Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 77 (1959)

Heft: 24

Artikel: Réflexions au sujet des essais contractuels de cavitation effectués sur modèles réduits de turbines hydrauliques

Autor: Fauconnet, M.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-84268

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

stehen ebenfalls schwierige Probleme in bezug auf die Modellgesetze für das Kavitationsverhalten. Es ist deshalb dringend nötig, dass weitere Forschungsarbeit auf dem Gebiet der Modellgesetze geleistet werde und das Mechanical Engineering Research Laboratory hofft, einige der Probleme untersuchen zu können. Nur eine statistische Analyse einer grossen Zahl von systematisch durchgeführten Versuchen wird es ermöglichen, gute, allgemein gültige Gesetze für die Modellähnlichkeit aufzustellen und genügend zuverlässige Aufwertungsformeln für vertragliche Zwecke zu liefern. Damit ist weiter die Hoffnung verbunden, dass durch die Betonung der auf diesem Gebiet noch bestehenden Schwierigkeiten dieser Vortrag das allgemeine Interesse all derjenigen angeregt habe, die berufen sind, an der Lösung der verbleibenden Probleme über die Modellgesetze mitzuarbeiten.

Literaturangaben

[1] *Riemerschmid, F.:* Der Einfluss der Zähigkeit des Wassers auf die hydraulischen Eigenschaften einer kleinen Francismodell-Turbine. «Mitt. des Hydraulischen Instituts der Technischen Hochschule, München», 1932, *5*, pp. 20—46.

[2] *Grégoric, R.:* Der Wirkungsgrad einer Wasserturbine bei veränderlichem Gefälle, Dimensionen und Temperaturen des Betriebswassers. «Schweiz. Bauztg.», 1933, *102* (15), p. 181.

[3] *Chistyakov, A. M.:* Some considerations on theoretical investigations of size effect in water turbines and on the physical nature of this phenomenon. «Izvestia VN». 11 G, 1955, *54*, pp. 185—197.

[4] *Rhoden, H. G.:* Effects of Reynolds number on the flow of air through a cascade of compressor blades. «Aeronautical Research Council — Reports and Memoranda» No. 2919, 1956.

[5] *Sawyer, W. T.:* Experimental investigation of a stationary cascade of aerodynamic profiles. «Mitt. Inst. Aerod., E. T. H. Zurich», 1949, No. 17.

[6] *Hutton, S. P.:* The prediction of venturimeter coefficients and their variation with roughness and age. Proc. Instn. Civ. Engrs., 1954, *3* (3), pp. 216—241 and pp. 922—927.

[7] *Hutton, S. P.:* Component losses in Kaplan turbines and the prediction of efficiency from model tests. «Proc. Instn. Mech. Engrs.», 1954, *168* (28), pp. 743—762.

[8] *Mühlemann, E.:* Zur Aufwertung des Wirkungsgrades von Ueberdruck-Wasserturbinen. «Schweiz. Bauztg.» 1948, *66* (24), pp. 331—333.

[9] *Moody, L. F.:* Efficiency and power step-up. «Proc. A.S.C.E.», 1939, *65*, p. 1584.

[10] *Moody, L. F.:* Handbook of applied hydraulics by C. Davis, 1942, McGraw-Hill Publishing Co., London and New York, p. 55.

[11] *Vazeille, R.:* Transposition des rendements, 1958. V^es Journées de l'Hydraulique, Société Hydrotechnique de France (Aix-en-Provence).

[12] *Miyagi, O.:* Estimation of the efficiencies of the Francis, Propeller and Kaplan turbines by means of their model experiments, 1937, «Technical Reports of Tohoku Imperial University», 12 *(3)*, pp. 137—161.

[13] *Fay, C.:* Theoretische Grundlagen der Modellgesetze und Umrechnung der Messergebnisse an Ueberdruckturbinen. «Acta Tecnica — Budapest», 1958, *21* (3—4), pp. 403—421.

[14] *Kwiatowski, W. S.:* Rabotschii Prozess osewoi gidroturbinu, Trudy V. I. G. M., Mashgiz, Moscow, 1951.

[15] *Nechleba, M.:* Kzakonu hydraulickej podobostni vodnych turbin, «Techn. Sbornik Slovenskej akademie vied», 1952.

[16] *Thoma, D.:* Die Kavitation bei Wasserturbinen. Prague Wasserkraftjb 1924, pp. 409—420.

[17] *Danel, P.,* and *Duport, J. P.:* Quelques aspects de la similitude du seuil de cavitation dans les turbo-machines. 7th Congress International Association for Hydraulic Structures Research — Lisbon, July 1957.

[18] *Gerber, H.:* Some reflections on model scale formulae for cavitation phenomena. Cavitation Symposium — N. P. L. — Her Majesty's Stationery Office, London, 1956.

[19] *Edstrand, H.:* The effect of air content of water on the cavitation point and upon the characteristics of ships' propellers. State Shipbuilding Experimental Tank, Göteborg, Sweden, 1946 — Report No. 6.

[20] *Ripken, J. F.:* A study of the influence of gas nuclei on cavitation scale effects in water tunnel tests. St. Anthony Hydraulic Laboratory, 1958, Report No. 58.

