



POUR UNE MEILLEURE NORMALISATION DES ESSAIS SUR MODÈLES DES MACHINES HYDRAULIQUES (*)

par J. N. MANSFIELD, S. Sc.

National Engineering Laboratory, East Kilbride, Glasgow

En 1966, un groupe de travail de la Commission Electrotechnique Internationale a collecté des informations sur l'utilisation des caractéristiques d'essai sur modèle. L'enquête porte sur plus de 100 plates-formes d'essai en service à travers le monde. Ces informations, classées et répertoriées, ont été présentées en juin 1970 à une réunion du Comité tenue à Washington et sont publiées ici sous forme condensée.

Tous les constructeurs de turbines et de grosses pompes, plusieurs sociétés de production d'énergie électrique et quelques universités et organismes nationaux possèdent des installations d'essai de machines hydrauliques. Ces installations d'essai sont utilisées lors de l'étude des nouvelles installations hydroélectriques ou de pompage pour apporter des éléments de développement aux projeteurs, puis pour vérifier si le projet est conforme aux exigences contractuelles, notamment en ce qui concerne le rendement. Dans quelques cas, l'importance du projet peut justifier la construction de modèles spéciaux pour des essais comparatifs sur la même plate-forme avant la soumission d'un contrat, mais la durée requise par cette procédure la rend généralement inacceptable.

(*) Ce rapport est le résultat d'un travail effectué dans le cadre du Comité 4 « Turbines hydrauliques » de la Commission Electrotechnique Internationale, par un groupe de travail international présidé par M. Mansfield (U.K.).

Compte tenu du caractère statistique et informatif de ce rapport, il a été décidé par la CEI de ne pas le publier sous la forme habituelle d'une recommandation, mais d'en autoriser une publication simultanée en français dans *La Houille Blanche* et en anglais dans *Water Power*.

L'acquéreur d'une grosse machine hydraulique prend un risque en évaluant l'honnêteté des offres des différents constructeurs, puisque la différence des résultats sur modèle sera faible — probablement moins de un point de pourcentage — et aura été obtenue sur différentes plates-formes utilisant différentes méthodes de mesure avec des modèles de tailles différentes essayés sous différentes chutes.

La responsabilité de la normalisation des méthodes d'essai des grandes machines sur le site et sur modèle incombe à la CEI, qui a préparé un certain nombre de codes dont un code d'essai sur modèle [1]. En 1966, le comité technique intéressé fonda un groupe de travail sous la présidence de l'auteur pour rassembler des informations à l'échelle mondiale, afin de voir quelle action pouvait être entreprise pour une meilleure normalisation des essais sur modèle.

Les renseignements furent collectés au moyen de deux questionnaires :

- l'un, adressé principalement aux sociétés de production et aux ingénieurs-conseils, concernait l'utilisation des caractéristiques d'essai sur modèle;
- le second concernait les caractéristiques réelles des plates-formes d'essai en service.

Environ 200 copies de chaque questionnaire furent expédiées. Les sociétés et ingénieurs-conseils de 19 nations envoyèrent 67 réponses au premier questionnaire et, en réponse au second, 32 compagnies de 18 nations envoyèrent des informations détaillées sur plus de 100 plates-formes d'essai.

Ces informations, qui ont donné lieu à un rapport d'ensemble présenté en juin 1970 à une réunion de la CEI à

Washington, sont données ci-après sous forme condensée. Elles ont permis en outre de proposer une relation entre les tailles de modèle et les chutes d'essai disponibles.

Utilisation des caractéristiques d'essai

Le questionnaire sur l'utilité des essais sur modèle s'appuie nécessairement sur des réponses subjectives. Une analyse statistique est donc impossible, mais un certain nombre de points apparaissent, dont le plus important est peut-être la demande de codes sur les méthodes de conduite et d'interprétation d'essais de vibrations et d'instabilité. Ce souci est dû aux problèmes associés à l'accroissement des puissances des machines et à la nécessité de les maîtriser au niveau du bureau d'étude. Ce travail est envisagé par la CEI, mais ne fait que débuter.

