompli dans le domaine considéré.



Une autre différence essentielle entre les jaugeages industriels et les étalonnages a pour origine les fluctuations turbulentes de vitesse. Celles-ci peuvent intéresser uniformément toute la section de l'hélice: dans ce cas, certaines mesures particulières effectuées en laboratoire pour reproduire artificiellement ces fluctuations, rendent compte du phénomène. Pour fixer les idées, les écarts peuvent atteindre 1 % pour des fluctuations de vitesse représentant 10 % de la vitesse de base; ils croissent fortement au-delà. Qualitativement, ces résultats expérimentaux font ressortir particulièrement l'influence de la densité et de la forme des hélices. Ils corroborent une étude théorique sur le même sujet. Bien que les fluctuations dans les écoulements réels soient plus complexes que celles simulées, il est probable qu'un progrès serait accompli par le choix d'un nombre d'hélices réduit inspiré des résultats déjà obtenus. On réduirait, en outre, par cette sélection, l'ampleur de la recherche expérimentale en conduite forcée de l'incidence des fluctuations réelles. Une telle recherche a été commencée récemment à l'occasion des mesures citées plus haut à propos de l'effet d'interférence.

**

Parmi les progrès d'ordre technologique, il faut citer l'usage de dispositifs émetteurs beaucoup plus sûrs : le contact est établi généralement par un interrupteur à lame souple situé dans une enceinte fermée et déplacé par un aimant lié à la partie tournante. Les paliers à billes sont en acier inoxydable; leur qualité et leur longévité sont accrues. L'enregistrement et le comptage des impulsions émises par les appareils se font sur des ensembles qui comportent parfois des dispositifs de mise en forme de ces impulsions pour assurer une plus grande sûreté. Le calcul des débits, à partir de la mesure des vitesses ponctuelles, est souvent traité par voie entièrement numérique sur ordinateur. Celui-ci est parfois un appareil spécialement conçu et transportable. Les méthodes analytiques d'interpolation entre points de mesure ont été perfectionnées et leurs résultats confrontés avec succès aux tracés graphiques traditionnels.

**

Nous développerons maintenant deux tentatives d'évolution auxquelles nous avons participé : la première visait à la simplification des opérations d'étalonnage par la création d'hélices de formes très voisines entre elles et le contrôle des couples résistants; dans la seconde, un procédé de jaugeage applicable aux écoulements à filets non parallèles était recherché.

Les Services d'Etudes et Recherches d'Electricité de France avaient déjà tenté une expérience de fabrication d'hélices en alliage léger moulées sous pression, et avaient obtenu une identité de forme suffisante pour que, dans les jaugeages nécessitant un nombre élevé de moulinets, une équation moyenne, déterminée sur un échantillon, puisse être utilisée valablement. Cependant, cette fabrication comportait certains défauts inhérents à l'imperfection des moyens de l'époque.

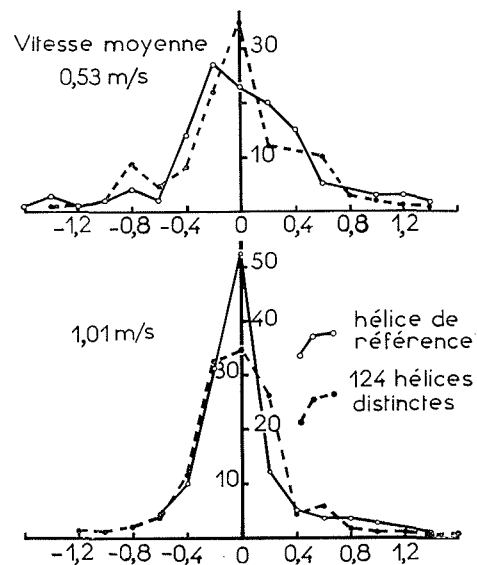
Les progrès des matières plastiques et de leur moulage précis ouvraient une nouvelle voie de fabrication dont on pouvait espérer qu'elle donnerait des hélices très semblables entre elles et, de plus, d'un prix de revient unitaire très faible. Nous avons donc fait réaliser un moule et après de nombreuses mises au point, nous avons obtenu un lot de 500 hélices qu'il convenait de contrôler. Les mises au point avaient porté sur la matière employée : après plusieurs essais, nous avons choisi le « kralastic », nom donné à un type de polystyrène caractérisé notamment par une densité très voisine de 1, un coefficient de dilatation linéaire voisin de 1.10^{-4} et un coefficient d'élasticité relativement élevé.