[21] *Spannhake, W.:* V. D. I. Special issue, 71st Assembly, 1933, p. 59.

[22] *Vuskovic, I.:* Investigations on the influence of air content on cavitation and corrosion. «Escher Wyss News», 1940, *13* pp. 83—89.

[23] *Shmuglyakov, L. S.:* The relation between the cavitation coefficient and content of air dissolved in water in a hydraulic turbine. «Energomashinostroenie», 1956, *5*, pp. 11—14.

[24] *Numachi, F.:* Ueber die Kavitationsentstehung mit besonderem Bezug auf den Luftgehalt des Wassers, 1937. «Tohoku Imperial University», Report No. 3.

[25] *Duport, J. P.:* Contribution to reference 18. «Cavitation Symposium, N. P. L., H. M. S. O.», 1956, E., pp. 3—6.

[26] *Stopskii, S. V.:* The effect of flow excitation on the development of cavitation in water turbines. «Energomashinostroenie», 1958, *3*, pp 24—27.

[27] *Tenot, A.:* Turbines hydrauliques, Dunod, Paris, 1936, *3*, p. 380.

[28] *Yasuo Ishii:* On experimental considerations of the relation between runaway speeds and cavitation phenomena of Kaplan turbine. «Bulletin of Japanese Society of Mechanical Engineers», 1958, *1 (2)*, pp. 178—184.

Diese Veröffentlichung erfolgt mit der Erlaubnis des Direktors des Mechanical Engineering Research, Department of Scientific and Industrial Research.

Réflexions au sujet des essais contractuels de cavitation effectués sur modèles réduits de turbines hydrauliques

Par **M. Fauconnet,** ing. EPF, chef des laboratoires aux Ateliers des Charmilles S. A., Genève

DK 621.242.0015

Introduction

Le projet de code d'essais international de modèles réduits de turbines hydrauliques soumis à l'examen des membres des comités nationaux de la Commission Electrotechnique Internationale (CEI) a pour objet de préciser la manière dont doivent être entrepris les essais sur modèles réduits pour que l'on puisse attribuer aux résultats acquis la même valeur que s'il s'agissait d'essais contractuels effectués selon les règles de l'art sur la machine industrielle elle-même.

On comprendra aisément que l'ingénieur responsable d'un service d'essais en laboratoire s'interroge à chaque proposition énoncée dans ce projet. Son amour du métier le pousse à suggérer de nombreux moyens d'investigations employés parfois dans les travaux de recherches. Sa conscience professionnelle l'engage à éliminer rigoureusement tous les procédés pouvant conduire à des conclusions qui n'offrent pas la sécurité requise par le but poursuivi.

Les auteurs du projet de code, qui ont mis sur pied en un temps record un texte remarquable à bien des égards, ont certes dû éprouver cette difficulté et cela tout particulièrement lorsqu'ils ont abordé les questions soulevées par les essais de cavitation. En effet, bien que de tels essais soient effectués depuis longtemps par les fournisseurs de turbines hydrauliques dans le but de perfectionner leurs produits, on doit reconnaître qu'ils posent des problèmes théoriques et expérimentaux qui sont encore loin d'avoir tous reçu des solutions rigoureuses.

Ce motif explique, pensons-nous, la façon discrète dont ce sujet particulier est traité dans le projet de code. Le texte fait plus souvent allusion aux essais de cavitation qu'il ne fournit de prescriptions précises pour leur exécution. Or le but du code n'est pas atteint si sa rédaction laisse la porte ouverte à des divergences d'interprétation. C'est pourquoi nous nous sommes décidés à donner connaissance des quelques réflexions qui vont suivre, dans l'espoir

de porter aide aux rédacteurs dans l'accomplissement de leur tâche ingrate.

Si, pour établir un ordre logique dans notre exposé, nous nous demandons à quelles préoccupations le code doit fournir des réponses, nous constatons que celles-ci peuvent être subdivisées en trois groupes principaux:

a) Parmi toutes les manifestations de la cavitation, le code doit opérer le choix de celles qui sont adaptées au contrôle contractuel sur modèle réduit.

b) Le code doit apporter des précisions sur la manière d'effectuer les essais de cavitation et rendre attentif aux précautions spéciales exigées par ces essais pour échapper aux risques d'erreurs qu'ils comportent;

c) Le code doit fournir des directives sur l'interprétation des résultats d'essais.

1. Choix des manifestations de la cavitation adaptées au contrôle contractuel sur modèle réduit

Lorsqu'une turbine hydraulique industrielle fonctionne sous des conditions d'exploitation pour lesquelles elle cavite, le phénomène peut se manifester par du bruit, une modification des performances (puissance, rendement, nombre de tours d'emballement) et une forme particulière d'érosion de ses surfaces hydrauliques actives. Les garanties techniques données par le fournisseur s'étendent généralement au rendement, à la puissance maximum, à l'emballement maximum, à l'érosion par cavitation, au bruit et aux vibrations.