Les caractéristiques les plus usuelles des modèles, rendement et puissance, sont généralement connues à l'appel d'offres et dérivent ordinairement de modèles déjà en possession du Constructeur mais qui, bien que très voisins du projet proposé, ne lui sont pas géométriquement semblables. Ces renseignements sur les performances du modèle sont généralement considérés comme un appoint aux garanties et on n'utilise guère à ce stade de formule de majoration pour effet d'échelle.

Le contrat étant passé, on utilise beaucoup les caractéristiques d'essai sur modèle, en fonction du point de vue du client. Dans la plupart des cas, des essais complémentaires effectués sur un modèle conforme au prototype sont utilisés pour s'assurer que les garanties seront bien satisfaites lors des essais *in situ*. L'autre façon d'utiliser les essais sur modèle pour la vérification contractuelle des garanties données sur modèle est moins usuelle, mais les réponses au questionnaire montrent que cette pratique se répand de plus en plus.

Quand un modèle est utilisé pour les essais contractuels, il est nécessaire d'appliquer une majoration pour effet d'échelle. Presque toutes les organisations emploient différentes variantes des formules d'Ackeret [2], Moody [3] ou Hutton [4]. La pratique peut aller de la simple adoption des 2/3 de la valeur donnée par la formule de Moody à des méthodes plus élaborées, dans lesquelles la majoration est liée à la valeur relative du débit par rapport au débit au point nominal.

Les réponses font apparaître deux facteurs qui interdisent l'usage d'essais contractuels sur modèle. Ce sont d'une part l'incertitude qui subsiste sur la précision des formules de majoration, d'autre part le degré de similitude entre le modèle et le prototype que l'on doit exiger pour obtenir des résultats acceptables, en ce qui concerne l'inclinaison des pales par exemple.

Installations d'essai

Un des objectifs du questionnaire sur les installations d'essai était de déterminer jusqu'à quel point les méthodes de mesure autorisées par le code d'essai sur modèle sont utilisées en pratique. Quoi qu'il en soit, bien que sept

méthodes de mesure de la chute, huit méthodes pour le débit, quatre méthodes pour le couple et quatre méthodes pour la vitesse de rotation, soient autorisées, il n'apparaît pas que le code contienne des techniques redondantes. Toutes les méthodes autorisées sont employées si peu que ce soit, sauf une exception : l'emploi de deux réservoirs pour la mesure volumétrique du débit.

De toutes les méthodes de mesure de débit utilisées sur les plates-formes d'essai, 37 % sont faites par Venturi, 23 % par déversoir rectangulaire à mince paroi et 13 % par diaphragme. Le reste se répartit également entre les méthodes volumétrique et gravimétrique et les tuyères. Pour la chute, environ 20 % des mesures sont faites sur niveau libre, 33 % par manomètres à liquide et 20 % par manomètres à poids ou à membrane métallique. Les transducteurs sont de plus en plus utilisés pour la mesure de ce paramètre, mais le code ne donne encore aucune prescription à leur sujet. Pour la puissance, environ 90 % des mesures sont faites en combinant la mesure du couple par poids et la mesure de la vitesse de rotation par système électro-nique.

Les divers diamètres de roue et hauteurs de chute d'essai figurent dans les histogrammes des figures 1 à 5, où l'on voit qu'une certaine préférence est donnée aux diamètres de 300 mm et 500 mm environ. Les réponses montrent également qu'une définition unique du diamètre de roue n'est pas encore admise. Pour les machines Francis, on ne trouve pas moins de six définitions d'usage courant et cela peut être dû au fait que le code d'essai n'en contient aucune.

Précision des installations d'essai

Les précisions totales publiées des mesures de rendement des plates-formes de turbines et de pompes figurent respectivement sur les figures 6 et 7. On voit que dans les deux cas la plupart des réponses donnent une précision de $\pm 0,4$ % environ. Mais beaucoup de laboratoires ont plus d'une plate-forme d'essai et il n'est pas nécessaire qu'elles soient toutes capables du plus haut degré de précision. La meilleure plate-forme de chaque laboratoire figure dans ces histogrammes comme une indication de la meilleure précision couramment atteinte.