Le contrôle a porté en premier lieu sur le pas géométrique moyen de l'une et l'autre pales : il était réalisé par référence à un gabarit métallique rigide. La grandeur caractéristique de base choisie était la pente locale entre les points de mesure pris deux à deux, ou plus exactement les écarts entre cette pente et la valeur moyenne correspondante de l'ensemble des hélices contrôlées. En considérant en second stade une pente moyenne par pale, on a sélectionné 400 des 500 hélices qui répondaient au critère de choix suivant : la pente de l'une ou l'autre des deux pales ne s'écartait pas de la valeur

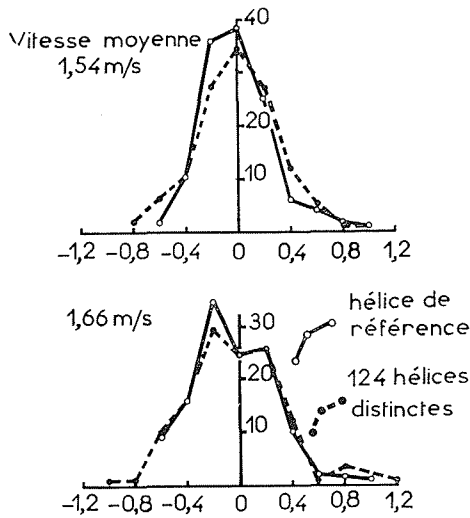
moyenne correspondante du lot de plus de $\pm 0,2\%$ dans des conditions données de température. L'influence de celle-ci était inférieure à $0,1\%$ dans la plage $0-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nous avons constaté, par ailleurs, que le vieillissement de ces hélices n'entraînait pas d'altération de forme appréciable.

Dans le nouveau lot obtenu, on a choisi au hasard 124 hélices qui ont été soumises à un étalonnage en eau calme. Ces étalonnages ne portaient que sur cinq valeurs de vitesse; les hélices étaient étalonnées une à une et équipées du même palier à billes parfaitement contrôlé selon le procédé de mesure des couples que nous indiquerons plus loin. Lors de chaque étalonnage, une hélice du lot, considérée comme témoin, était étalonnée dans les mêmes conditions. On a donc obtenu de cette hélice 124 étalonnages successifs. On a classé dans les deux ensembles de 124 étalonnages, et pour chacune des cinq vitesses, les écarts à la moyenne des résultats isolés. On observe sur les figures 1 et 2 que les deux graphiques relatifs à la même vitesse donnant le nombre d'hélices par tranches d'écart de $0,2\%$ dans chacun des deux ensembles, ont une grande analogie : leur amplitude maximale et la distribution des écarts sont très proches. Ceci permet de penser que l'origine principale des écarts constatés est liée aux opérations d'étalonnage et que les autres origines : modification du couple résistant des paliers à billes, différences des formes des hélices, sont de faible importance par rapport à elle.

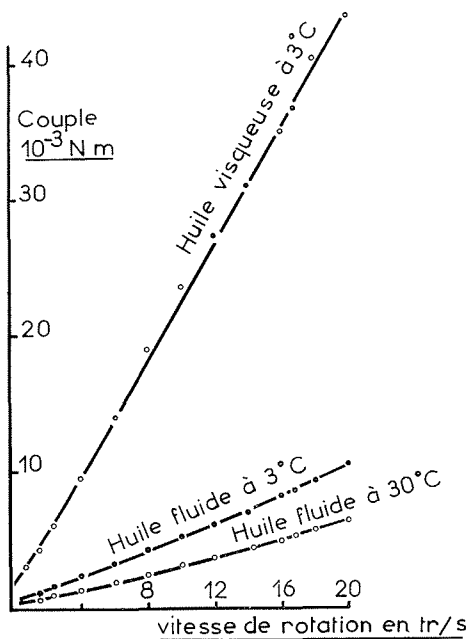
Cette constatation est exactement celle d'une étude récente faite par deux expérimentateurs américains appartenant au « Geological Survey ». Les auteurs ont considéré un lot de 140 moulinets du type « Price » fournis par trois constructeurs différents : ils arrivent à la conclusion que, pour la fourniture d'un constructeur, l'équation d'étalonnage moyenne est aussi représentative que l'une quelconque des équations des appareils isolés. Ce jugement n'est pas un jugement de valeur, mais



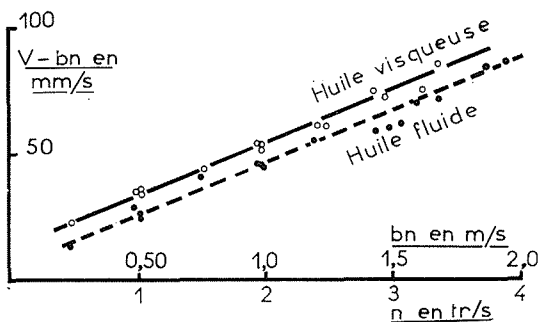
1/ Dispersion dans l'étalonnage des hélices en matière plastique. Nombre de résultats par tranches d'écarts de $0,2\%$.