Le projet de code d'essai précise sous chiffre 3. 3. 3 que les garanties d'érosion de cavitation devront être basées sur les performances du prototype. Nous approuvons entièrement cette décision. Nous n'ignorons pas que de très nombreuses études ont permis de sélectionner les matériaux les mieux aptes à résister à cette forme d'attaque; que pour chacun d'eux il doit exister un seuil limite de vitesse relative d'écoulement en dessous duquel les érosions ne semblent plus se produire, tandis qu'au-dessus elles paraissent croître en importance proportionnellement à la sixième puissance de cette vitesse. En outre, nous savons aussi que divers chercheurs ont tenté avec quelque succès de mettre au point les méthodes permettant de déterminer, sur le modèle réduit, l'intensité du processus d'attaque. Toutefois il faut reconnaître que dans ces domaines, les connaissances scientifiques n'ont pas acquis la maturité permettant de tirer de ces essais des conclusions offrant la sécurité exigée par le but poursuivi.

Nous estimons qu'il faut avoir la même attitude prudente au sujet du bruit et des vibrations, manifestations de la cavitation dont nous n'avons pas trouvé la mention dans le projet de code.

L'étude de l'influence de la cavitation sur le rendement (chiffres 3. 2. 2. 1 et 5. 4. 1) et sur l'emballement maximum (chiffre 3. 3. 2) est, par contre, incluse sans équivoque parmi les manifestations accessibles au contrôle contractuel sur modèle réduit et il est même recommandé (chiffre 5. 4. 1) d'y procéder.

Etant donné qu'il n'est guère pensable d'envisager la fourniture d'une turbine hydraulique à réaction qui ne soit pas appelée à fonctionner parfois à des régimes proches de la limite critique de cavitation, il est bien évident que si l'on refusait d'accorder une valeur contractuelle à l'altération des performances par la cavitation constatée sur modèle réduit, cela reviendrait à refuser l'idée même poursuivie lorsque fut décidée l'élaboration de ce code.

2. Technique expérimentale

2.1 Choix du circuit hydraulique

La prescription donnée sous chiffre 4. 1. 6. 2 nous paraît être la seule se rapportant explicitement à la conception du circuit hydraulique utilisé pour les essais de cavitation: «au cours d'un essai de cavitation il doit être possible de faire varier la hauteur d'aspiration ou la contre-pression».

La définition du facteur de Thoma:

$$\sigma = \frac{h_b - h_s}{H}$$ est donnée sous chiffre 2. 2. 12. 1

h_b = hauteur d'un baromètre à eau (pression atmosphérique diminuée de la pression de vapeur)

h_s = hauteur de la roue au-dessus du plan d'eau dans le canal de fuite mesurée au point le plus élevé de sa périphérie

H = chute nette d'essai

Elle est accompagnée du rappel de la signification physique de ce facteur: «une mesure de la tendance à la cavitation». L'on peut estimer que la définition du facteur de Thoma contient implicitement la prescription du chiffre 4. 1. 6. 2 rappelée ci-dessus puisque celle-ci revient à dire que pour modifier la valeur de σ il faut agir soit sur h_s, soit sur h_b. Elle a en outre l'avantage de rappeler que si le circuit hydraulique permet non seulement de faire varier les paramètres qui figurent au numérateur de l'expression de σ, mais également d'agir sur la chute H, il sera d'un emploi plus souple et rendra plus aisées les mesures s'étendant à un grand domaine de σ.

La prescription 4. 1. 6. 2 laisse la liberté du choix entre un circuit hydraulique du type ouvert ou un circuit fermé. Le circuit ouvert, rarement utilisé, se justifie dans les laboratoires alimentés par une chute naturelle. Il est la réplique d'une installation industrielle et exige un dispositif particulier placé à l'aval de l'aspirateur destiné à provoquer à volonté la modification de h_s. Ce dispositif est souvent assez complexe et son usage modifie la chute d'essai, ce qui entraîne certaines complications expérimentales. Le circuit fermé évite ces inconvénients. On le rencontre, sous diverses variantes, dans la majorité des laboratoires récemment équipés. Pour rendre plus claires certaines remarques présentées dans la suite de cet exposé, nous décrirons succinctement ici le circuit fermé adopté pour le laboratoire de cavitation des Ateliers des Charmilles.

Sur la figure 1, nous avons représenté schématiquement la vue en plan du sous-sol et la vue en plan de la halle supérieure de ce laboratoire, la différence d'altitude de ces deux locaux étant de l'ordre de 12 m. On reconnaît que ce circuit comporte, au sous-sol: une pompe, une conduite de refoulement, rectiligne sur une grande longueur (44 × diamètre) dans laquelle est intercalé l'appareil déprimogène destiné à la détermination du débit. Le circuit monte à la halle supérieure dans laquelle il se raccorde à une chambre de tranquillisation assurant une alimentation uniforme de la bâche du modèle. Le modèle qui fait suite, débouche dans une chambre à vide à niveau constant. A partir de cet organe le circuit se ferme par une conduite qui descend au sous-sol et amène l'eau à l'ouïe d'aspiration de la pompe.

La pression h_b de l'air confiné dans la chambre à vide, au-dessus du plan d'eau aval de l'aspirateur, peut être modifiée dans d'importantes limites en branchant cette chambre, soit sur un réseau d'air comprimé, soit sur une pompe à vide. C'est donc en agissant sur la contre-pression que l'on fait varier, au cours de l'essai de cavitation, le numérateur du facteur de Thoma.