La précision totale est, évidemment, la résultante des précisions de mesure des autres paramètres, particulièrement du débit et de la chute. La répartition des précisions publiées pour les diverses méthodes de mesure de débit est donnée dans les tables 1 et 2 pour les plates-formes d'essai de turbines et de pompes. Les points les plus remarquables sont la popularité du Venturi et du déversoir rectangulaire à mince paroi, ainsi qu'une précision moins sévère demandée aux plates-formes d'essai de pompes.

La mesure de la chute n'a pas la même étendue de précision, comme on peut le voir sur la table 3, dans les plates-formes où la principale méthode utilise un manomètre à liquide connecté à des prises de pression statiques.

Pour établir ces figures et ces tables on a noté séparément l'emploi sur une plate-forme de différentes méthodes de mesure des paramètres ce qui explique les légères différences dans le nombre total apparent des plates-formes.

Nombres de Reynolds normalisés

Nous avons vu qu'il y a une grande variété dans la pratique des essais de turbine. La normalisation de la taille des modèles et des chutes d'essai ne serait pas possible sans imposer des conditions arbitraires auxquelles beaucoup de plates-formes ne pourraient se conformer.

Une autre solution est l'emploi d'une valeur normalisée du nombre de Reynolds, puisqu'il est la base de beaucoup de formules de majoration, y compris Ackeret et Hutton, et de la plupart de leurs variantes. Si ceci était reconnu acceptable, différentes tailles de modèle seraient essayées au même nombre de Reynolds et auraient donc les mêmes corrections d'effet d'échelle. Superficiellement au moins, une telle relation entre les plates-formes d'essai semble possible, puisqu'il semble y avoir une relation inverse entre la taille des modèles et les chutes d'essai.

Dans le vrai nombre de Reynolds, $D\sqrt{2gH}/\nu$, la viscosité cinématique ν peut être négligée dans le cas de cette étude et nous pouvons ne considérer qu'un pseudo nombre de Reynolds $D\sqrt{H}$ où D est le diamètre de la roue du modèle et H la chute d'essai.

Les informations obtenues par le questionnaire ne comprennent pas seulement le diamètre de la roue, mais aussi les chutes maximale et minimale de fonctionnement de la plate-forme. Les valeurs maximale et minimale de $D\sqrt{H}$ sont données sur la table 4 en fonction du diamètre de roue pour les plates-formes d'essai de turbine Kaplan.

Malheureusement, toutes les plates-formes n'atteignent pas la même valeur de ce pseudo nombre de Reynolds, et la sélection d'une valeur convenable peut seulement être le résultat d'un compromis (c'est également vrai pour les plates-formes d'essai de turbines Francis, pour lesquelles nous ne donnons pas de valeurs). Quelles que soient les valeurs sélectionnées, elles seront hors de l'étendue normale d'au moins quelques plates-formes, mais les difficultés de réaliser la valeur requise dépendront de l'exacte interprétation des questions posées par les laboratoires et du degré de conservatisme des réponses qui y seront apportées. En suggérant une valeur normalisée de $D\sqrt{H}$, il est probablement plus acceptable pour un laboratoire d'augmenter sa valeur habituelle de $D\sqrt{H}$ que de la

diminuer. Ceci suppose qu'une valeur de $D\sqrt{H}$ doit être choisie au-dessus de la moyenne des valeurs possibles.

Basées sur ce point de vue plutôt subjectif, des valeurs acceptables pour essais normalisés de modèles pourraient être :

- turbines Kaplan $D\sqrt{H} = 1,0 \text{ m}^{3/2}$;
- turbines Francis $D\sqrt{H} = 1,3 \text{ m}^{3/2}$.

L'adoption de ces valeurs, ou de valeurs similaires, pour le pseudo nombre de Reynolds dépendrait, non d'un traitement statistique des données actuellement disponibles, mais de facteurs pratiques tels que les pertes de charge du circuit, la puissance de la pompe et la stabilité hydraulique propres à chaque plate-forme d'essai. Une valeur universellement acceptée pourrait être déterminée après enquête auprès des exploitants de plate-forme d'essais.