2/ Dispersion dans l'étalonnage des hélices en matière plastique. Nombre de résultats par tranches d'écart de 0,2 %.



3/ Couple résistant des paliers à billes de moulinets.



4/ Influence de l'huile de graissage sur l'étalonnage.

plutôt une comparaison entre les qualités des appareils et celles des étalonnages. On peut considérer que les résultats d'étalonnage obtenus pour l'ensemble des hélices sont satisfaisants. Remarquons à ce propos que, dans le cas de nos mesures, les résultats de près de 90 % des hélices s'écartent de la valeur moyenne de moins de $\pm 0,5 \%$, mais on peut dire aussi, si l'on est plus exigeant, que la dispersion propre de la station d'étalonnage doit être améliorée pour qu'un jugement plus fin soit porté sur la fabrication des hélices. Cette exigence est à l'origine d'une évolution que nous nous efforçons de considérer par ailleurs.

Dans les cas fréquents où les moulinets sont utilisés en nombre assez élevé (plusieurs dizaines), les résultats obtenus pourraient être considérés comme bons : l'incertitude venant du choix d'une équation d'étalonnage moyenne serait de l'ordre de 0,1 %.

A cet effort dans la recherche d'une identité de forme des hélices, nous avons associé un contrôle systématique des couples résistants des paliers à billes. Ces couples sont mesurés par ralentissement dans l'air, l'hélice étant remplacée par un disque offrant une faible résistance à la rotation. Ce procédé simple nous a permis de caractériser l'influence sur les couples résistants : de la température, des qualités de roulement de plusieurs paliers à billes réputés identiques et en bon état, et du mécanisme de contact. La figure 3 montre la variation du couple résistant en fonction de la vitesse de rotation : la courbe inférieure caractérise le couple à 3° avec l'huile fluide habituelle (viscosité 7.10^{-3} poiseuilles à 20 °C), la courbe intermédiaire le couple à 3° avec la même huile et la courbe supérieure le couple à 3° avec une huile visqueuse (viscosité 50.10^{-3} poiseuilles à 20 °C). Pour une même vitesse de rotation, les couples correspondant à chacune des courbes peuvent être mesurés schématiquement par les valeurs 1, 2 et 8.

Cette schématisation est à l'origine d'une évaluation de l'ordre de grandeur de l'influence de la température sur le résultat des étalonnages : il est impossible, en effet, de réaliser dans le canal d'étalonnage des variations de température de 3 à 30° ; de plus, les écarts dans les résultats ne seraient probablement pas significatifs. Nous avons donc étalonné un même appareil successivement lubrifié avec les huiles fluide et visqueuse considérées ci-dessus, l'eau du canal étant à une température voisine de 3°. La figure 4 montre que la droite d'étalonnage dans la représentation habituelle se déplace parallèlement à elle-même d'un écart voisin de 0,01 m/s. A défaut d'un nouvel étalonnage qui aurait précisé l'allure de la variation de cet écart avec les différences de couple, on peut admettre une loi linéaire ; on constate que, dans le domaine le plus large de température observé en hydraulique (0 - 30°) et avec l'huile fluide habituellement utilisée, l'incidence de la variation de température sur l'étalonnage est de l'ordre de 0,002 m/s.

On note, par ailleurs, que l'écart extrême de couple résistant, entre les paliers à billes les plus différents d'un lot important, est environ 5 fois plus faible que celui observé pour un même palier du fait de la température et dans la plage citée. Enfin, le mécanisme de contact n'a pas d'incidence

sensible, au moins pour des vitesses de rotation supérieures à 2 tr/s.

