Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 89 (1971)

Heft: 12

Artikel: Le nouveau stand d'essai universel pour machines hydrauliques de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne

Autor: Bovet, Théodore

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-84804

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: 07.01.2026

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

[6] *German, V. L.* and *Azbel, M. Ya.:* On the Hydrodynamics of a Cavitating Liquid. Russian original dated 1954. "A.C.S.I.L. Translation" No. 1059.

[7] *Jakobsen, J. K.:* On the Mechanism of Head Breakdown in Cavitating Inducers. "Trans. A.S.M.E.". Series D. Vol. 86, June 1964.

[8] *Spraker, W. A.:* Two-Phase Compressibility Effects on Pump Cavitation. Symposium on Cavitation in Fluid Machinery, A.S.M.E. November 1965.

[9] *Salemann, V.:* Cavitation and NPSH Requirements of Various Liquids. "Trans. A.S.M.E.". Series D, Vol. 81, June 1959.

[10] *Barenboim, A. B.:* Conditions for Modelling Cavitation Phenomena in Pumps for Refrigeration Liquids. "B.H.R.A. Transl. No. T865 Oct. 1966" (Russian original dated 1965).

[11] *Spraker W. A.:* The Effect of Fluid Properties on Cavitation in Centrifugal Pumps. "Trans. A.S.M.E.". Series E. Vol. 87, July 1965.

[12] *Grist, E.:* The Correlation of Cavitation Characteristics of Centrifugal Pumps. University College, Cardiff, February 1965 (unpublished).

[13] *Plesset, M. S.* and *Zwick, S. A.:* The Growth of Vapour Bubbles in superheated Liquids. "J. App. Phys.". Vol. 25 (1954), No. 4.

[14] *Florjancic D.:* «Experimentelle Untersuchungen an einer Pumpe zur Feststellung der Änderung der Saugfähigkeit durch Oberflächenrauhigkeit, durch Mischvorgänge auf Laufradeintritt und durch Heisswasserförderung». Dissertationsarbeit an der ETH Zürich, Nr. 4406.

[15] *Stepanoff, A. J.:* Pumps and blowers two phase flow. Chapter I. London 1965, John Wiley & Sons Ltd.

Le nouveau stand d'essai universel pour machines hydrauliques de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne

DK 061.6.62:621.224

Par **Théodore Bovet**, professeur à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne

Préface

Voici bientôt sept ans – c'était au début du mois d'avril 1964 – que nous avons eu, ma femme et moi-même accompagnés de l'un de mes collaborateurs, la grande joie d'avoir été accueillis si chaleureusement au sein de la famille de Monsieur *Charles-Louis Jaeger,* à Rugby, en Angleterre. Notre voyage n'avait cependant pas pour seul but cette aimable rencontre; nous avions encore au programme la visite du laboratoire d'essais de machines hydrauliques de l'English Electric Company (EEC) où C.-L. Jaeger était ingénieur-conseil. Cette visite devait nous renseigner sur ce qui se faisait en dehors de notre pays, en prévision de l'étude et de la réalisation d'un nouveau stand d'essai à l'Institut de Machines Hydrauliques de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Lausanne devenue, depuis le début de l'année 1969, l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Monsieur Jaeger a eu la grande amabilité de nous introduire auprès des responsables du département de recherches et d'essais en laboratoire de machines hydrauliques de l'EEC. Que la dette de grande reconnaissance que j'ai contractée envers mon cher et distingué collègue trouve aujourd'hui son acquittement par ce modeste hommage à son adresse.

1. Généralités

La désignation de *stand d'essai universel pour machines hydrauliques à réaction* se justifie du fait que, d'une part, ce stand unique permet d'essayer *n'importe quel type de machine hydraulique à réaction,* à savoir les turbines radiales *Francis,* turbines diagonales *Dériaz,* turbines axiales *Hélice* et *Kaplan* classiques, turbines axiales *Hélice* et *Kaplan* bulbes, pompes radiales, pompes diagonales *Dériaz,* pompes axiales *Hélice* et *Kaplan,* machines réversibles (pompes-turbines) et que d'autre part, ces huit types de machines hydrauliques peuvent être essayés aussi bien en *circuit ouvert* qu'en *circuit fermé.*

Pourquoi un pareil stand d'essai à l'Institut de Machines Hydrauliques (IMH) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)? Il y a plus de quinze ans, le soussigné a commencé une étude de *recherche sur la systématisation du tracé d'aubages de turbines Francis,* recherche qu'il entreprit d'abord seul puis, dès l'année 1964, avec l'aide financière du «Fonds pour l'encouragement par la Confédération des recherches scientifiques et techniques», secondé de l'aide technique, sous forme d'essais en laboratoires, des cinq principaux constructeurs suisses de machines hydrauliques (Bell, Charmilles, Escher Wyss, Sulzer et Vevey). Cette collaboration entre le Fonds, les constructeurs et le soussigné a fait l'objet d'une convention signée le 9 février 1966 à l'OFIAMT à Berne. En plus de la recherche sur les turbines Francis, la convention s'applique également à celle de toutes les autres machines hydrauliques à réaction, tant turbines que pompes.

L'IMH ne disposant pas, à ce moment-là, d'un stand d'essai adéquat, les essais effectués sur les différentes plates-formes des dits constructeurs étaient une précieuse contribution à la recherche puisqu'il fallait, le plus tôt possible, pouvoir vérifier par des résultats pratiques la théorie émise à la base du calcul des tracés d'aubage.

Mais en plus, en prévision d'un résultat final aussi précis et fidèle que possible, les ultimes essais devaient pouvoir se faire sur un seul et même stand donnant toute garantie quant à la précision des résultats, donc des mesures. C'est ainsi que fut décidée la création d'un nouveau stand d'essai à l'IMH répondant entièrement aux exigences requises.

L'effort financier considérable de 4,43 Mio fr. que demandait ce projet, tant en ce qui concerne le gros œuvre que le stand d'essai proprement dit – l'équipement du stand d'essai était devisé à 2 Mio fr., montant qui sera atteint mais pas dépassé – nécessitait l'aide de plusieurs bailleurs de fonds, dont la Confédération, le canton de Vaud, la commune de Lausanne, la Société d'aide aux laboratoires de l'EPUL et un certain nombre d'exploitants de centrales hydro-électriques de la Suisse romande et de la Suisse alémanique.

Cependant, la recherche à elle seule ne pouvait justifier un pareil investissement. Il fut décidé d'utiliser ce stand également pour des essais pour des tiers, à savoir pour des constructeurs de machines hydrauliques, pour des mandataires ou bureaux d'ingénieurs-conseils d'exploitants de centrales hydro-électriques, etc.

Il n'est pas possible, dans un cadre aussi restreint que celui du présent article, d'entrer dans les détails de tous les éléments constituant le nouveau stand d'essai. Une description très détaillée fait l'objet de la Publication No 6 de l'IMH qui vient de sortir de presse, en français et en anglais. Notre description se limitera donc aux éléments principaux du stand d'essai.

2. Description du stand d'essai

L'installation complète du stand d'essai est reproduite sur la figure 1. Elle comprend essentiellement les *circuits hydrauliques* proprement dits du stand, les *éléments principaux* de ces circuits, les *éléments auxiliaires,* la *plate-forme d'essai,* élément principal du stand. Nous traiterons dans cet ordre ces différentes parties de l'installation.

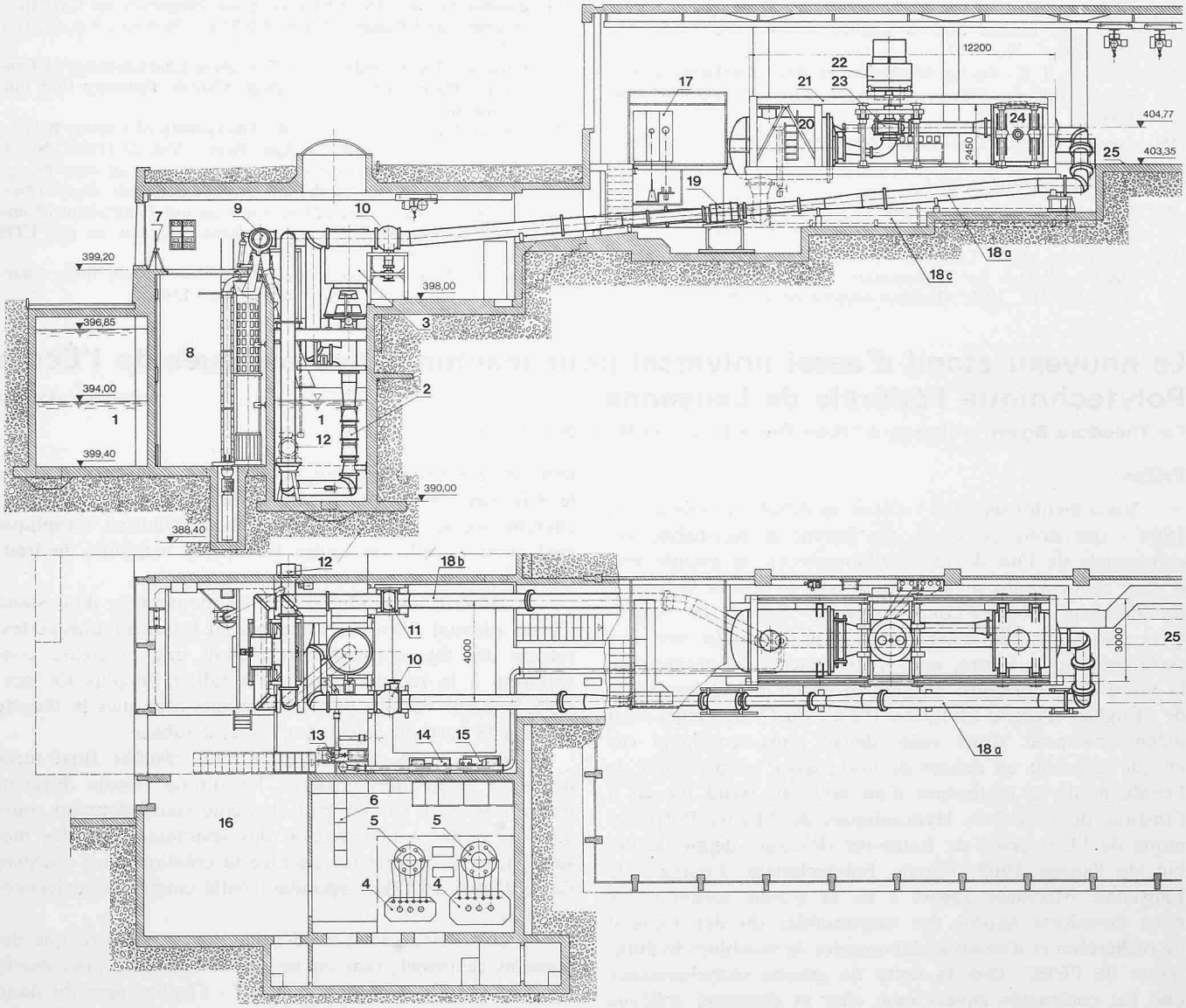


Fig. 1. Ensemble de l'installation

1 Grand bassin 1400 m³, 2 Pompe d'alimentation, 3 Machine électrique 900 kW, 4 Transformateur tri-hexaphasé, 5 Soupape à vapeur de mercure, 6 Armoire de réglage électronique, 7 Limnimètre, 8 Bassin volumétrique, 9 Clapet partiteur de débit, 10 Vanne pointeau, 11 Vanne tiroir, 12 Vanne papillon, 13 Pompe auxiliaire, 14 Pompe à vide, 15 Compresseur, 16 Atelier de serrurerie, 17 Tableau de commande, de mesure et de calcul, 18a Conduite amont de mesure, 18b Conduite aval, 18c Conduite de dérivation, 19 Débitmètre électromagnétique, 20 Cuve aval, 21 Cadre portique, 22 Machine électrique 300 kW, 23 Modèle d'essai, 24 Cuve amont, 25 Plage de montage

2.1. Circuits hydrauliques

Le caractère universel du stand, permettant des essais de n'importe quel type de machine hydraulique à réaction en *circuit ouvert* ou *circuit fermé,* nécessite des transformations de circuits qui doivent pouvoir s'effectuer rapidement, sans pertes de temps.