Remerciements

La coopération de toutes les organisations qui établissent les questionnaires est appréciée avec reconnaissance, ainsi que le travail des membres du groupe de travail du Comité Technique n° 4 de la CEI qui classèrent et répertorièrent les informations venues d'un grand nombre de pays.

Cette note est publiée avec l'autorisation de la Commission Electrotechnique Internationale et du Directeur du National Engineering Laboratory, East Kilbride, Glasgow.

Références

- [1] Code international d'essais de réception sur modèle des turbines hydrauliques. CEI Publication 193, 1^{re} édition, Genève : Commission Electrotechnique Internationale, 1965.
- [2] Cité dans MUEHLEMANN (E.): « Zur Aufwertung des Wirkungsgrades von Ueberdruckwasserturbinen ». *Schweizerische Bauzeitung*, 1948, 66 (24), 331-333.
- [3] MOODY (L.F.). — "Efficiency and power step-up." *Proceedings of the A.S.C.E.*, 1939, 65, 1584.
- [4] HUTTON (S.P.). — "Component losses in Kaplan turbines and the prediction of efficiency from model test." *Proceedings Inst. mech. Engrs*, London, 1954, 168 (28), 743-762.

Table 1

Fréquence de la précision publiée sur la mesure du débit sur plates-formes d'essai de turbines

MÉTHODE	LIMITE DE LA PRÉCISION EN %							
	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,75
Volumétrique	1	1	2	—	1	—	—	—
Gravimétrique	1	1	1	1	—	—	—	—
Ecran mobile	1	—	—	—	1	—	—	—
Déversoir rectangulaire	1	6	3	2	3	2	1	—
Venturi	7	8	10	3	1	3	2	1
Diaphragme	1	—	1	—	1	1	1	1
Tuyère	1	1	1	—	—	—	—	—
Divers	—	1	1	—	—	—	1	—

Table 2 *Fréquence de la précision publiée sur la mesure du débit sur plates-formes d'essai de pompes*

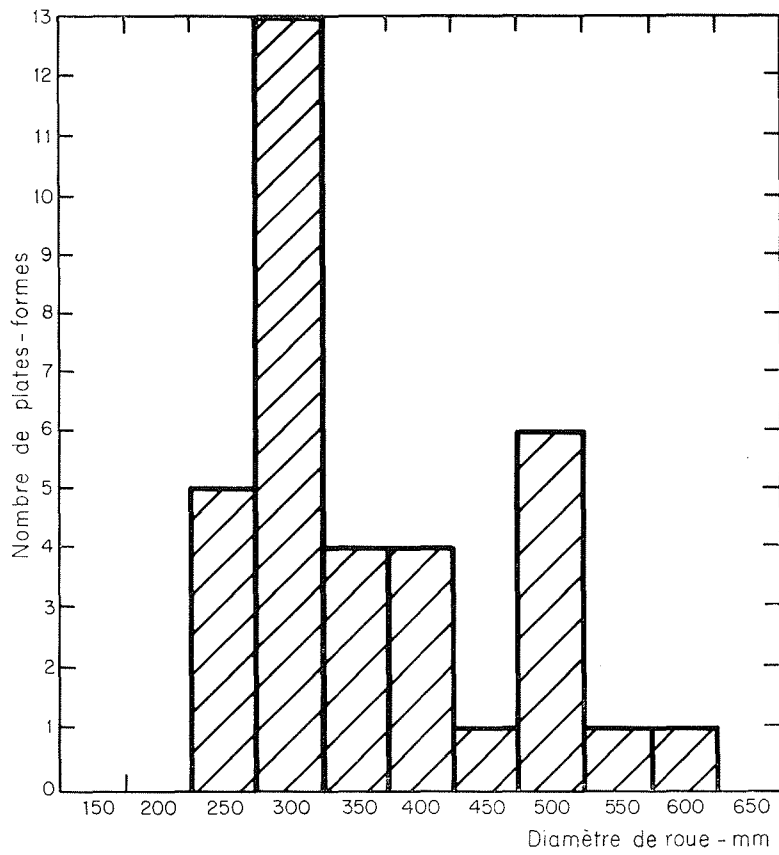
MÉTHODE	LIMITE DE LA PRÉCISION EN %								
	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	1	1,5
Volumétrique	—	—	—	—	—	—	1	—	—
Gravimétrique	—	1	—	1	—	—	—	—	—
Déversoir rectangulaire	—	3	1	1	—	—	1	—	—
Venturi	1	—	3	2	—	1	1	1	—
Diaphragme	3	2	—	1	—	—	—	—	1
Tuyère	3	—	—	—	—	—	—	—	—
Divers	—	2	—	—	—	—	—	—	—