La pompe fournissant l'énergie hydraulique est du type axial à deux roues en contre-rotation. Elle est entraînée par deux moteurs à courant continu à vitesse variable. Les aubes motrices sont orientables à l'arrêt pour adapter la caractéristique de la pompe à celles des modèles soumis aux essais. En agissant sur la vitesse de rotation de la pompe, il devient aisé de choisir à volonté la chute nette H appliquée au modèle. La valeur adoptée est maintenue constante par un réglage électronique du nombre de tours.

La chute H, ainsi produite, est en général indépendante du réglage de la contre-pression h_b. Cette particularité constitue, comme nous le signalions plus haut, une propriété expérimentale du circuit fermé qui facilite beaucoup la conduite des essais de cavitation. Cette propriété est altérée dans une faible mesure à partir du moment où l'intensité du phénomène de cavitation provoque, dans une turbine soumise aux essais, une modification de sa caractéristique de débit. Le point de régime de fonctionnement de la pompe est alors légèrement déplacé et l'on peut à volonté rétablir la chute en rectifiant convenablement le nombre de tours de la pompe.

Une altération beaucoup plus grave de cette propriété serait atteinte si l'abaissement de la valeur du paramètre h_b provoquait l'apparition du phénomène de cavitation dans la pompe elle-même. La stabilité du régime imposé à la turbine en serait gravement compromise et avec elle la précision des mesures. Le code pourrait utilement rendre attentif à ce risque et recommander que la différence d'altitude entre la pompe du circuit fermé et la turbine modèle soit suffisante pour l'éliminer complètement, comme c'est le cas dans l'exemple décrit.

2.2 Choix de la chute d'essai

Le projet de code aborde d'une façon générale la question du choix de la chute d'essai sous chiffre 4. 1. 6. 1 et de la relation entre la chute d'essai et les dimensions du modèle sous chiffre 4. 2. 1. Nous ne voulons pas discuter ici de l'opportunité des propositions faites dans ces paragraphes, car ces passages dépassent le cadre que nous nous sommes fixé. Nous mentionnerons seulement que nous sommes partisans du choix de dimensions minima et d'un nombre de Reynolds minimum fixé pour chaque type de turbine, ces prescriptions devant évidemment être prises en considération pour les essais de cavitation aussi bien que pour les essais généraux.

Toutefois, dans le domaine particulier des essais de cavitation, la question du choix de la chute d'essai H peut résulter d'autres considérations encore et le chiffre 5. 4. 1 y fait allusion en mentionnant ce qui suit: «Dans le cas d'un essai de cavitation, . . ., une clause du programme devrait préciser la hauteur de chute et les conditions de similitude (Froude)». Ce passage est le reflet, dans le projet de code, des divergences d'opinion qui se sont manifestées au cours de ces dernières années entre les partisans du respect simultané des critères de similitude partiels de Froude et de Thoma lors de l'essai de cavitation et leurs adversaires qui estiment préférable de n'attacher d'importance qu'au facteur de Thoma et d'exécuter l'essai sous la chute la plus élevée possible.

Abordée sous l'angle particulier des prescriptions du code, la question se concrétise comme suit: Est-il justifié, au vu de nos connaissances actuelles, d'imposer la chute qui satisfait à la similitude de Froude ou ne doit-on pas au contraire exprimer clairement qu'il n'est pas nécessaire de tenir compte de ce facteur?

Nous ne pouvons pas développer ici tous les arguments qui parlent en faveur de l'une ou de l'autre de ces thèses. Les arguments théoriques des défenseurs de la similitude de Froude sont irréfutables: la similitude des spectres de pression absolue (comptée en prenant la tension de vapeur pour origine et rapportée à la chute statique) s'établissant, à un même régime de fonctionnement, dans le modèle et dans son prototype industriel n'est atteinte que si les facteurs de Froude et de Thoma prennent respectivement des valeurs égales pour les deux machines. La distorsion de ce spectre de pression provoquée par un défaut de similitude de Froude se manifestera surtout pour les turbines dont les dimensions rapportées à la chute sont grandes. Ces considérations n'ont pas échappé aux ingénieurs, aussitôt que s'est instaurée la pratique des essais de cavitation sur modèle réduit. Malgré cela, le respect simultané de ces deux critères de similitude ne s'est pas imposé, bien au contraire.

Les motifs évoqués pour négliger l'influence du paramètre de Froude sont très divers, mais découlent essentiellement du fait suivant: la similitude de Froude exige de réduire la chute à l'échelle du modèle. Même si l'on exécute un modèle relativement grand, il faudra conduire l'essai de cavitation sous des chutes faibles, et cela est vrai tout particulièrement lorsque l'on prend en considération les turbines industrielles Kaplan à basse chute de très grand diamètre.

Dans ces conditions, des difficultés expérimentales apparaissent qui multiplient les risques d'erreurs de mesure. Les plus sournoises ont pour origine le dégagement d'air dissous dans l'eau. Celui-ci devient d'autant plus intense que pour atteindre les faibles valeurs de σ, il faut parfois abaisser la valeur du paramètre h_b jusqu'au voisinage de la tension de vapeur. Les bulles d'air s'installent dans les conduites de jonction entre prises de pression et manomètres et risquent de compromettre les mesures de chute et de débit. L'on est toujours exposé à attribuer à l'apparition de la cavitation dans l'aubage une altération des performances due en réalité à la formation inattendue d'une cause d'erreur systématique.