A ces différents circuits s'ajoutent encore les deux *circuits d'étalonnage.* En effet, les débitmètres des types déprimogène et électromagnétique, communs à tous ces circuits, doivent pouvoir être étalonnés à tout moment dans leurs conditions de fonctionnement, d'où ces deux circuits supplémentaires.

Contrairement à la solution classique qui fait appel à plusieurs vannes pour réaliser les différents circuits, nous avons opté pour la solution à tronçons de conduite et coudes interchangeables. Cette solution est beaucoup plus simple, moins encombrante, bien moins onéreuse et garantit une étanchéité parfaite, facile à contrôler. Elle limite à trois le nombre total des vannes. Ces transformations de circuits peuvent s'effectuer très rapidement grâce à l'utilisation de brides à collier, dits joints Victaulic.

2.1.1. Cicuits ouverts

Les circuits ouverts sont au nombre de deux, l'un pour les essais de turbines, l'autre pour les essais de pompes. Pour cela, l'installation dispose d'un grand bassin 1 (fig. 1), d'où l'eau est aspirée par la pompe d'alimentation 2 et refoulée à la machine d'essai 23, soit par la conduite amont de mesure 18a pour les essais de turbines, soit par la conduite aval 18b pour les essais de pompes. Le retour de l'eau au grand bassin s'effectue alors en sens contraire, soit par la conduite aval pour les essais de turbines, soit par la conduite amont pour les essais de pompes. Le passage d'un circuit à l'autre s'opère facilement et rapidement par un simple basculement de la conduite de sortie de la pompe d'alimentation vers l'une ou l'autre des deux conduites et par la permutation de quelques tronçons et coudes.

Dans le cas de l'*essai d'une turbine,* la pression à l'entrée de celle-ci est réglée en faisant varier la vitesse de rotation de la pompe d'alimentation. A la sortie de la turbine, la pression est réglée au moyen d'une vanne papillon 12, permettant d'obtenir des dépressions pouvant

atteindre la pression de dégagement de vapeur de l'eau.

Dans le cas de l'*essai d'une pompe,* la pression à l'entrée de celle-ci est réglée par la pompe d'alimentation en faisant varier sa vitesse de rotation. La pression totale, fournie par la pompe d'alimentation et par la pompe d'essai mises en série, est limitée à 160 m CE (colonne d'eau), l'énergie correspondante étant dissipée dans la vanne pointeau 10 et dans la vanne papillon 12.

Les avantages des circuits ouverts sont: *a)* Possibilité de faire des essais avec de l'eau saturée en air dissous grâce à l'important volume d'eau disponible dans le grand bassin. En effet, l'eau appauvrie en air à la suite d'essais de cavitation peut recouvrer ses qualités primitives grâce à sa bonne aération dans le grand bassin; *b)* Elimination totale des bulles d'air dégagées en régime de cavitation; *c)* Faible échauffement de l'eau au cours d'un essai grâce à l'important volume d'eau disponible dans le grand bassin. Le seul inconvénient des circuits ouverts par rapport au circuit fermé est l'établissement plus difficile du régime requis par l'essai, régime que l'on fixe en agissant simultanément sur la vitesse de rotation de la pompe d'alimentation et l'organe obturateur de la vanne papillon 12.

2 . 1 . 2. *Circuit fermé*

Le circuit fermé est le même pour les essais de turbines et pour les essais de pompes, l'aspiration de la pompe d'alimentation étant mise en liaison directe avec l'aval de la machine d'essai. Ce raccordement est réalisé au moyen d'un tronçon de conduite emboîté dans la trompette d'aspiration de la pompe d'alimentation 2.

Dans le cas de l'*essai d'une turbine,* la pompe d'alimentation fournit l'énergie hydraulique à celle-ci. Dans le cas de l'*essai d'une pompe,* c'est celle-ci qui produit l'énergie hydraulique qui sera récupérée, en partie, par la pompe d'alimentation fonctionnant alors comme turbine et son moteur comme génératrice. Pour de petits débits, l'énergie hydraulique est dissipée dans la vanne pointeau 10. Dans les deux cas, l'eau passe par les débitmètres, soit dans un sens, soit dans l'autre.

2 . 1 . 3. *Circuits d'étalonnage*

L'étalonnage des débitmètres, fonctionnant dans les deux sens d'écoulement, s'effectue à l'aide d'un bassin volumétrique 8 et d'un clapet partiteur 9. Cet étalonnage peut s'envisager, soit en faisant passer l'eau par la machine d'essai, soit en court-circuitant celle-ci au moyen d'une conduite de dérivation 18c. La première solution est particulièrement séduisante puisqu'elle permet de mesurer directement par la méthode volumétrique le débit traversant le modèle d'essai. Cette méthode, dite directe, a cependant l'inconvénient d'être discontinue dans le temps.

2 . 2 . 1. *Pompe d'alimentation avec moteur électrique*

Une installation telle que celle en question, destinée aux essais de machines hydrauliques de types très différents, nécessite des plages de débit et d'énergie très étendues. Après une étude approfondie, tant du point de vue technique que du point de vue économique, nous avons opté pour une *pompe d'alimentation* unique du type diagonal à trois étages, à vitesse variable. La plage d'utilisation de la pompe se range entre les limites de 0,2 m^3/s sous 100 m CE et 1,35 m^3/s sous 20 m CE. Comme déjà relevé ci-dessus, lors d'un essai de pompe en circuit fermé, cette pompe doit pouvoir fonctionner en turbine pour récupérer l'énergie hydraulique fournie par la pompe d'essai.

La pompe d'alimentation 2 est accouplée à une machine électrique 3 à courant continu, d'une puissance de 900 kW, dont la vitesse peut varier entre 200 et 1000 t/min. La vitesse est maintenue constante avec une tolérance de $\pm$ 0,1 %, ce qui garantit une très bonne constance de l'énergie et du débit fournis par la pompe. La hauteur totale du groupe mesure quelque 9,2 m et son poids est de quelque 18 tonnes.

2 . 2 . 2. *Conduites et vannes*

Le circuit principal est constitué de *conduites* d'un diamètre de 600 mm à l'exception d'un petit tronçon de 450 mm situé de part et d'autre du débitmètre électromagnétique 19. L'ensemble des conduites situées en amont de la plate-forme d'essai est dimensionné pour supporter une pression interne de 160 m CE tandis que l'ensemble des conduites situées en aval peut supporter une pression interne allant du vide jusqu'à 100 m CE. Tous les coudes à angle droit du circuit ont des ailettes intérieures qui permettent de conserver une bonne répartition de la vitesse à leur sortie et de limiter les pertes de charge dues au changement de direction.

Quant aux vannes, leur nombre se limite à trois. Il s'agit d'une *vanne pointeau* 10, d'une *vanne tiroir* 11 et d'une *vanne papillon* 12, dont les fonctions sont très différentes.

Les vannes 10 et 11 permettent, en circuit ouvert, de garder l'eau dans la partie supérieure du circuit de manière à pouvoir contrôler le zéro des débitmètres grâce à leur étanchéité parfaite. En plus, lors de l'étalonnage, ces vannes sont utilisées pour créer une perte de charge permettant d'étalonner les débitmètres sous différentes pressions.

La vanne 10, particulièrement favorable à la dissipation d'énergie, est en outre employée dans des essais de pompes en circuit fermé. En effet, il n'est pas possible de faire fonctionner la pompe d'alimentation en turbine dans le domaine des très petits débits.

La vanne 12 n'est utilisée que pour les essais en circuit ouvert de turbines et de pompes. Ces deux types de machines exigent de la vanne des caractéristiques opposées. En effet, lors des essais en cavitation de turbines, la perte de charge à l'aval doit être aussi faible que possible de manière à atteindre de très basses pressions dans le modèle sans exiger une trop grande différence de niveau entre la turbine et le plan d'eau aval. Dans les essais de pompes, au contraire, la vanne doit dissiper la totalité de l'énergie sortant du modèle, énergie qui peut atteindre 160 m CE. La vanne 12 permet de travailler dans cette grande plage d'énergie. Pour éviter des instabilités d'écoulement et des vibrations mécaniques, une aération à l'aval du papillon a été prévue.

2 . 2 . 3. *Grand bassin et bassin volumétrique*

L'installation est équipée d'un grand *bassin* 1 d'une capacité de 1400 m^3 dans lequel est placé un bassin volumétrique 8 d'une capacité de 150 m^3. Ces deux bassins sont construits entièrement en béton armé recouvert d'une peinture à base de résine synthétique qui facilite le nettoyage et permet de garder une eau exempte d'impuretés provenant du béton des parois.

En *circuit ouvert,* l'eau, aspirée du bassin 1 par la pompe 2, passe par le modèle 23 et regagne le bassin 1 par la vanne 12. Deux murs de détournement obligent l'eau à décrire un long parcours, évitant ainsi la formation de zones mortes. Le niveau d'eau dans le grand bassin est placé à environ 11 m au-dessous du modèle d'essai, ce qui permet d'atteindre la pleine cavitation pour tous les types de

machines à essayer. Le volume d'eau disponible est alors d'environ 750 m³.

En *circuit fermé,* de l'eau de refroidissement est prélevée du grand bassin au moyen d'une pompe auxiliaire 13 et introduite dans le circuit, ceci pour éviter une trop grande élévation de la température. Cette opération permet également de maintenir, à un certain degré, la teneur en air dissous de l'eau.