Table 3 *Fréquence de la précision publiée sur la mesure de la chute sur plates-formes d'essai de turbines*

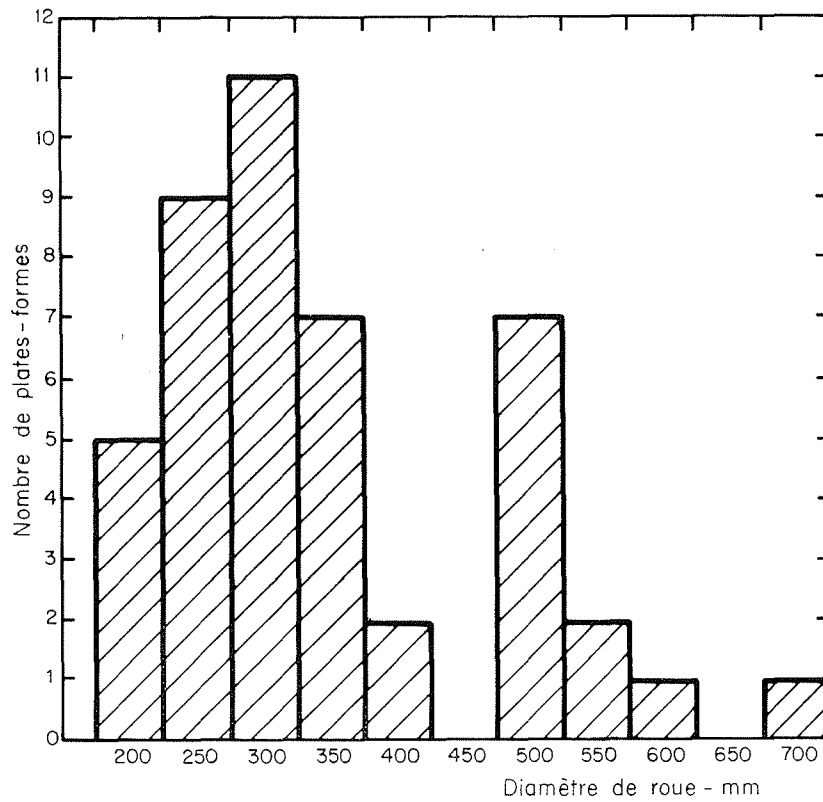
MÉTHODE		LIMITE DE LA PRÉCISION EN %					
		0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
Niveau libre	Pointe droite ou recourbée	2	3	—	—	1	—
	Flotteur	5	4	—	—	—	—
	Manomètre à liquide	1	8	—	1	—	1
Pression statique	Manomètre à liquide	6	23	2	7	1	—
	Manomètre à poids	—	5	2	1	—	—
	Balance de pression	1	1	—	—	—	—
	Manomètre à membrane	—	6	—	3	1	—
	Divers	1	8	2	—	—	—

Table 4 *Valeurs minimale et maximale du pseudo nombre de Reynolds sur plates-formes d'essai de turbines Kaplan et hélice*