Mais, à ces difficultés de nature expérimentale et qui peuvent être dominées par des précautions appropriées, s'ajoute une cause physique d'erreur systématique plus préoccupante, car elle est de nature à atténuer le processus d'ébullition dans le modèle comparé à celui se produisant, à même σ, dans la machine en vraie grandeur. En effet, plusieurs auteurs ont mis en évidence expérimentalement le fait que la pression qui existe à l'intérieur des bulles de vapeur en formation peut être, dans certaines circonstances, inférieure à la tension de vapeur; il peut y avoir retard à l'ébullition.

Le regretté professeur *Robert-T. Knapp* a notamment présenté, à l'occasion du Congrès de l'Association Internationale de Recherches Hydrauliques (A.I.R.H.), tenu à Lisbonne en 1957, des résultats expérimentaux montrant que ce retard à l'ébullition affecte la détermination de la valeur critique d'un paramètre caractérisant l'apparition de la cavitation sur un corps de forme géométrique simple placé dans la section d'étude d'un tunnel hydraulique. En opérant à chute (ou vitesse faible), la valeur critique du paramètre est nettement inférieure à celle trouvée avec le même modèle fonctionnant sous forte chute; en augmentant soit les dimensions du modèle, soit la chute, la valeur critique semble tendre asymptotiquement vers la valeur calculée pour ce paramètre en supposant que la pression à l'intérieur des bulles est égale à la tension de vapeur.

Cet indice du danger auquel on s'expose en réduisant les chutes d'essais pour satisfaire au critère de Froude peut ne pas paraître convainquant si l'on prend en considération le fait que dans les essais relatés par Knapp, la valeur critique du paramètre de cavitation est définie par l'apparition des premières bulles de cavitation, tandis que la valeur critique du facteur de Thoma est définie, dans nos essais de turbines par l'altération des performances. Or, une telle altération résulte de l'existence d'une zone en ébullition déjà largement étendue.

Cette objection nous paraît levée, si l'on confronte les résultats de Knapp avec des résultats publiés antérieurement par *Numachi* à l'occasion du Symposium de Teddington (1955). Les essais de Numachi montrent l'influence de la cavitation sur la portance et la traînée d'un profil sustentateur placé dans un tunnel hydraulique. L'étude est répétée, comme celle de Knapp, sous diverses chutes (ou vitesses) créées par la pompe alimentant le tunnel hydraulique. Le paramètre de cavitation était influencé en agissant sur la pression statique de la veine liquide à l'amont du profil.

Or, si l'on examine les résultats obtenus dans le domaine où la zone en ébullition, largement étendue, affecte nettement le rapport de la traînée à la portance $\varepsilon = C_w/C_a$, on constate ce qui suit: si l'on opère à chute décroissante, le paramètre de cavitation correspondant à une même valeur de ε (donc à une même valeur du rendement altéré par la cavitation) montre lui aussi une tendance à décroître.

L'influence en question (bien que faible) est donc exactement de même sens que celle déduite des essais de Knapp et elle constitue un indice de plus qui justifie le manque de confiance témoigné par beaucoup de spécialistes dans les résultats d'essais de cavitation effectués aux très faibles chutes.

Il faut conclure en toute objectivité que les essais de cavitation portant sur les performances du modèle réduit, quelle que soit la manière dont ils sont entrepris, ne peuvent fournir des résultats qui soient absolument identiques à ceux que l'on obtiendrait sur la machine en vraie grandeur. Les résultats devraient être discutés et interprétés de cas en cas et jusqu'ici les bases scientifiques relatives aux effets d'échelles qu'il faudrait prendre en considération ne sont pas rigoureusement établies.

Toutefois en opérant à chute élevée on diminue les risques d'erreurs. Enfin, lorsqu'on compare les valeurs critiques du paramètre de cavitation ainsi trouvées avec la valeur du σ caractérisant l'installation industrielle, en choisissant pour la hauteur h_s le point le plus élevé de la péri-

phérie de la roue, la faute que l'on peut commettre sera de nature à conduire à une implantation trop prudente de la roue, ce qui vaut beaucoup mieux que de courir le risque inverse.

En conséquence, nous estimons que le texte du code devrait énoncer clairement que l'on ne peut en aucun cas exiger le respect de la similitude de Froude lors des essais contractuels de cavitation.

2.3 Précautions expérimentales particulières aux essais de cavitation

En ce qui concerne le risque inhérent à l'apparition des bulles d'air dans les canalisations de raccordement entre les prises de pression et les manomètres, les prescriptions générales données sous chiffre 6. 2. 4. 4 et valables pour tous les essais devraient en général suffire si les expérimentateurs opèrent avec la plus grande attention.