En *circuit d'étalonnage,* l'eau est aspirée du bassin 1 par la pompe 2, refoulée dans la conduite 18, puis, grâce au clapet partiteur de débit 9, déversée, soit dans le bassin 8, soit dans le bassin 1. Le clapet 9 se présente sous la forme d'un tronçon de conduite pouvant pivoter autour de son axe, muni d'une fente longitudinale par laquelle l'eau s'écoule. Le mouvement, commandé par un vérin pneumatique à double effet, est très rapide; le temps de commutation n'excède en effet pas 0,2 secondes.

L'*étalonnage du bassin* 8 a été confié au *Bureau fédéral des poids et mesures.* Deux méthodes ont été appliquées: la méthode *géométrique* et la méthode *volumétrique.* La première consiste à déterminer la section du bassin en fonction de la hauteur en tenant compte, bien entendu, de tous les éléments placés à demeure dans le bassin. Pour la seconde méthode, on a utilisé des capacités étalons de volume 2,0 et 0,5 m³. Ainsi, on peut connaître le volume du bassin en fonction de la hauteur. Toutes ces mesures ont été faites en tenant compte de la température. La correspondance entre ces deux méthodes d'étalonnage est remarquable; on constate en effet un écart moyen inférieur à 0,03 %.

La mesure du niveau d'eau dans le bassin volumétrique s'effectue à l'aide de trois *limnimètres* du type à pointe droite, le contact avec l'eau étant détecté par voie électrique. Leur étendue de mesure est de 500 mm; ils sont munis d'un vernier permettant des lectures d'une précision de 0,1 mm. En effet, seules trois plages de mesure sont intéressantes pour l'étalonnage des débitmètres: une plage au fond du bassin pour connaître le volume d'eau de départ, une deuxième plage au milieu du bassin pour la mesure de petits débits et une plage au haut du bassin pour la mesure de grands débits. La hauteur utile du bassin 8 d'environ 6,9 m aurait rendu difficile l'installation d'un limnimètre unique.

Afin d'éviter les longues attentes nécessaires à la stabilisation de la surface agitée de l'eau, des tubes cylindriques sont disposées autour de la partie inférieure des limnimètres. Ces tubes, dont l'extrémité inférieure est fermée, sont reliés par une tuyauterie à une série de prises de pression disposées au fond du bassin. On obtient ainsi très rapidement un niveau stable dans les tubes même si la surface de l'eau dans le bassin est encore agitée.

Compte tenu de toutes les imprécisions d'étalonnage du bassin 8, la précision de la lecture du volume d'eau dans celui-ci est voisine de ± 15 litres, ce qui, pour un volume de 150 m³, correspond à une précision relative de ± 0,01 %.

Le bassin 8, de section rectangulaire de 4,4 × 4,9 m et de hauteur utile d'environ 6,9 m, permet, avec son volume de 150 m³, de mesurer des débits jusqu'à 1,5 m³/s. En effet, selon le code de la Commission Electrotechnique Internationale (CEI), le temps de mesure doit être d'au moins 100 secondes.

Le prélèvement d'un volume de 150 m³ dans le grand bassin entraîne dans celui-ci une baisse de niveau de 0,6 m environ, ce qui modifie le régime de fonctionnement de la pompe d'alimentation, donc le débit passant par les débitmètres. Cette variation de débit n'affecte cependant pas la mesure du débitmètre 19. En effet, le système électronique de celui-ci fournit un nombre d'impulsions proportionnel au volume d'eau qui passe par l'instrument pendant le temps de mesure. L'étalonnage consiste à comparer ce volume à celui effectivement déversé dans le bassin volumétrique. Il n'en va pas de même pour l'étalonnage des deux venturimètres prévus comme débitmètres auxiliaires, où une lecture continue de la différence de pression est difficile. Pour remédier à cet état de choses, un régulateur électronique fait varier la vitesse de rotation de la pompe d'alimentation en maintenant le débit constant, grâce au signal analogique provenant du débitmètre électromagnétique.

2.3.1. *Alimentation électrique*

Les deux machines électriques 3 et 22 sont alimentées en courant continu afin de pouvoir varier leur vitesse de rotation. Par ailleurs, ces deux machines doivent pouvoir fonctionner aussi bien en moteur qu'en génératrice. En plus, il s'est avéré indispensable de pouvoir récupérer une partie au moins de l'énergie électrique fournie lors des essais et de la restituer au réseau. En effet, il est malaisé – et coûteux – de détruire une puissance relativement importante.

Ces deux machines sont alimentées séparément, chacune par un *transformateur tri-hexaphasé* 4 et une *soupape à vapeur de mercure* 5 pouvant fonctionner en redresseur ou en onduleur. Cette dernière, robuste et silencieuse, a un très bon rendement et ne nécessite pratiquement pas d'entretien. La puissance totale des deux machines électriques est de 1500 kVA.

2.3.2. *Réglage de vitesse*

Pour une machine hydraulique, la vitesse de rotation revêt une grande importance. En effet, le débit varie linéairement avec cette vitesse, l'énergie avec son carré et, par conséquent, la puissance avec son cube. Afin d'obtenir, pour la machine d'essai, des caractéristiques hydrauliques stables, il est indispensable de pouvoir régler la vitesse de rotation de la machine d'essai et de la pompe d'alimentation.

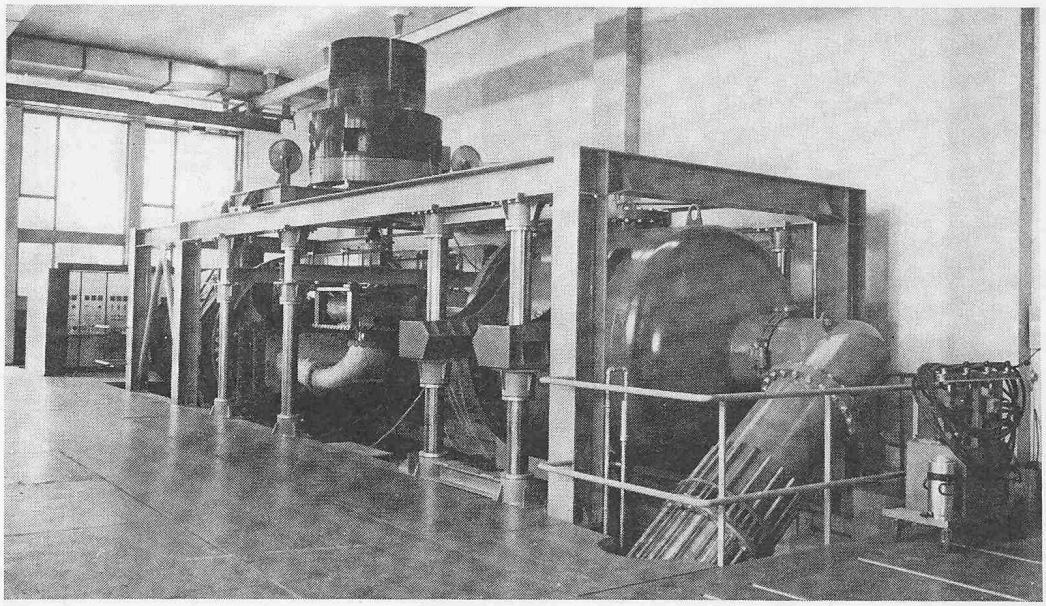
A la base, nous avons un *réglage analogique.* Une dynamo tachymétrique mesure la vitesse de rotation. La différence entre la valeur de consigne et la valeur mesurée agit sur les soupapes à vapeur de mercure par les grilles de commande de celles-ci. Le régulateur étant sensible aux différences de température, on a prévu un *réglage digital* correcteur. La vitesse est mesurée par un capteur magnétique placé en face d'une roue dentée. Grâce à ce réglage, la vitesse est maintenue constante à ± 0,1 % de sa valeur de consigne et ceci indépendamment du temps.

2.3.3. *Dispositifs secondaires*

Le niveau de pression du circuit fermé peut être ajusté par l'intermédiaire du niveau libre dans la cuve aval 20, en faisant varier la pression de l'air dans celle-ci. La valeur minimale de cette pression est égale à la pression de dégagement de vapeur de l'eau du circuit à la température de cette dernière, tandis que la valeur maximale peut atteindre environ 20 m CE. Ces pressions d'air sont obtenues, soit par une *pompe à vide* 14, soit par un *compresseur* 15. Dans le premier cas, la pression est réglée par une soupape automatique qui permet d'ajuster la pression à n'importe quelle valeur au-dessous de la pression atmosphérique.

La température et la teneur en air de l'eau en circuit fermé sont maintenues constantes par une injection continue d'eau dans le circuit. Afin de conserver la qualité