Le contrôle de forme des hélices et celui des couples des paliers autorisent l'espoir que, dans l'avenir, les constructeurs pourraient livrer des appareils qu'il ne serait pas nécessaire d'étalonner. Ceci existe déjà avec une marge d'incertitude de $\pm 1\%$ sur l'étalonnage; cette marge sera probablement réduite. L'utilisateur pourrait lui-même procéder à des contrôles simples de forme et remplacer les hélices dès la moindre altération, car des hélices moulées seraient de faible prix. C'est en tout cas le vœu que nous formons et à la réalisation duquel nous avons participé.

Deux remarques ou constatations doivent compléter les résultats précédents : en premier lieu, nous n'avons pas utilisé jusqu'à maintenant les hélices moulées en matière plastique dans des mesures de caractère contractuel. En effet, leur fabrication ayant précédé les constatations les plus nettes sur l'influence de la turbulence, il n'est pas certain que leur forme soit la plus appropriée. Nous avons constaté à deux reprises, lors de jaugeages en conduite forcée, qu'elles donnaient des vitesses supérieures de 1 % en moyenne à celles données par les appareils que nous utilisons jusqu'à maintenant. On mesure par là les difficultés à vaincre dans l'accomplissement des progrès et la nécessaire concertation qui doit s'établir entre utilisateurs et constructeurs. Une telle concertation est favorisée par les contacts qui s'établissent au sein de l'I.C.M.G.

Une autre constatation concerne le rôle des stations d'étalonnage : le travail de celles-ci devrait, à l'avenir, diminuer si les opérations concernaient seulement un échantillon d'appareils dans un lot. C'est effectivement ce que nous attendions pour notre station de Beauvert de la mise en service des hélices nouvelles; mais les exigences de précision dont nous avons fait état à plusieurs reprises devraient conduire à une amélioration de certaines stations actuelles dont la nôtre. Il pourrait y avoir concentration des moyens pour atteindre cet objectif.

Un autre sujet touchant à l'extension du domaine d'emploi des jaugeages au moulinet a été considéré plus particulièrement dans l'activité des expérimentateurs : il s'agit des mesures dans des écoulements à filets non parallèles. Dans les ouvrages d'amenée des centrales de basse chute, ces écoulements se rencontrent fréquemment. M. Bonnafous a présenté, lors d'une réunion antérieure du Comité Technique, un procédé applicable au cas où le défaut du parallélisme existe dans le plan vertical seulement. Ce procédé consiste à explorer une section de jaugeage plane et verticale par un support horizontal qui peut tourner autour de son axe. Les moulinets portés par ce support sont orientés successivement dans deux directions qui encadrent celle présumée de la vitesse; le rapport des deux vitesses mesurées, préalablement étalonné, donne l'orientation de la vitesse. Une troisième mesure dans cette orientation en donne la grandeur.

De notre côté, et toujours dans le cas d'un défaut

de parallélisme dans un seul plan, nous avons à deux reprises utilisé une section de jaugeage épousant une surface équipotentielle de l'écoulement. Cette façon de procéder suppose une préparation particulière au moment de la construction des ouvrages et nécessite bien souvent l'intervention de plongeurs autonomes. Cependant, sous réserve que les angles de l'écoulement soient proches de ceux déterminés en modèle réduit (on peut tolérer un écart de quelques degrés), elle évite une mesure précise d'angle dans les jaugeages; de plus, les calculs sont aussi simples que ceux relatifs aux jaugeages en écoulement parallèle. Enfin, elle pourrait être étendue au cas d'écoulements dont les parois ne présenteraient aucun parallélisme; il faudrait alors utiliser un dispositif de jaugeage fixe. L'évolution dans ce domaine est lente, du fait notamment de l'importance des frais engagés par de tels jaugeages; signalons toutefois à ce sujet qu'une comparaison de ces deux procédés de jaugeage, qui serait de nature à faire progresser les méthodes, est en cours dans l'usine de Bourg-les-Valence. La Compagnie Nationale du Rhône, qui attache un grand intérêt aux performances de ses installations, a bien voulu rendre possibles les mesures nécessaires.

La technique des jaugeages au moulinet dans les écoulements en charge a été longtemps considérée comme la plus exacte, et sa mise en œuvre relativement simple l'a fait adopter universellement dans la mesure des débits de quelque importance, malgré les sujétions qu'elle entraîne. Les fortes traditions acquises ont longtemps maintenu inchangée cette technique; une évolution commencée dans les dix dernières années tend à réduire quelques incertitudes d'origine connue. La tâche est très vaste du fait notamment du caractère empirique de certaines recherches qui ont du mal à cerner les influences de tous les paramètres. Toutefois, la collaboration établie entre praticiens et chercheurs de laboratoire, et la concertation existant au sein d'un groupe de travail spécialisé, ont des chances réelles de mieux définir les deux questions principales, actuellement posées avec le plus d'acuité : l'influence des parties fixes sur la réponse du moulinet et l'influence des fluctuations turbulentes. Un choix de l'appareillage le plus approprié devrait être proposé à la suite de travaux en cours.