La pression barométrique de l'air ambiant pouvant être sensiblement supérieure à la pression de l'eau du circuit fermé dès l'amont de la turbine, il faut en tenir compte en construisant le modèle de manière à éviter des entrées d'air le long de l'arbre, de la douille oscillante ou des tourillons des directrices. C'est sans doute à ce danger que le chiffre 4. 1. 5 fait allusion en mentionnant que «toute entrée d'air doit être évitée»; il nous paraît souhaitable de choisir une rédaction plus explicite et de ne pas placer cette prescription sur le titre actuel de «pertes d'eau».

Ce même paragraphe 4. 1. 5 prescrit que toute modification du débit par fuite ou entrée d'eau doit être évitée. Cette rédaction est, elle aussi, de caractère trop général. Il faut autoriser dans le cas d'un circuit fermé une injection permanente d'eau fraîche avec évacuation correspondante en une région du circuit choisie de manière à ne pas affecter les mesures. Cette disposition permet de refroidir l'eau du circuit et de renouveler les noyaux microscopiques d'air dissous qui sont nécessaires au processus d'ébullition. Il faudrait donc préciser que la modification du débit par fuite ou entrée d'eau est à éviter entre le dispositif de mesure du débit et la turbine soumise aux essais.

Nous avons déjà fait allusion plus haut aux difficultés expérimentales rencontrées lorsque l'on veut pousser les études de cavitation jusqu'aux très petites valeurs de σ en opérant à faible chute. Une attention toute particulière doit être portée, dans ce cas, à la mesure du débit d'eau et à ce sujet certaines dispositions du paragraphe 4. 1. 4 doivent être examinées avec soin. Au premier alinéa de ce paragraphe il est dit notamment: «L'équipement de mesure doit pouvoir être taré sur place et dans les conditions d'exécution des essais. Il doit être veillé en particulier à ce que les erreurs de mesures sur le débit dues au dégagement des bulles d'air . . .».

Dans le cas très fréquent d'un laboratoire équipé d'un circuit hydraulique fermé et dans lequel le débit est mesuré par un Venturi ou un diaphragme, l'on peut faire les remarques suivantes:

La pression absolue existant dans la conduite d'alimentation du déprimogène variera en fonction de la chute imposée au modèle et de la pression h_b, réglée dans la chambre à vide. L'appareil déprimogène occasionne en outre une baisse locale de la pression qui dépend de sa forme géométrique et qui croît avec le carré du débit. Si le vide h_b est trop poussé ou si le débit augmente au-delà de certaines limites, il est à craindre que la pression s'abaisse, au droit du déprimogène, non seulement au point de provoquer un dégagement de bulles d'air, mais jusqu'à faire apparaître le phénomène de cavitation lui-même dans cet organe, ce qui est évidemment à proscrire.

Le texte 4. 1. 4 (premier alinéa) devrait donc préciser que le tarage de l'équipement de mesure s'effectuera sur place dans des conditions d'alimentation et d'installation identiques à celles des essais et en soumettant le dispositif à la pression absolue la plus faible susceptible d'être rencontrée à l'occasion des essais envisagés. L'on s'assurera qu'il ne se produit, dans ces conditions particulières de fonctionnement, ni dégagement intense de bulles d'air, ni cavitation susceptible d'affecter les coefficients d'étalonnage, en sorte que ceux-ci restent pratiquement égaux aux valeurs obtenues sous des pressions absolues supérieures et pour lesquelles tous risques d'apparition de ces phénomènes perturbateurs sont écartés.

Pour illustrer ces remarques reportons-nous au schéma du laboratoire Charmilles, fig. 1. L'appareil déprimogène peut être taré par la méthode de l'écran mobile d'Anderson. Ce dispositif et le déprimogène sont installés tous deux au sous-sol du bâtiment. Pour brancher le déprimogène sur le canal de l'écran mobile, le circuit fermé est interrompu au droit des conduites ascendantes et descendantes alimentant la halle supérieure et les conduites tracées en pointillé sont mises en service. De la sorte l'alimentation du déprimogène