Fig. 3. Plate-forme d'essai



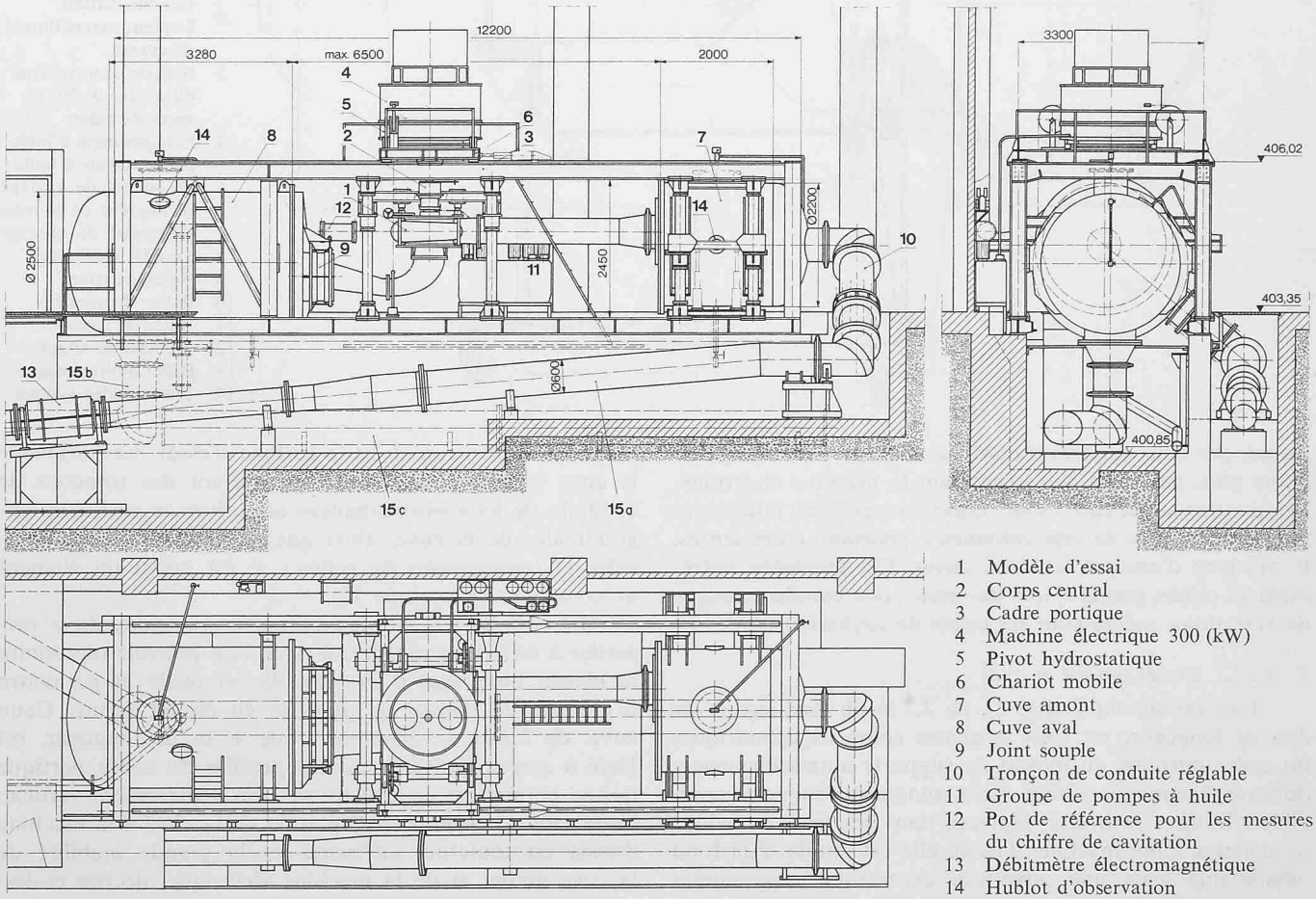
de l'eau traitée de toute l'installation, l'eau injectée est prélevée du bassin 1 et introduite dans le circuit au moyen d'une *pompe auxiliaire* 13. Cette dernière est aussi utilisée pour le remplissage du circuit fermé et pour la vidange de la partie inférieure du grand bassin qui ne peut être vidée par gravité. Un débit égal à celui de refroidissement fourni par la pompe 13 est soutiré par un déversoir placé à un niveau déterminé dans la cuve aval 20. Au moyen de dispositifs adéquats, l'eau peut s'écouler de la cuve 20 quelle que soit la pression dans celle-ci.

2.4. *Plate-forme d'essai*

La plate-forme d'essai, représentée par les figures 2 et 3, est la partie la plus importante de l'installation.

2.4.1. *Cadre portique*

Ce cadre est composé essentiellement de quatre poutres longitudinales de 12,2 m de longueur; deux de ces poutres, constituant la base, reposent sur deux murs en béton, les deux autres servent de support à la machine électrique. Ces dernières sont liées à leurs extrémités, dans le plan hori-



1 Modèle d'essai
2 Corps central
3 Cadre portique
4 Machine électrique 300 (kW)
5 Pivot hydrostatique
6 Chariot mobile
7 Cuve amont
8 Cuve aval
9 Joint souple
10 Tronçon de conduite réglable
11 Groupe de pompes à huile
12 Pot de référence pour les mesures du chiffre de cavitation
13 Débitmètre électromagnétique
14 Hublot d'observation
15a Conduite amont de mesure
15b Conduite aval
15c Conduite de dérivation

Fig. 2. Ensemble de la plate-forme d'essai

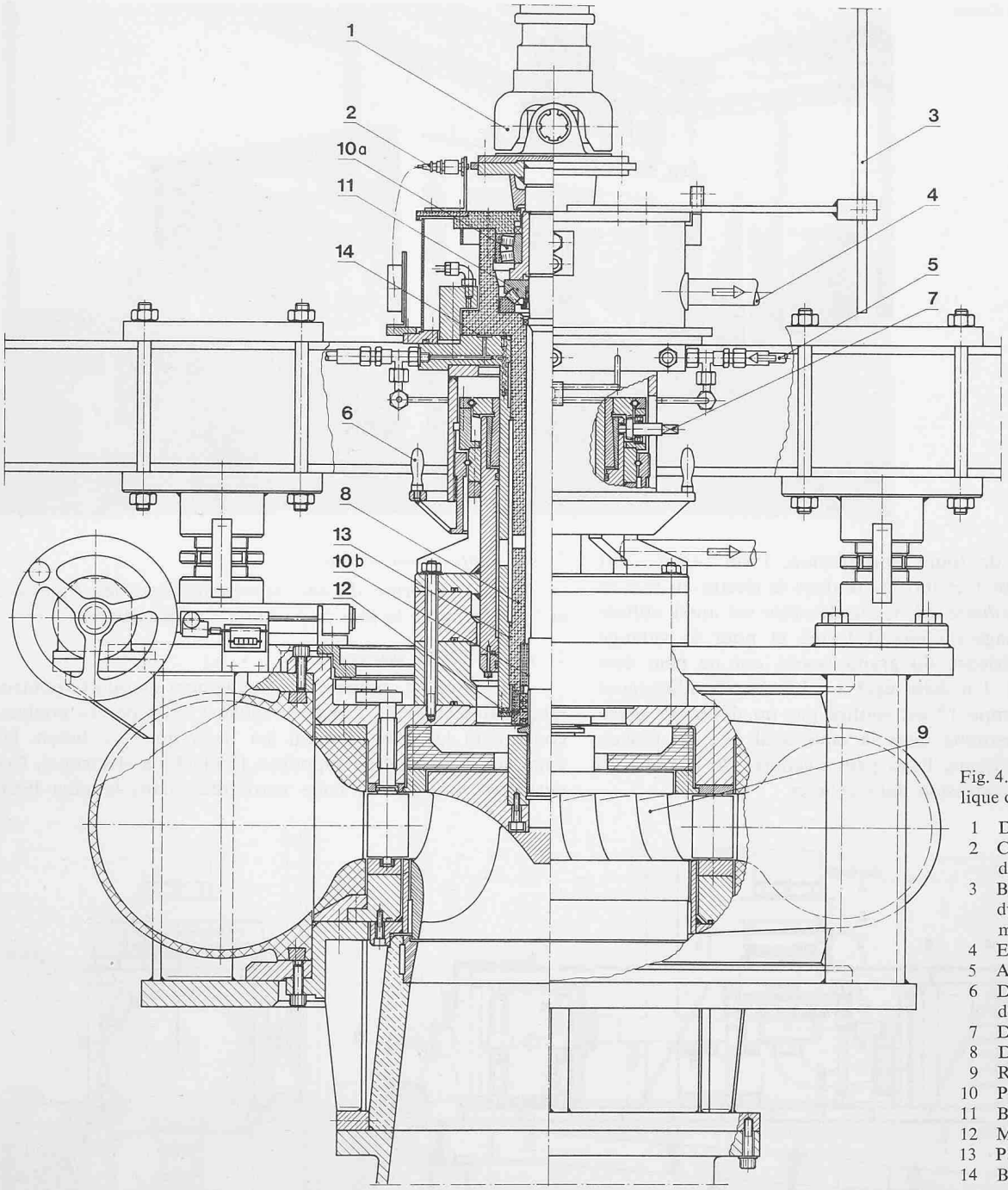


Fig. 4. Machine hydraulique d'essai

1 Double cardan
2 Capteur magnétique de vitesse
3 Bras de transmission du couple de frottement du palier
4 Echappement d'huile
5 Alimentation d'huile
6 Dispositif de réglage de hauteur de la roue
7 Dispositif de blocage
8 Douille oscillante
9 Roue motrice
10 Palier du modèle
11 Butée du modèle
12 Membrane souple
13 Palier hydrostatique
14 Butée hydrostatique

zontal, par deux poutres transversales de 3,3 m de longueur et, en plus, par le chariot supportant la machine électrique. Les poutres supérieures sont reliées aux poutres inférieures par deux groupes de sept colonnes supportant, entre autres, la machine d'essai et les deux cuves. Cet ensemble, extrêmement rigide, garantit, lors des essais, une marche exempte de vibrations, même pour les essais de cavitation.

2 . 4 . 2. Cuves amont et aval

La *cuve amont* 7 (fig. 2), de 2,2 m de diamètre et de 2 m de longueur, est fixée à quatre colonnes cylindriques du cadre portique au moyen de supports munis d'anneaux de serrage coniques. Grâce à ces colonnes et supports amovibles, la cuve peut être déplacée dans ses trois directions principales. Côté machine d'essai, elle est munie d'un fond démontable avec une ouverture excentrique augmentant encore les possibilités d'adaptation de la cuve au modèle. Elle comporte en outre un dôme pour capter les bulles d'air qui se forment dans le circuit, et des grilles tranquillisant l'écoulement à l'amont de la turbine d'essai. La liaison de la cuve au circuit s'effectue en insérant des tronçons de conduite de longueurs adaptées aux diverses positions longitudinales de la cuve, alors que pour les positions verticales et transversales de celle-ci, il est prévu un élément de conduite télescopique 10.

La *cuve aval* 8, en plus d'offrir la possibilité de se raccorder à différents modèles d'essai, doit pouvoir reproduire le niveau libre aval d'une installation réelle et permettre le réglage du niveau de pression en circuit fermé. Cette cuve, de 2,4 m de diamètre et de 4 m de longueur, est fixée à quatre colonnes en fers profilés du cadre portique qui ne permettent cependant que son déplacement vertical. Cette seule possibilité d'adaptation de la cuve à la machine d'essai est toutefois suffisante vu la grande mobilité de la cuve amont et de la machine électrique, décrite ci-dessous. Un élément souple, qui relie le modèle d'essai à la cuve aval, facilite l'adaptation de la bride de la cuve à celle du modèle.