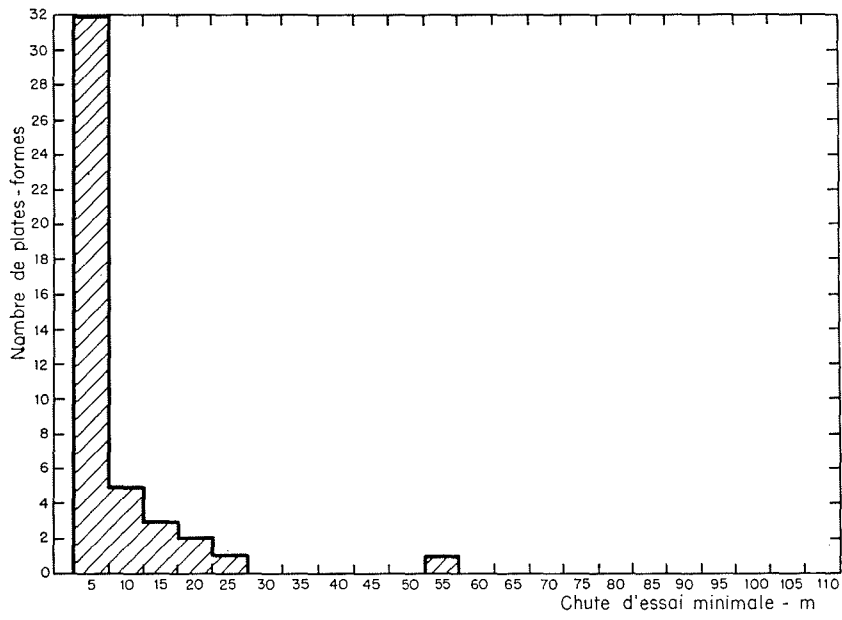
DIAMÈTRE DE ROUE D (m)	PSEUDO NOMBRE DE REYNOLDS $D\sqrt{H}$ (m ^{3/2})		DIAMÈTRE DE ROUE D (m)	PSEUDO NOMBRE DE REYNOLDS $D\sqrt{H}$ (m ^{3/2})	
	Minimum	Maximum		Minimum	Maximum
0,200	0,63	1,55	0,350	0,70	1,36
0,250	0,79	2,50	0,350	1,36	3,13
0,254	—	0,70	0,350	1,57	2,47
0,257	0,81	1,82	0,350	1,75	2,35
0,262	1,01	2,19	0,350	1,92	3,13
0,265	0,53	1,09	0,360	1,60	3,60
0,280	0,48	0,79	0,400	0,49	0,89
0,280	0,48	1,05	0,400	0,57	2,68
0,280	1,98	2,38	0,400	1,26	4,00
0,300	0,60	2,85	0,406	0,55	0,70
0,300	0,90	2,01	0,406	0,91	2,96
0,305	—	1,58	0,415	0,93	3,02
0,305	—	1,58	0,425	0,60	0,85
0,305	—	2,91	0,425	0,60	1,34
0,305	—	3,15	0,460	0,56	0,98
0,305	0,37	1,30	0,500	0,35	1,41
0,305	0,43	0,96	0,500	0,61	1,12
0,305	0,61	1,67	0,500	0,61	1,58
0,308	0,49	0,97	0,500	1,00	1,00
0,308	1,19	2,84	0,500	1,00	2,34
0,340	—	1,52	0,500	1,04	1,06
0,340	0,34	4,30	0,530	0,75	0,99
0,340	0,68	1,18	0,550	—	2,13
0,340	0,68	3,72	0,600	1,04	1,59
0,340	0,76	3,40	0,616	0,80	0,97
0,350	0,70	0,81	0,720	0,97	1,53



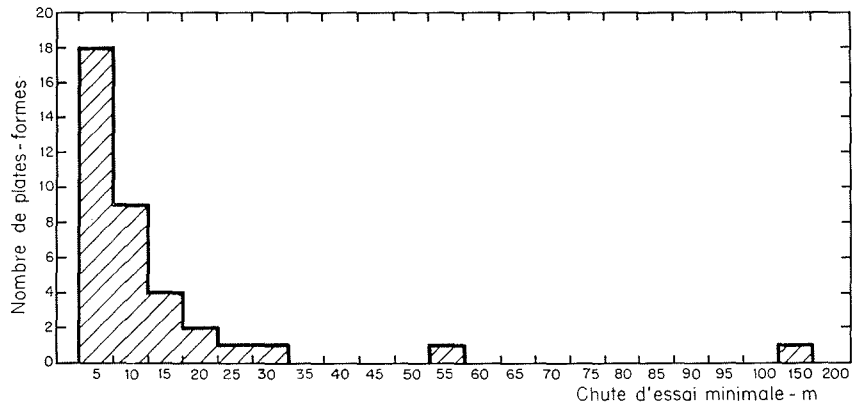
1/ Fréquence des diamètres des roues Kaplan et hélice.