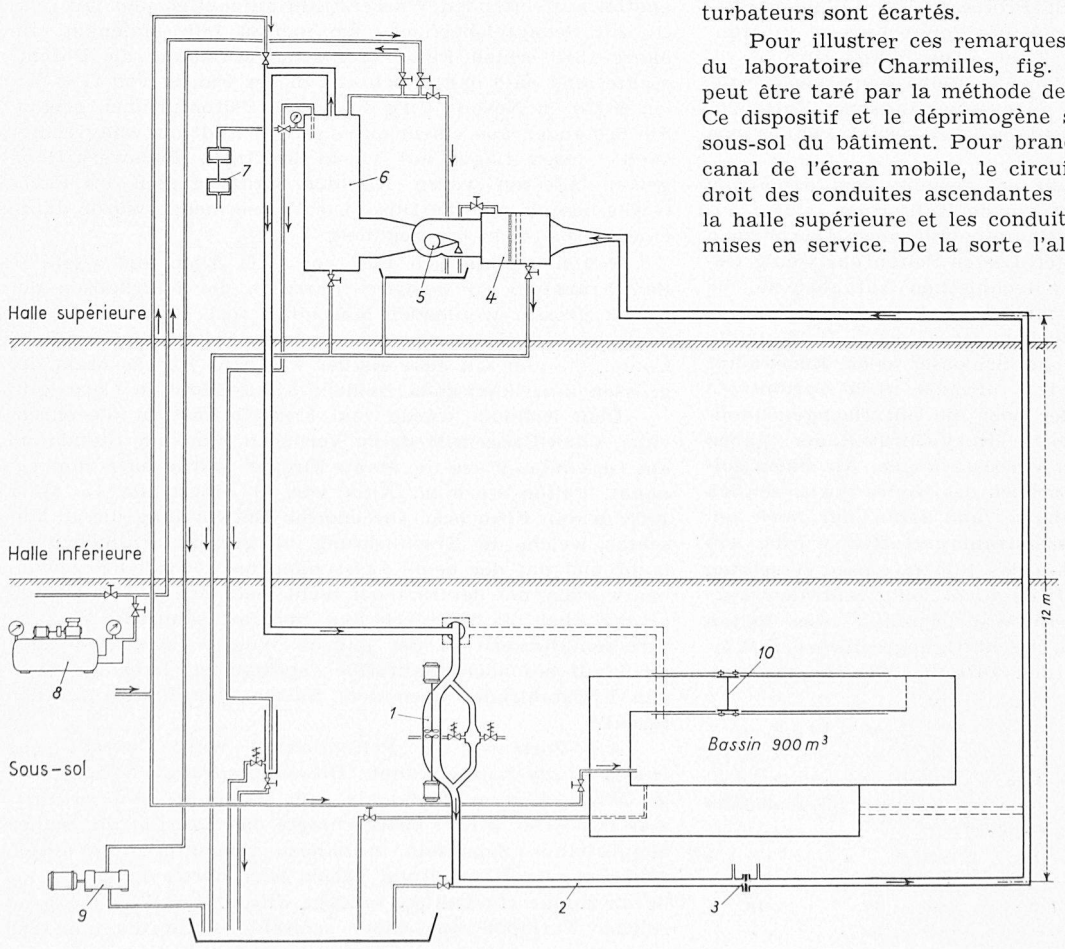

Fig. 1. Schéma d'installation des stands de cavitation Kaplan, Charmilles

1 pompe axiale contra-rotative
2 conduite de refoulement
3 appareil déprimogène (diaphragme)
4 chambre de tranquillisation
5 turbine modèle soumise aux essais
6 chambre à vide à niveau constant
7 régleur automatique de pression
8 compresseur d'air
9 pompe à vide
10 écran mobile

et les conditions géométriques de son installation (c'est-à-dire les facteurs principaux susceptibles d'influencer les coefficients de tarage) sont identiques au cours des travaux d'étalonnage et lorsque le circuit est fermé.

En raison de la différence d'altitude entre la halle supérieure et le sous-sol, la pression la plus faible pouvant exister dans la conduite rectiligne alimentant le déprimogène, lorsque le circuit est fermé (provoquée par évacuation très poussée de l'air dans la chambre à vide), est sensiblement celle qui s'installe lorsque les liaisons avec l'écran mobile sont en service. L'étalonnage a donc bien lieu dans les conditions suggérées par le projet de code et il peut être répété sur désir en élevant la pression dans la conduite d'alimentation du diaphragme, à condition de créer une perte de charge à son arrivée au canal de l'écran et d'augmenter la vitesse d'entraînement de la pompe pour atteindre le niveau de pression désiré.

3. Interprétation des essais de cavitation

Les essais contractuels de cavitation effectués sur modèle réduit fourniront un ensemble d'observations et de résultats qu'il s'agira en définitive d'interpréter pour décider s'ils apportent la confirmation de la bonne tenue des garanties données pour la turbine industrielle. Or, le projet de code ne contient aucune règle prescrivant la manière de conduire cette interprétation. Dans ces conditions, nous pensons qu'il est nécessaire de combler cette lacune et nous suggérons à cet effet le texte suivant qui tient compte de diverses remarques développées au cours de cet exposé:

L'altération des performances, sous l'effet de la cavitation, sera déterminée en soumettant le modèle réduit à la chute la mieux adaptée aux installations du laboratoire disponible sans tenir compte de la similitude de Froude. Sauf convention contraire adoptée avant la signature du contrat, l'on convient d'admettre que les performances de la machine industrielle subissent à σ égal, les mêmes modifications que celles constatées sur le modèle réduit.

Les garanties relatives à l'érosion, aux bruits et aux vibrations provoqués par la cavitation ne seront vérifiées que sur le prototype. En particulier, les figures de cavitation observées sur le modèle réduit pour des valeurs du facteur de Thoma égales ou supérieures à celles correspondant à l'installation industrielle n'apportent pas la preuve que le prototype subira des érosions dues à la cavitation.

4. Conclusions

Les diverses questions soulevées par l'exécution d'essais contractuels de cavitation sur modèles réduits de turbines hydrauliques sont abordées, dans le projet de code, d'une façon qui nous paraît trop dispersée et de ce fait incomplète et parfois imprécise. Nous avons proposé, dans cet exposé, un certain nombre d'indications dont il pourrait être tenu compte éventuellement sans changer l'ordre adopté pour les chapitres du projet. Toutefois nous donnerions la préférence à une modification plus radicale consistant à introduire dans le code un chapitre nouveau dans lequel serait traité d'une façon bien ordonnée l'ensemble des questions ayant fait l'objet de notre exposé.