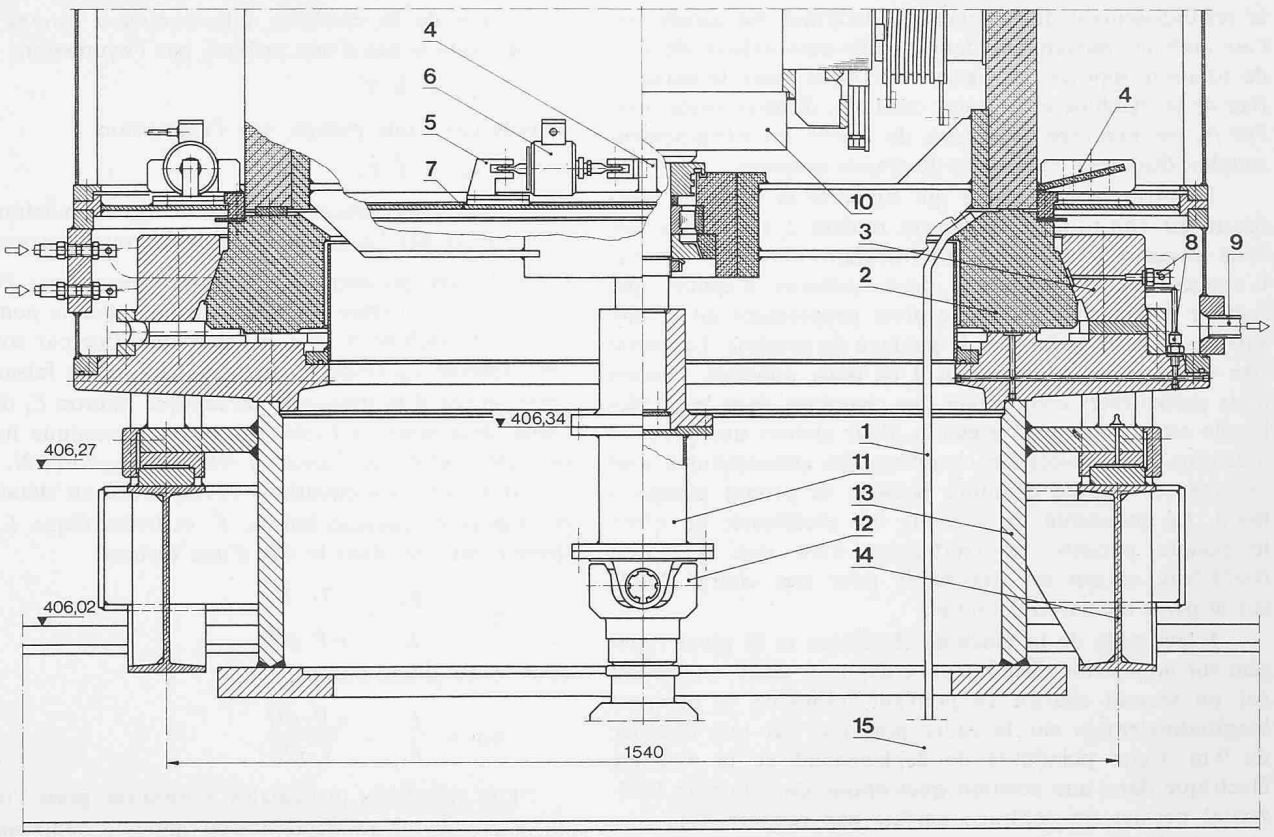


Fig. 5. Pivot hydrostatique

1 Bras de transmission du couple de frottement du palier, 2 Anneau mobile, 3 Anneau fixe, 4 Anneau mobile de mesure, 5 Ancrage fixe du capteur, 6 Capteur de force, 7 Couvercle, 8 Injection d'huile, 9. Echappement d'huile, 10 Machine électrique, 11 Arbre intermédiaire, 12 Double cardan, 13 Chariot transversal, 14 Chariot longitudinal, 15 Cadre portique

2.4.3. *Machine hydraulique d'essai*

Cette machine (fig. 4) comporte d'une part le *modèle d'essai* proprement dit composé d'une bâche spirale, d'un distributeur ou redresseur, d'une roue motrice 9 et d'un diffuseur ou aspirateur, d'autre part un *corps central* qui comprend des paliers et des butées hydrostatiques et dynamiques et des joints. Pour des raisons bien connues, il faut exclure de la mesure du couple les couples parasites dus à ces éléments mécaniques qui altèrent le couple hydraulique à mesurer.

Le couple engendré par le frottement mécanique dans les paliers, butée et joints de la machine d'essai est mesuré par l'intermédiaire d'une *douille oscillante* 8. Celle-ci est guidée radialement par deux *paliers hydrostatiques* 13 à huile et axialement par une *butée hydrostatique* 14 à double effet, également à huile. La pression d'huile est fournie par deux groupes composés chacun de quatre pompes, de manière à alimenter séparément les chambres à huile des paliers et de la butée hydrostatique. L'huile, récoltée à mi-hauteur et à la partie supérieure du corps central, retourne alors par gravité par la conduite 4 dans le bac des pompes. Des prises de pression sont prévues sur les deux faces de la butée hydrostatique permettant de mesurer la poussée axiale des roues essayées.

La chambre à huile située entre la douille 8 et la partie fixe du corps central est fermée à sa partie inférieure par une *membrane* 12 extrêmement souple séparant l'eau provenant du modèle d'essai de l'huile provenant des paliers. Les déplacements angulaires de la douille étant pratiquement nuls, le couple parasite provenant de la membrane est tout à fait négligeable.

L'arbre de la machine, situé à l'intérieur de la douille 8, est guidée par un palier à roulement à billes 10a et par un palier lisse 10b. La poussée axiale est reprise par une butée à rouleaux 11.

La machine d'essai est fixée à la plate-forme par l'intermédiaire d'un cadre formé de quatre poutres, elles-mêmes fixées à quatre colonnes cylindriques du cadre portique au moyen de supports munis d'anneaux de serrage coniques. Ces colonnes sont déplaçables longitudinalement de manière que le modèle puisse être disposé à l'intérieur du cadre portique à n'importe quel endroit compris entre les deux cuves décrites ci-dessus. L'espace maximal à disposition d'une machine d'essai est limité par l'écartement transversal de 3,3 m des colonnes, par la distance maximale de 6,5 m entre les deux cuves et par la hauteur disponible de 5,5 m entre le plateau d'accouplement de la machine électrique et le fond de la fosse.

2.4.4. *Machine électrique*

La machine électrique de la plate-forme d'essai est à courant continu. Elle peut tourner dans les deux sens de rotation et sa vitesse peut varier entre 200 et 1500 t/min. La vitesse est maintenue constante avec une tolérance de ± 0,1 %, ce qui garantit un régime très stable. La machine électrique fonctionne en génératrice pour les essais de turbines et en moteur pour les essais de pompes.

Le stator de la machine 22 repose sur un *pivot hydrostatique* (fig. 5) pour permettre la mesure du couple. Le fonctionnement est caractérisé par les deux domaines suivants: Entre 200 et 750 t/min, le couple maximal est constant et vaut 3800 Nm en moteur et 4400 Nm en génératrice; entre 750 et 1500 t/min, la puissance maximale est constante et vaut 300 kW en moteur et 340 kW en génératrice.

Pour limiter les couples parasites dans les mesures,

le refroidissement de la machine électrique est assuré par l'air ambiant moyennant deux ventilateurs axiaux de sens de rotation opposés. La liaison électrique entre la carcasse fixe de la machine et le stator oscillant, dimensionnée pour 760 A, est exécutée en tresses de cuivre nu extrêmement souples, disposées en boucles de grande ampleur.

Le *pivot hydrostatique* qui supporte la machine électrique est constitué d'un anneau mobile 2 s'appuyant sur deux anneaux fixes 3 par l'intermédiaire d'un film d'huile. L'anneau mobile comporte deux surfaces d'appui: une surface horizontale qui est le pivot proprement dit et une surface conique qui assure le guidage du système. La partie fixe se compose essentiellement de deux anneaux, chacun à six patins fixes comportant des chambres dans lesquelles l'huile est injectée sous pression. Pour assurer une pression uniforme dans toutes les chambres, les alimentations sont séparées et chaque chambre possède sa propre pompe à huile. La sensibilité du système est excellente; en effet, le couple parasite de frottement n'est que d'environ 0,075 Nm, ce qui est très faible pour une charge totale sur le pivot d'environ 5 tonnes.

L'ensemble de la machine électrique et le pivot reposent sur un chariot 13 qui peut se déplacer transversalement sur un second chariot 14 pouvant lui-même se déplacer longitudinalement sur le cadre portique, sur une distance de 9 m. Cette possibilité de déplacement de la machine électrique dans une position quelconque dans le plan horizontal permet un centrage parfait par rapport à la machine hydraulique d'essai. Un double cardan 12, qui sert d'élément d'accouplement entre les deux machines, permet de rattraper un éventuel léger défaut dans l'alignement des deux arbres ainsi qu'une éventuelle petite erreur dans la distance axiale entre ceux-ci.

Le déplacement sur glissières des deux chariots mentionnés ci-dessus comme aussi le déplacement des deux cuves 7 et 8 (fig. 2) s'effectuent au moyen de *vérins hydrauliques*. Lorsque la position de la machine électrique est fixée, des pinces de serrage permettent de rendre l'ensemble solidaire du cadre portique. Le déplacement longitudinal de la machine électrique offre en outre le grand avantage d'un montage et d'un démontage de la machine d'essai par le haut.

3. Mesures et étalonnages

3.1. *Introduction*

La caractéristique de base d'une machine hydraulique, donnée le plus souvent sous forme d'une *colline de rendement,* implique la connaissance de l'énergie hydraulique massique gH mise à la disposition de la machine ou fournie par celle-ci, du débit-volume $\dot{V}$ de la machine et du rendement total, respectivement η_{eT} de la turbine et η_{eP} de la pompe. Ce rendement, dit aussi rendement effectif, comprend toutes les pertes dans la machine, à savoir les pertes énergétiques, les pertes volumiques et les pertes mécaniques internes et externes.

La similitude entre les pertes *mécaniques externes* de la machine d'essai et de la machine industrielle est rarement respectée pour des raisons constructives. En effet, la conception des paliers, butée et joints qui sont à l'origine de ces pertes est très différente suivant qu'il s'agit du modèle ou de la machine industrielle. Afin de ne pas altérer, par des pertes purement mécaniques non négligeables, la précision des résultats de caractère essentiellement hydraulique, l'expérimentateur exclut ces pertes dans la détermination du rendement de la machine essayée, d'où la présence de paliers, butée et pivot hydrostatiques dans le groupe d'essai. Ainsi l'expérimentateur définit un nouveau rendement de la machine, dit *rendement interne* qui est donné, dans le cas d'une turbine, par l'expression

$$\eta_{iT} = \dot{E}_i/\dot{E}$$

dans le cas d'une pompe, par l'expression

$$\eta_{iP} = \dot{E}/\dot{E}_i$$

où $\dot{E}_i$ puissance mécanique interne de la machine transmise par l'accouplement de la roue motrice [W]

$\dot{E} = \mu\dot{V} \cdot gH$: puissance hydraulique fournie par l'eau à la turbine ou fournie à l'eau par la pompe [W].

Une machine d'essai est donc qualifiée par son rendement interne η_{iT} respectivement η_{iP}, lui-même faisant appel, entre autres, à la puissance mécanique interne E_i de la machine, déterminée à l'aide du couple mécanique interne T_i de celle-ci et de sa vitesse de rotation angulaire N.