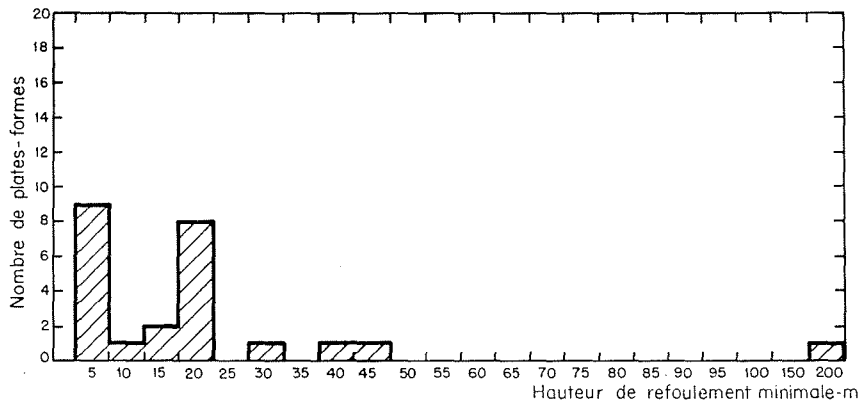
2/ Fréquence des diamètres des roues Francis.



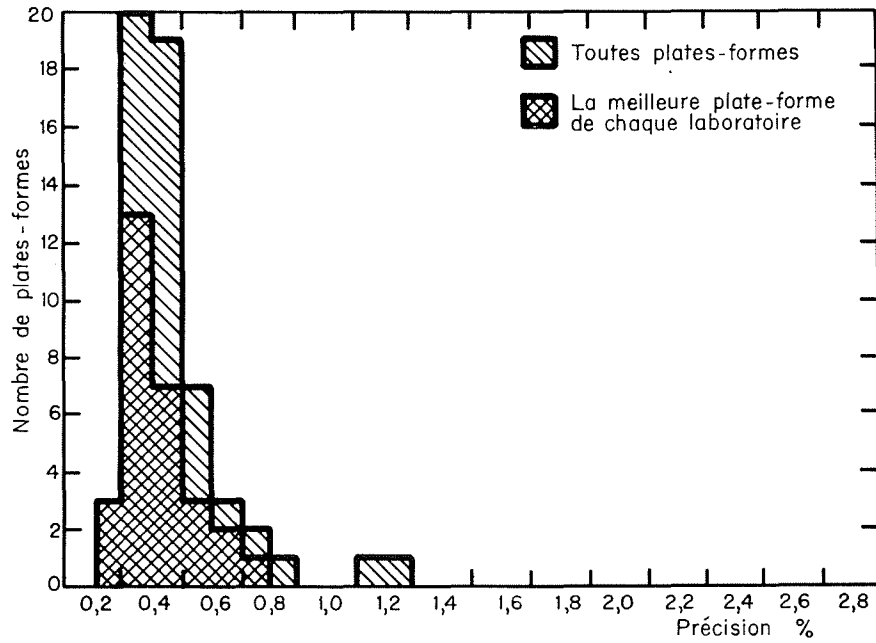
3/ Chute d'essai minimale pour turbines Kaplan et hélice.



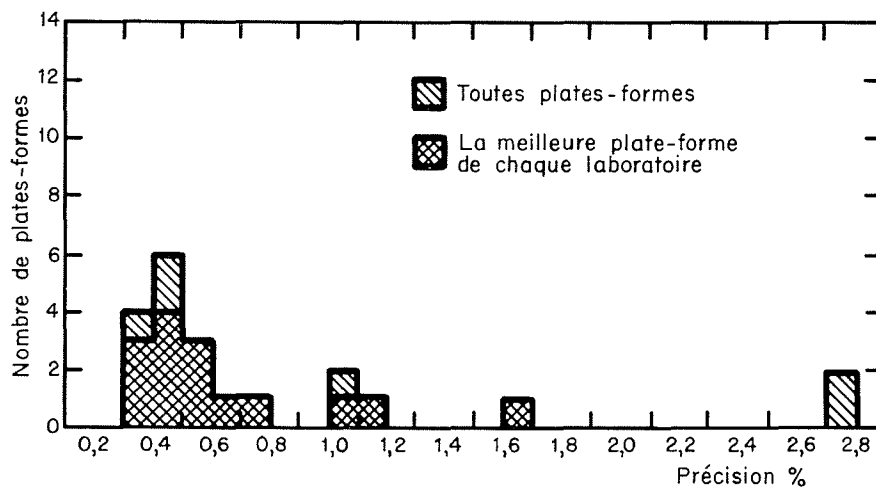
4/ Chute d'essai minimale pour turbines Francis.