Ce progrès possible répondrait aux exigences croissantes de précision dans la détermination des performances des machines hydrauliques et, d'une façon générale, dans les contrôles de débit d'eau qui prennent une importance accrue. Selon le résultat des travaux des auteurs, il pourrait être accompagné d'un progrès d'ordre technologique qui simplifierait les opérations d'étalonnage.

Malgré la mise au point récente d'autres méthodes, et notamment la méthode thermodynamique avec laquelle elle se trouve en bon accord, la méthode de jaugeage au moulinet conserve un champ d'application vaste qui justifie les efforts de recherche évoqués.

Bibliographie

- RÉMÉNIÉRAS (M.). — Les moulinets hydrométriques. Théorie, tarage, précision. *Société Hydrotechnique de France*, (février 1942).
- MUSZKALAY (L.). — Validité de l'étalonnage des moulinets. *Revue Vizügyi Közlemenyek*, (1959/1).
- JOHNSON (R.L.). — Etudes expérimentales sur des moulinets. Division Hydraulic Laboratory, U.S. Army, Bonneville, Oregon, (1966).

SMOOT (G.F.) et CARTER (R.W.). — (Geological Survey). Les étalonnages individuels de moulinets sont-ils nécessaires ? *Journal of the Hydraulic Division, A.S.C.E.*, vol. 94, N° HY 2, (mars 1968).

TROSKOLANSKI (A.T.). — Théorie et pratique des mesures hydrauliques. Editions Dunod, Paris.

Publications de l'I.C.M.G., ou communications faites à l'occasion des réunions de l'I.C.M.G. La liste complète, trop longue pour être donnée ici, est tenue à jour par le Secrétaire de l'I.C.M.G. : M. THIBESSARD.

Discussion

Président : M. CHAUVET

M. le Président remercie M. GABAUDAN de son intéressant exposé et ouvre la discussion.

M. RÉMÉNIÉRAS demande si, pour la vérification de routine de l'étalonnage des moulinets, on utilise encore le procédé consistant à disposer l'appareil dans la section de sortie d'une tuyère noyée spécialement étudiée pour que la vitesse de l'eau en chacun des points de ladite section soit sensiblement égale à la vitesse moyenne dans la veine (tuyère mise au point vers 1930 par le Laboratoire de Beauverit de la S.H.F.).

M. GABAUDAN répond négativement, la vérification de la fidélité étant réalisée aujourd'hui par d'autres procédés.

A la demande de M. LUGIET et pour concrétiser la précision des stations de tarage des moulinets, M. GABAUDAN indique que lors d'une récente comparaison internationale des étalonnages effectués sur un même moulinet par huit stations différentes, les courbes de tarage se groupaient dans une bande d'incertitude de l'ordre de $\pm 0,5\%$.

M. THIRRIOT résume en ces termes quelques travaux effectués par l'Institut de Mécanique des fluides de Toulouse : « Avec quelques scrupules, car je suis vraiment non spécialiste dans l'utilisation des moulinets, je voudrais signaler quelques expériences menées sous la direction de mon maître le Professeur Escande et de M. Castex, Ingénieur en Chef au Laboratoire, par M. Carvounas, Docteur-Ingénieur.

« Ces expériences avaient pour but de simuler l'influence de la turbulence sur la mesure de la vitesse et aussi l'examen de l'influence de l'inclinaison de l'axe du moulinet.

« Pour simuler la turbulence, deux types d'expériences ont été réalisés dans le grand canal de tarage de Banlève.

« Dans une première série d'essais, on faisait « godiller » le moulinet, qui oscillait périodiquement avec une inclinaison maximale pouvant atteindre 20°. Autant que je me souviens, le mouvement alternatif avec une amplitude de 10° n'entraîne pas d'écart appréciable par rapport à l'indication donnée par le moulinet dirigé suivant le déplacement du chariot d'entraînement.

« Dans une autre série d'expériences, le moulinet était placé dans le sillage d'une grille à différentes distances de celle-ci.