Il résulte des équations précédentes, en détaillant les puissances mécanique interne $\dot{E}_i$ et hydraulique $\dot{E}$, le rendement interne, dans le cas d'une turbine,

$$\eta_{iT} = \frac{\dot{E}_i}{\dot{E}} = \frac{T_i \cdot N}{\mu\dot{V} \cdot gH}$$

dans le cas d'une pompe

$$\eta_{iP} = \frac{\dot{E}}{\dot{E}_i} = \frac{\mu\dot{V} \cdot gH}{T_i \cdot N}$$

Les grandeurs principales à mesurer pour l'obtention de la colline de rendement sont donc le *débit-volume* $\dot{V}$, l'*énergie* gH, le *couple interne* T_i et la *vitesse de rotation angulaire* N. Il faut en outre connaître la *masse volumique* μ de l'eau utilisée pour les essais et l'*accélération terrestre* g du lieu où se situe le modèle d'essai. La masse volumique μ est mesurée, en appliquant le principe d'Archimède, par une balance de haute précision et un corps plongeant de volume parfaitement déterminé. L'accélération terrestre g s'obtient soit par mesure directe, soit par calcul. Pour le stand d'essai de l'IMH (latitude $\varphi = 46{,}5\,°$, altitude $Z = 404{,}0$ m), la valeur calculée d'après Helmert est $g = 9{,}806$ m/s².

D'autre part, il est indispensable de connaître les fluctuations du débit et du rendement en régime de cavitation. Pour cela, la mesure d'une variable supplémentaire s'impose, celle du *chiffre de cavitation* σ.

Certaines mesures complémentaires sont utiles, voire indispensables. Il s'agit notamment des mesures de diverses *températures* et de la *teneur en air dissous de l'eau*. Enfin, de nombreuses mesures hydrauliques et mécaniques peuvent être exécutées sur le modèle d'essai.

En ce qui concerne les appareils de mesure proprement dits, nous avons cherché à automatiser le plus possible les opérations de lecture des mesures et de calcul des résultats, ce qui a conduit à l'adoption d'appareils de mesures électroniques. Ces appareils, ainsi que toutes les commandes et l'ensemble d'acquisition des données et de calcul sont placés dans des armoires 17 visibles tout à gauche sur la figure 3. Toutefois, parallèlement à ces systèmes automatiques, nous avons prévu des appareils de mesure primaires qui sont utilisés principalement pour les étalonnages mais également pour des mesures directes.

3.2. *Mesure du débit*

L'installation comporte trois possibilités de mesure du débit: un débitmètre électromagnétique, deux cônes *Venturi* et un bassin volumétrique. Le *venturimètre* est suffisamment connu pour ne pas devoir le décrire. Il en va de même du *bassin volumétrique* 8. Nous nous limiterons à la description du débitmètre électromagnétique.

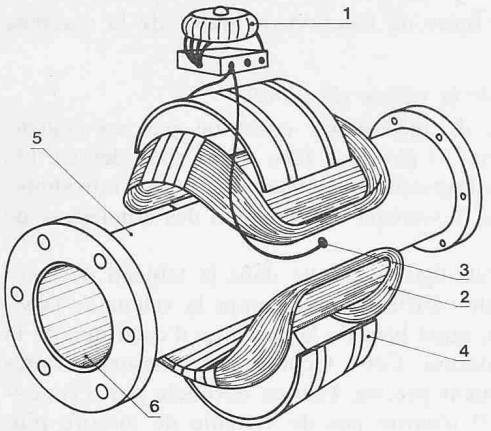


Fig. 6. Débitmètre électromagnétique. 1 Transformateur de courant, 2 Enroulement principal, 3 Electrode de mesure, 4 Circuit magnétique, 5 Tuyau en acier inoxydable amagnétique, 6 Isolation intérieure

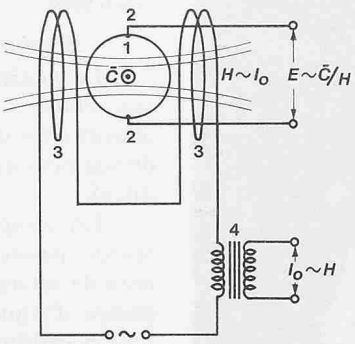


Fig. 7. Schéma électrique du débitmètre électromagnétique. 1 Débitmètre, 2 Electrode de mesure, 3 Bobine, 4 Transformateur d'intensité

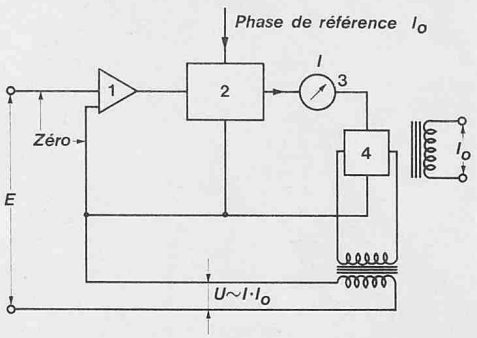


Fig. 8. Schéma de l'unité de transmission. 1 Amplificateur, 2 Démodulateur, 3 Instrument de mesure, 4 Multiplicateur de HALL

Le choix de cet appareil (fig. 6, 7 et 8) s'impose par les nombreux avantages qu'il présente par rapport aux débitmètres courants. Il est le seul système de mesure du débit qui n'exige ni contraction ni obturation quelconque de la conduite. Ce fait est très important si l'on considère la faible différence de niveau disponible, environ 3 m, entre le modèle d'essai et le débitmètre. En effet, lors des essais de cavitation, la pression au débitmètre peut atteindre des valeurs très basses et provoquer de la cavitation dans l'appareil si celui-ci est du type déprimogène. Par ailleurs, les essais de turbines et de pompes demandent que le débit puisse être mesuré dans les deux sens d'écoulement. Le débitmètre 13, de forme symétrique, répond à cette condition. Enfin, il est un des rares systèmes qui permet de garantir, sur toute l'étendue de la plage des débits, de 0,05 à 1,35 m^3/s, une bonne précision, alors qu'avec le venturimètre, par exemple, il faudrait disposer de plusieurs de ces appareils pour couvrir la même gamme de débit.

L'instrument en question est un tronçon de conduite 5 de 450 mm de diamètre et de 1,5 m de longueur (fig. 6). Le diamètre a été choisi en vue d'obtenir une bonne précision pour des petits débits tout en évitant de créer, pour de gros débits, de trop basses pressions dans la section de mesure. Le débitmètre est inséré au milieu d'une conduite rectiligne et inclinée, d'une longueur de 25 m, d'un diamètre de 600 mm, à l'exception d'un tronçon de 450 mm de diamètre et de 9 m de longueur. L'emplacement du débitmètre dans cette conduite de mesure est donc particulièrement favorable.

Le principe du débitmètre électromagnétique est basé sur les lois de l'induction: tout conducteur en mouvement – dans notre cas, l'eau – dans un champ magnétique est le siège d'un champ électrique qui est fonction de sa vitesse et de l'intensité du champ magnétique. Le tronçon de conduite constituant le débitmètre est isolé intérieurement par un revêtement de caoutchouc spécial 6. Il comporte de part et d'autre deux enroulements 2 qui créent un champ magnétique transversal uniforme à travers l'écoulement. Les électrodes de mesure 3 sont disposées dans un plan perpendiculaire à celui du champ magnétique. Elles sont placées dans la paroi du tube, à fleur de la surface intérieure de celui-ci. Si l'intensité du champ magnétique et la distance entre les deux électrodes sont constantes, la différence de potentiel et, partant, le courant, est alors proportionnelle à la vitesse du fluide de sorte que, pour une section donnée, on obtient une mesure du débit. La valeur maximale du courant de sortie est de 10 mA. L'unité de détection possède cinq gammes de mesure étagées en progression géométrique. Un convertisseur transforme ensuite le courant de sortie en impulsions qui sont transmises au système d'acquisition des données et de calcul.

Pour l'*étalonnage* à l'aide du bassin volumétrique, les systèmes de mesure utilisés sont d'une part les limnimètres et d'autre part un compteur électronique totalisant les impulsions provenant du débitmètre et celles fournies par une horloge à quartz. Le compteur électronique est déclenché automatiquement au moment où le milieu de la fente du clapet partiteur passe exactement au droit de la lame de séparation des canaux. Les contacts électriques sont donnés par deux détecteurs de proximité électroniques de haute précision sans élément mobile, évitant ainsi tout mauvais contact. Ces détecteurs permettent, en outre, de mesurer le temps de manœuvre du clapet. On peut ainsi régler le système de commande afin d'obtenir l'égalité des temps de basculement dans les deux sens de fonctionnement.

3.3. *Mesure de l'énergie*

L'*énergie hydraulique massique* gH (J/kg) mise à la disposition d'une turbine ou produite par une pompe est la différence des énergies entre l'amont et l'aval de la machine. En séparant les expressions des différences d'énergies potentielles et cinétiques, il vient $gH = gH_p + gH_c$. L'énergie potentielle massique gH_p s'obtient en multipliant par g l'énergie H_p mesurée directement à l'aide d'un manomètre différentiel, alors que l'énergie cinétique massique gH_c se détermine à partir de la mesure du débit et des aires des sections à l'amont et à l'aval de la machine.

Pour la mesure de H_p, nous avons opté pour un *manomètre différentiel à piston rotatif avec balance*. Un *capteur de force* à jauges de contraintes est placé entre le piston rotatif et la balance. On obtient ainsi, en plus, une mesure électrique de la force exercée par la balance. Un système de détection électronique identique à celui utilisé pour la mesure du débit fournit un courant proportionnel à la valeur mesurée. Ce courant, dont la valeur varie entre 0 et 10 mA, est ensuite converti en impulsions d'une fréquence comprise entre 0 et 1000 Hz. L'unité de détection électronique possède quatre gammes de mesure étagées en progression géométrique. Les impulsions électriques sont introduites dans le système d'acquisition des données et de calcul.