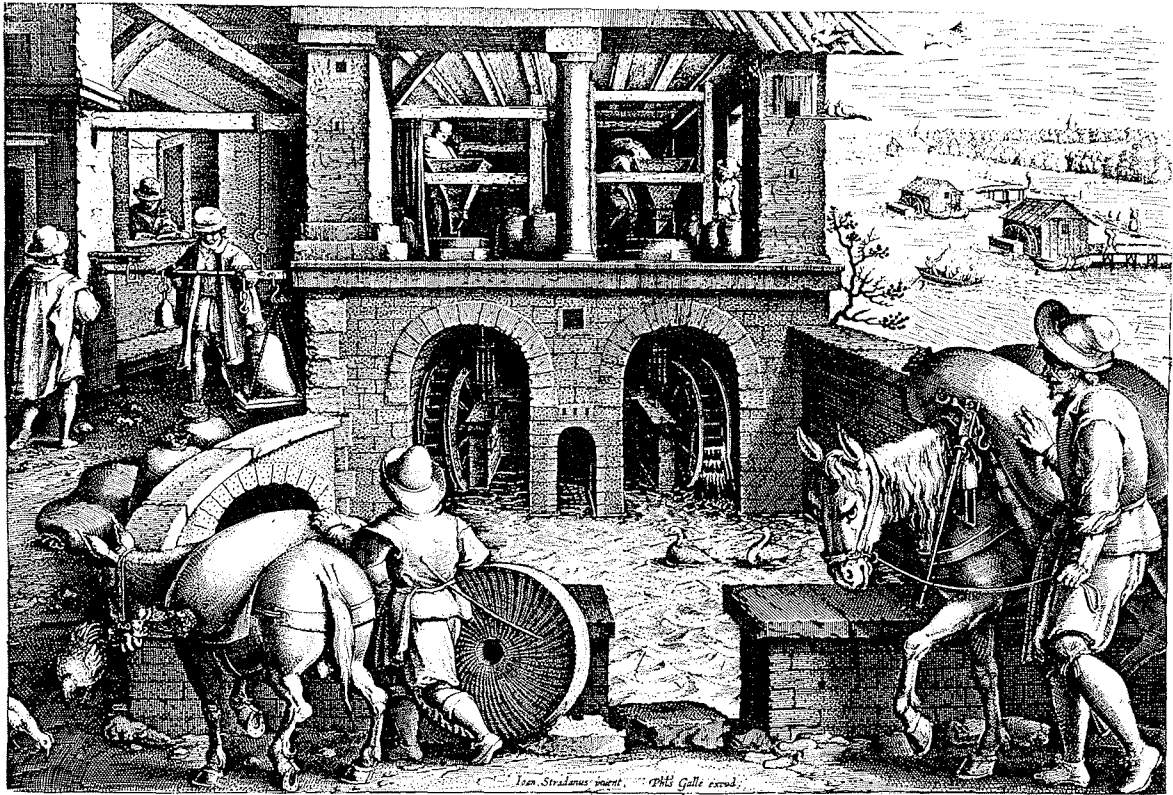
5/ Hauteur de refoulement minimale pour plates-formes de pompes.



6/ Précision publiée sur la mesure du rendement sur plates-formes d'essai de turbines.



7/ Précision publiée sur la mesure du rendement sur plates-formes d'essai de pompes.



10.

1620 Stralonus inuent. 1741 Galle excudit.
MOLA AQUARIA.

Aquarias quisquis molas antiquitus Putat repertas, tota aberrat is via.