« Enfin, pour étudier la turbulence macroscopique ou les répartitions de vitesse en régime transitoire, signalons une réalisation de micromoulinet effectuée dans notre laboratoire, par M. Nguyen Van Qué, attaché de recherches au C.N.R.S. Ce micromoulinet, dont l'hélice a un diamètre de 2,8 mm, d'inertie pratiquement négligeable, permet de détecter des vitesses de 1 cm/s et, circonstance favorable, la courbe d'étalonnage est presque réversible lorsque change le sens de la vitesse, ce qui permet d'envisager l'étude des

écoulements transitoires avec inversion de vitesse, comme c'est le cas dans la propagation d'intumescences. »

L'exposé de MM. GABAUDAN et NOIRET, observe M. THIBESSARD, montre que de nombreuses causes de l'incertitude de la mesure des débits en conduite sont en passe d'être mieux connues.

On peut raisonnablement espérer que l'incertitude globale prise actuellement en compte dans les mesures de débit par moulinet sera progressivement remplacée par une série de corrections de mieux en mieux déterminées. Il en résultera une erreur globale sur le débit dont on peut espérer qu'elle ne sera pas ridicule devant les valeurs annoncées pour les dispositifs déprimogènes.

M. RÉMÉNIÉRAS demande s'il est bien prouvé expérimentalement qu'une hélice légère diminue l'influence de la turbulence sur la précision du moulinet employé pour mesurer la vitesse moyenne de l'eau sur une base de l'ordre de la minute; *a priori*, on pourrait penser qu'une hélice d'inertie notable et judicieusement adaptée intégrerait mieux les variations de vitesse en fonctionnant en quelque sorte « en balistique ».

M. NOIRET précise qu'effectivement des expériences nombreuses et des théories récentes montrent bien que les hélices les plus légères sont les moins influencées par les fluctuations longitudinales de vitesse.

A M. THIBESSARD, M. NOIRET répond :

« Ce qu'il faut viser, ce n'est pas l'établissement de corrections à apporter aux mesures, mais on doit pouvoir perfectionner le matériel pour réduire, sinon annuler, les corrections systématiques et donc limiter les incertitudes. On sait, en effet, qu'il faut faire des hélices légères; les expériences en cours devraient conduire à définir des formes optimales. Quant à l'effet d'obstruction, on doit pouvoir le réduire aussi en reconsidérant la construction du moulinet (jusqu'à maintenant, il n'a guère varié d'encombrement, et la distance de l'hélice à la perche-support a toujours été voisine de 30 cm). »

M. DUMAS rappelle la méthode d'étalonnage préconisée par J. Weisbach (1) qui consiste à placer le moulinet dans un petit canal siège d'un écoulement libre en régime permanent et à le déplacer systématiquement dans la section droite de ce canal. Le moulinet est ainsi soumis à l'influence de la turbulence régnante et à différents gradients de vitesses.

(1) WEISBACH (Julius) : « Lehrbuch der Ingenieur und Maschinen Mechanik », I Teil, 5. Aufl., Leipzig, 1870. Traduction dans : Eckley. B. COXE AM : « A Manual of Mechanics of Engineering », London *Trübner and Co.*, Ludgate Hill, 1877 (Paragraphe 491, pp. 995 et 996 de la traduction).

Abstract**Recent advances in industrial current meter pressure flow measurement techniques****by J. Gabaudan * and B. Noiret ***

Current meters have been in use for flow gauging purposes for a very long time. They are subject to stringent requirements, especially when used as a check on hydraulic machine performance. The very principle of their operation, however, is a source of uncertainty, consisting as it does in the use of a current meter calibrated in calm water in a flume to measure discharge in turbulent flow in an enclosed space. Methods of use based on sound experience have managed to keep this margin of error within reasonably close limits.

The increasingly wide range of use of these instruments and the wish to achieve greater accuracy have been followed by intensified research, which has centred around the two most important effects discovered in previous research, namely (i) an 'interference' effect between the current meters and their supports and (ii) the effect of flow turbulence. This research has now progressed so far that it should soon be possible to reduce these effects, for example by a careful reappraisal and choice among existing equipment.

On the current meter data output side, improvements have been made to the impulse emission system and to velocity and discharge calculation methods.

Technological progress has also been made with ball-bearing and propeller manufacture, with the result that it should now be possible to cut down considerably on calibration operations, which would be replaced by simple propeller geometry and bearing opposing torque checks.

Finally, two gauging methods for convergent streamline flow are mentioned, which tend to improve measurement accuracy in this field and which have recently been compared.



* Ingénieurs de la Division Technique Générale d'E.D.F., Grenoble.