L'*étalonnage de ce capteur de force* se fait couramment par la balance mécanique en question. En effet, la

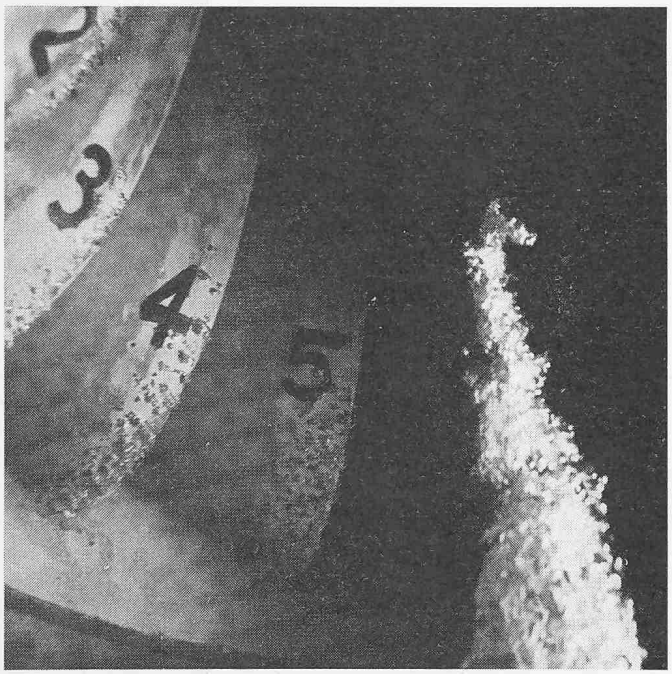


Fig. 9. Phénomène de cavitation et torche

conversion d'une pression en une force à l'aide d'un piston rotatif est un procédé précis. La balance mécanique est un dispositif sûr dont les caractéristiques sont stables. Pour vérifier les caractéristiques de l'ensemble piston rotatif – balance, on se sert d'un *manomètre à poids.*

3 . 4. Mesure du couple

La mesure de la puissance mécanique interne $\dot{E}_i$ est difficile à effectuer directement. La seule méthode donnant les garanties de précision demandées consiste à calculer cette puissance en partant des mesures du *couple* et de la *vitesse de rotation.*

Ainsi que déjà décrit sous chiffres 2 . 4 . 3 et 2 . 4 . 4, le stator de la machine électrique repose sur un pivot hydrostatique à huile. Un levier 3 (fig. 4) et 1 (fig. 5) relie la douille oscillante du corps central au stator de la machine électrique. Le couple de frottement des paliers, de la butée et des joints de la machine d'essai s'ajoute ainsi directement au couple principal.

La mesure du couple se ramène alors à une mesure de *force* que l'on multiplie par la *longueur du bras de levier* correspondant. La mesure de cette force, qui est la réaction du stator de la machine électrique, s'effectue à l'aide de deux *capteurs de force* à jauges de contraintes disposés sur un même diamètre, de part et d'autre de la machine. Le couple à mesurer varie entre les valeurs limites 150 et 4400 Nm conduisant à des forces de réaction dans les capteurs comprises entre environ 200 et 6000 N. Cette gamme de mesure est assurée par trois capteurs interchangeables de 1000, 2000 et 5000 N, de mêmes caractéristiques de précision que celui employé pour la mesure de l'énergie. La chambre dans laquelle sont logés ces capteurs est munie d'une climatisation pour maintenir une température constante. Le système électronique de détection et d'amplification est très semblable à ceux utilisés pour les mesures du débit et de l'énergie. La seule différence est qu'il faut additionner les deux valeurs mesurées par les deux capteurs. L'amplificateur possède également quatre gammes de mesure étagées en progression géométrique. L'*étalonnage de ces capteurs* s'effectue à l'aide de poids, calibrés par les soins du *Bureau fédéral des poids et mesures,* poids qui se substituent à la force de réaction du stator de la machine électrique.

3 . 5. Mesure de la vitesse de rotation

Le système de mesure est constitué par un *capteur magnétique* 2 (fig. 4) placé en face d'une roue dentée. On obtient ainsi des impulsions électriques qui sont introduites directement dans le système d'acquisition des données et de calcul.

Un compteur digital, installé dans le tableau de commande, permet de vérifier en tout temps la valeur de la vitesse de rotation, aussi bien de la machine d'essai que de la pompe d'alimentation. Cette technique de mesure est très sûre et extrêmement précise. Elle ne nécessite *pas d'étalonnage:* en effet, il n'existe pas de système de mesure plus direct.

3 . 6. Mesure du chiffre de cavitation

Sans entrer dans les détails, on peut montrer que la mesure du *chiffre de cavitation* σ tel que défini par Thoma peut se faire directement par un manomètre différentiel relié d'un côté aux prises de pression situées à la sortie du diffuseur et de l'autre côté à un vase partiellement rempli d'eau dont la pression est maintenue égale à celle de dégagement de vapeur à l'aide d'une pompe à vide. La température de l'eau dans ce vase de référence est maintenue égale à celle de l'eau du circuit grâce à un serpentin dans lequel circule cette dernière. La position verticale du vase de référence est réglable de manière à placer le niveau de l'eau dans le vase à la même cote que le point de référence théorique du modèle. Deux systèmes différents sont prévus pour effectuer la mesure proprement dite: *capteur de pression différentiel, manomètre différentiel à mercure.* Ce dernier appareil est prévu, en premier lieu, comme *étalon,* mais peut aussi être utilisé pour la mesure directe. La différence maximale de pression à mesurer ne dépassant en général pas 10 mCE, nous avons adopté des capteurs de pression différentiels du type à jauges de contraintes. Pour obtenir une précision maximale sur toute la gamme des mesures, plusieurs capteurs sont placés en parallèle. On peut ainsi changer d'instrument très rapidement suivant la valeur de la différence de pression à mesurer. Le système de détection et d'amplification électronique est identique à celui utilisé pour la mesure de l'énergie. Il possède également quatre gammes de mesure étagées en progression géométrique.

Il est indispensable d'accompagner ces mesures du chiffre de cavitation de *prises de vues photographiques* de l'écoulement aux endroits les plus exposés à la cavitation. La figure 9 illustre le phénomène de la cavitation à la sortie de l'aubage moteur d'une turbine Francis ainsi que la torche qui apparaît à certains régimes de fonctionnement.

3 . 7. Dépouillement des résultats de mesures

Pour assurer une haute cadence de mesures, il est nécessaire d'automatiser au maximum le traitement des données et le calcul des résultats. Dans ce but, nous avons installé un système de compilation et de calcul fournissant directement les résultats sous forme imprimée à partir des grandeurs mesurées. Ce système électronique se compose d'un centralisateur de variables, d'une unité centrale, d'une calculatrice et d'une machine à écrire. Le *centralisateur de variables* se compose principalement de plusieurs compteurs qui comptent simultanément, pendant la durée de mesure, les impulsions provenant des mesures du débit, de l'énergie, du couple, de la vitesse de rotation, du chiffre de cavitation et du temps. L'*unité centrale* assure la liaison entre le centralisateur de variables, la calculatrice et les

mémoires. Les données nécessaires au calcul sont les variables, les coefficients d'étalonnage, les constantes propres à la machine essayée et les constantes absolues. L'unité centrale sélectionne automatiquement les coefficients correspondant à la gamme et au capteur choisis pour les introduire dans la calculatrice lorsque le programme les demande. La *calculatrice* effectue toutes les opérations arithmétiques nécessaires à l'obtention des valeurs numériques des grandeurs mesurées et des coefficients adimensionnels, nécessaires à l'établissement des courbes caractéristiques de la machine d'essai. Les résultats sont imprimés par une *machine à écrire* commandée par la calculatrice.

4. Aspect économique de l'installation

Pour une installation aussi importante que ce stand d'essai universel, la *question économique* ne saurait être laissée de côté. Elle intéresse tout particulièrement son exploitation qui met en jeu des sommes considérables. L'étude de ce projet a été menée en vue d'une exploitation rentable, tout en donnant la priorité à l'aspect technique du problème. Le fait qu'il s'agit d'un stand d'essai universel lui assure déjà une rentabilité exceptionnelle. La conception technique de l'installation, dont quelques particularités sont énumérées ci-après, contribue également à la rentabilité de l'exploitation du stand.

Le premier point concerne la *pompe d'alimentation* du circuit qui doit présenter des caractéristiques exceptionnelles. Il était question de prévoir deux groupes de pompage qui se seraient complétés pour couvrir le domaine d'utilisation du stand. Cependant, de coût plus élevé, plus encombrante en raison du stockage de la seconde pompe et occasionnant des pertes de temps supplémentaires considérables par la permutation des pompes et leurs moteurs, cette solution dut être abandonnée. Les avantages incontestables d'une seule unité compensent largement l'inconvénient des rendements déficitaires de la pompe unique aux faibles charges, relativement peu utilisées pour les essais.

Un autre point concerne les coudes et tronçons de conduites qui sont appelés à être fréquemment démontés et montés pour passer d'un circuit d'essai à un autre, ou aux circuits d'étalonnage. L'assemblage de ces éléments par *brides à collier* rend ces opérations très faciles et rapides; le gain de temps est considérable par rapport à la solution habituelle de brides à boulons. Ces brides à collier présentent en plus l'avantage de permettre de rattraper, au besoin, quelques légers défauts d'alignement des tronçons à raccorder.

Par ailleurs, malgré l'exiguïté de la place disponible dans le laboratoire, une *plage de montage* pour modèles d'essai a pu être aménagée à proximité du stand. Cette plage permet, pendant l'utilisation du stand, d'assembler le modèle suivant et de raccourcir ainsi le temps d'échange des modèles.

En ce qui concerne les pertes d'énergie mêmes, d'importance non négligeable pour un stand d'essai de cette envergure, le *freinage électrique* d'une turbine d'essai permet de récupérer une grande partie de l'énergie fournie par la pompe d'alimentation du stand. Le freinage hydraulique d'une turbine d'essai, tel qu'on le rencontre encore, représente une pure perte. Du reste, cette solution n'aurait pu entrer en ligne de compte dans le cas particulier, puisque le stand est également destiné aux essais de pompes où seul le moteur électrique entre en considération. Lors des essais de pompes, comme déjà dit, l'énergie hydraulique fournie par la pompe d'essai à l'installation peut également être récupérée par la pompe d'alimentation qui, dans ce cas, travaille en turbine et restitue au réseau, par l'intermédiaire de sa génératrice, l'énergie récupérée. Ainsi, toute l'énergie électrique introduite dans l'installation n'est pas perdue.

Par ailleurs, l'*étalonnage du débitmètre* peut s'effectuer *pendant l'opération de montage et de démontage d'une machine d'essai* en court-circuitant celle-ci par l'introduction d'un tronçon de conduite passant sous le stand, d'où un gain de temps appréciable.

La machine électrique de la plate-forme d'essai repose sur un chariot mobile permettant de la déplacer facilement. On peut ainsi *monter et démonter les modèles d'essai par le haut* à l'aide des ponts roulants, ce qui accélère notablement la manœuvre de changement de modèle.

Enfin, l'économie de temps la plus considérable est réalisée grâce au *système de mesure, de traitement des données* et de *calcul automatique*. En effet, pour un point de mesure, les opérations de lecture des instruments, de calcul et d'impression sont réalisées dans un laps de temps inférieur à une minute, alors que les systèmes de mesure courants nécessitent des temps cinq à six fois plus élevés. Ce système évite d'autre part toutes les erreurs de lecture des instruments et de transcription. Un seul opérateur peut commander l'installation et faire les mesures; il n'est pas nécessaire que cette personne soit un spécialiste.

5. Conclusions

Le nouveau stand d'essai universel pour machines hydrauliques à réaction, tel que projeté, décrit et illustré dans cet exposé, est aujourd'hui réalisé. Les étalonnages de tous les appareils de mesure ont été faits avec beaucoup de soins assurant ainsi, grâce aussi à la haute fidélité de ces appareils, une très grande précision des mesures. Cette qualité qu'exige toute recherche telle que celle entreprise dans le domaine de la *systématisation du tracé d'aubage de machines hydrauliques* est tout à l'avantage d'autres essais qui peuvent s'effectuer sur ce stand.