Zum fünfzigjährigen Todestag von Lester Pelton

DK 92

Die heute für hohe Gefälle allgemein verwendete Peltonturbine ist eine Erfindung des Amerikaners Lester A. Pelton, der am 5. September 1829 in Vermillon im Staate Ohio geboren wurde und hochbetagt in San Francisco starb. Dipl.-Ing. L. A. Haimerl, St.-Professor für Wasserkraftmaschinenbau am Oskar-von-Miller-Polytechnikum in München, beschreibt unter dem Titel: «Die Pelton-Turbine» in «Energie» 1958, Nr. 12, S. 525 eine Reihe bemerkenswerter Ausführungen, insbesondere auch schweizerischer Turbinenbauer, und zeichnet einleitend das Lebensbild Peltons wie folgt.

Als Zwanzigjähriger fuhr er, gepackt vom damaligen Goldfieber, mit einem Viehzug nach Kalifornien, wo er zunächst in der kleinen Stadt Camptonville blieb. Das Suchen nach Gold brachte dem jungen Lester Pelton nur wenig Gewinn, und so wandte er sich technischen Aufgaben zu, die sich beim Bau von Stampfmühlen, welche durch Wasserkraft betrieben wurden, in reichem Masse boten. Bald konnte er als Zimmermann, bald als Schlosser oder Mechaniker seine Fähigkeiten zeigen. Die oftmals recht primitiven oberschlächtigen Wasserräder oder die mit flachgekrümmten Holzschaufeln versehenen Hury-Gurdy-Räder gaben ihm vielseitige Anregung zu Verbesserungen. An einem solchen Rad, das sich durch Lockern des Keiles etwas seitlich auf der Welle verschoben hatte und somit nur noch am äussersten Rand vom Wasserstrahl getroffen wurde, soll Pelton beobachtet haben, dass das Rad in dieser versetzten Lage merklich schneller lief als zuvor beim zentralen Aufschlagen des Strahles. Diese Wahrnehmung liess Pelton keine Ruhe mehr, und in den beschäftigungsschwachen Wintermonaten zwischen 1877 und 1878 bastelte er aus dem Blech fortgeworfener Kanister über 40 verschiedene Modelle von Rädern und Schaufeln. Er fand schliesslich eine Schaufel, die aus zwei symmetrischen Teilen besteht, welche sich in einer keilförmigen Schneide vereinigen, den dort tangential auftreffenden Wasserstrahl aufspalten und ihn relativ zur Schaufeloberfläche um nahezu 180° umlenken. Im Jahre 1880 erhielt Pelton auf seine Erfindung die Patentrechte, und bald darauf wurden in der Fabrik von G. G. Allen & Co. in Nevada City die ersten Peltonturbinen gebaut. Sie bestanden aus einem gusseisernen Rad mit waagrechter Welle, deren Lager auf einem kräftigen Fachwerk-Holzgestell befestigt waren. Auf dem Grundrahmen des Fachwerks befand sich die Düse. Die Wassermenge wurde durch einen Drosselschieber reguliert.

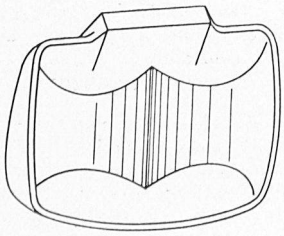

Bild 1. Ursprüngliche Schaufelform von L. Pelton für Freistrahlturbinen

Pelton trennte sich 1887 von G. G. Allen und setzte in San Francisco mit anderen Partnern die Fabrikation der immer grösser werdenden Maschinen fort. Es entstand alsdann in San Francisco die bekannte Pelton Water Wheel Comp., die nun seit 1931 als der westliche Repräsentant der grossen amerikanischen Baldwin-Lima-Hamilton Corp. gilt.

Dem Erfinder wurde vom Franklin-Institut die ehrenvolle Elliot-Cresson-Medaille verliehen, und ein Staudamm am Deschutes-Fluss im Staate Oregon wurde nach ihm benannt. Pelton starb im Alter von 79 Jahren am 17. März 1908 in San Francisco. Die enorme Entwicklung dieser Maschine, welche die Erschliessung der grössten Fallhöhen erlaubt und mit der heute Leistungen bis 150 000 PS gewonnen werden, hat der Erfinder nicht mehr erlebt. Das Grundprinzip blieb bis heute erhalten, und fast sämtliche Wasserturbinenfabriken auf der ganzen Welt — soweit sie sich nicht auf besondere Bauformen spezialisiert haben — bringen Freistahlräder nach dem System von Pelton auf den Markt.

Als Vorläufer der Peltonturbine wurde bereits das Hurdy-Gurdy-Rad erwähnt. Dieses ursprünglich aus Holz gefertigte Rad war damals eine bekannte Wasserkraftmaschine. Der Strahl beaufschlagte das Laufrad mit seinen enggestellten Schaufeln in nahezu tangentialer Richtung, wobei die Kraftentfaltung jedoch eher durch den Stoss als durch zügige Umlenkung erzeugt wurde. Der Wirkungsgrad solcher Turbinen war daher schlecht; selbst die um 1860