En effet, ce même stand, grâce à sa souplesse et à ses possibilités d'adaptation, se prête parfaitement à des *essais de comparaison entre différents modèles de machines hydrauliques* destinées à la même installation, ainsi qu'aux *essais de réception sur modèles réduits* de machines à exécuter recommandés par la Commission Electrotechnique Internationale (CEI). Ce domaine intéresse tout particulièrement les exploitants de centrales hydro-électriques.

Enfin, cette installation, grâce à la précision de ses mesures, peut également servir de *comparaison pour d'autres stands,* peut-être moins précis, de laboratoires de constructeurs de machines hydrauliques.

Ce nouveau stand d'essai présente donc un éventail très large de possibilités d'utilisation avec toute garantie d'objectivité puisqu'il fait partie de l'institution officielle qu'est l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Nous souhaitons que cet exposé puisse faire connaître les qualités de ce nouveau stand à tous ceux qui pourraient y faire appel et nous espérons qu'il sera largement mis à contribution dans l'intérêt du développement des machines hydrauliques.

In einem späteren Heft, das ebenfalls Prof. Dr. Charles Jaeger zum 70. Geburtstag gewidmet ist, werden folgende Aufsätze erscheinen :

Prof. *J. Zeller,* dipl. Ing., Birmensdorf ZH: Die Häufigkeitsanalyse extremer Niederschläge und Abflüsse als Planungsgrundlage im Wildbachverbau

A. Chervet, ing. dipl. aux Laboratoires de Recherches Hydrauliques, Hydrologiques et Glaciologiques (VAW), Zurich: Calcul de la propagation des crues dans un cours d'eau avec submersion

Jean A. Martin, ing. dipl. EPUL, Allis Chalmers, York, Pa. USA: Cavitation dans un milieu corrosif

C. Stamm, dipl. Ing., Basel: Die Regulierung des Flusses Senegal und ihre Problematik

In diesem zweiten Geburtstagsheft wird auch eine Übersicht über die von Prof. Jaeger verfassten Veröffentlichungen erscheinen.

Mitteilungen aus dem SIA

Sektion Bern, Hauptversammlung

Diese ist angesetzt auf Dienstag, 30. März 1971, 20.15 h, im Restaurant Innere Enge, Bern. Unter den Traktanden figuriert die Wahl eines Vorstandsmitgliedes. Als Ersatz für das austretende Mitglied *H. von Känel,* Architekt, wurde vorgeschlagen *Franz Rutishauser,* Architekt, Stadtbaumeister von Bern. Nach Erledigung der Vereinsgeschäfte werden drei interessante bernische Kurzfilme vorgeführt.

Wettbewerbe

Alters- und Pflegeheim in Flaach ZH. Die Alters- und Pflegeheimkommission Flaachtal hat einen Projektwettbewerb unter sechs Architekten veranstaltet. Das *Raumprogramm* umfasste für das Altersheim 34 Einzelzimmer und für das Pflegeheim zwei Dreier-, vier Zweier- und zwei Einzelzimmer sowie alle Nebenräume. Architekten im *Preisgericht* waren H. A. Gubelmann, Winterthur, und O. Bitterli, Zürich. *Ergebnis:*

1. Preis (2200 Fr. mit Antrag zur Weiterbearbeitung) A. Blatter, Winterthur, Mitarbeiter P. Stiefel
2. Preis (1800 Fr.) Heiri Frei, Flaach/Winterthur, Mitarbeiter Samuel Meier
3. Preis (1000 Fr.) E. Rüeger, Winterthur

Die feste Entschädigung betrug 2000 Fr. Die Projekte sind noch bis 27. März im Gemeindehaus Flaach ausgestellt (Anmeldung bei der Gemeinderatskanzlei).

Alterswohnbauten in Aarau (SBZ 1970, H. 33, S. 753). Es wurden 24 Projekte beurteilt. *Ergebnis:*

1. Preis (7500 Fr. mit Antrag zur Weiterbearbeitung) Karl Blattner, Küttigen
2. Preis (7000 Fr.) R. Frei und E. Moser, Aarau, Mitarbeiter F. Buser
3. Preis (5000 Fr.) Lydia Schaffner, Lausanne, Mitarbeiter Eckart Frische, dipl. Ing.
4. Preis (4000 Fr.) Hans Brüderlin, Aarau, Mitarbeiter Hans v. Allmen
5. Preis (3000 Fr.) Heinz Binder, Aarau
6. Preis (1500 Fr.) Alex Maurer, Zürich, Mitarbeiter Martin Kraus, Thomas Szikszay
7. Rang (kein Preis) Hächler-Pfeiffer-Bohn, Aarau

Ankauf (1500 Fr.) Sonia Maria Matter, Erlinsbach

Ankauf (1500 Fr.) Gotthold Hertig, Aarau

Ankauf (1000 Fr.) Hans-Chr. Müller, Burgdorf, Mitarbeiter Hans Müller, Oskar Fiechter

Die *Projektausstellung* dauert noch bis 2. April in der Villa Alta (Francke-Gut), Entfelderstrasse 61, Aarau. Werktags und sonntags 9 bis 11 und 15 bis 19 h.

Hallenbad Interlaken (SBZ 1970, H. 49, S. 1156). Im Projektwettbewerb der Einwohnergemeinde Interlaken sind 18 Entwürfe beurteilt worden. *Preisgewinner:*

1. Preis (6000 Fr. mit Antrag zur Weiterbearbeitung) Hallenbadbau AG Signau, Langnau i. E. Mitarbeiter Heinrich Keller, Ernst Nievergelt, Robert Müller
2. Preis (5500 Fr.) Alex Naegeli in Firma A. Naegeli u. H. Hausherr, Oberrieden ZH
3. Preis (3000 Fr.) Hanspeter von Allmen, Interlaken
4. Preis (2800 Fr.) Hans Brügger, Lausanne
5. Preis (1400 Fr.) R. Friedli u. A. Sulzer, Bern
6. Preis (1300 Fr.) Ernst E. Anderegg, Meiringen, Mitarbeiter Rolf Dettmar, Urs Gysin

Die Ausstellung dauert noch bis 4. April. Saal des Grandhotels Beau-Rivage in Interlaken; werktags 14 bis 19 h, Samstag und Sonntag 10 bis 12 h und 14 bis 19 h.

Schulhaus in Küsnacht-Itschnach (SBZ 1970, H. 40, S. 912). Aus diesem Wettbewerb wurden die Projekte der Architekten Walter Schindler, Zürich/Zumikon, Mitarbeiter A. Eggimann (1. Preis), und Peter A. Uster u. René Wagner, Zürich (2. Preis), weiterbearbeitet. Die Expertenkommission hat nun das Projekt der Architekten *P. A. Uster* und *R. Wagner* zur Ausführung empfohlen.

Primar- und Oberstufenschulanlage in Kloten. Die Schule Kloten eröffnet einen Projektwettbewerb für die Primar- und Oberstufenschulanlage «Graswinkel». Teilnahmeberechtigt sind sämtliche Architekten mit eigenem Büro, die seit dem 1. Januar 1971 ihren Wohn- oder Geschäftssitz in der Gemeinde Kloten haben. Zusätzlich sind sechs auswärtige Architekten eingeladen worden. Dem Preisgericht gehören als Architekten an: Dr. E. R. Knupfer, Zürich, M. Kollbrunner, Zürich, W. Hertig, Kloten, und W. Schmid, Kloten. Für die Prämiierung von sechs bis sieben Arbeiten stehen dem Preisgericht 32 000 Fr. und für Ankäufe 6000 Fr. zur Verfügung. Das Programm umfasst: In einer ersten Etappe zwölf Oberstufen- und drei Arbeitsschulzimmer, ein Sprachlabor, Nebenräume und Einrichtungen für eine Oberstufenanlage sowie zwei Turnhallen, eine Hauswartwohnung und zwei Kindergärten; in einer zweiten Etappe zwölf Primar- und zwei Arbeitsschulzimmer sowie zugehörige Nebenräume. Anforderungen: Lageplan und Modell 1:500, Projektpläne 1:200, kubische Berechnung, Erläuterung (fakultativ). Fragenbeantwortung bis 29. April 1971. Abgabetermine: Für die Entwürfe 30. August und für die Modelle 13. Sept. 1971. Bezug der Wettbewerbsunterlagen beim Schulsekretariat, 8302 Kloten, bis 29. April 1971. Depot 100 Fr.

Ankündigungen

Technikum Winterthur (Ingenieurschule)

Die *Ausstellung* der Semester- und Diplomarbeiten (Zeichnungen und Modelle) der Abteilungen für Hochbau, Tiefbau, Maschinenbau und Elektrotechnik findet am Samstag, dem 3. April statt. Öffnungszeiten: 11 bis 12.30 und 13.30 bis 17 h. Eingang Ostbau. Die *Diplomfeier* ist auf Freitag, den 30. April 1971, 17.00 h, im Stadthaussaal Winterthur angesetzt.

Volkshochschule des Kantons Zürich

Die Kurse des Sommersemesters 1971 dauern vom 20. April bis Anfang Juli. Einschreibungen im Sekretariat, Limmatquai 62, Haus der Museumsgesellschaft, Telephon 01 / 47 28 32.

Öffentliche Vorträge

Montag, 29. März. Maschineningenieur-Gruppe Zürich der GEP. 20.00 h im Zunfthaus zur Zimmerleuten. Dr. *Karl Öhler,* Zürich: «Ferienreise durch Griechenland».

Dienstag, 30. März. ETH-Kolloquium für Technische Wissenschaften. 17.15 h im Hörsaal III des Maschinenlaboratoriums der ETH Zürich. Prof. Dr. *G. K. Batchelor,* F.R.S., University of Cambridge: «The Hydrodynamics of Linear Macromolecules».

Donnerstag, 1. April. STV Sektion Bern. 20.15 h im Vereinshaus des KV, Zieglerstrasse 20, Bern. *Fritz Roth,* Ing., Zollikofen: «Elektromotoren und ihre Anwendung».

Donnerstag, 1. April. Kunstmuseum Basel. Vortragsreihe über Haupttendenzen der bildenden Kunst seit 1950. 20.15 h im Vortragssaal des Museums (Eingang Dufourstrasse). Dr. *Franz Meyer:* «Farbe als Form».

Nachdruck von Bild und Text nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet

Redaktion: W. Jegher, A. Ostertag, G. Risch, M. Künzler; Zürich-Giesshübel, Staffelstrasse 12, Telephon 051 / 36 55 36

Briefpostadresse: Schweizerische Bauzeitung, Postfach 630, 8021 Zürich