

Introduction

Les essais que nous allons relater ont eu pour cadre la Station d'Essais de Pompes d'Electricité de France à Chatou. La mesure des débits y est effectuée habituellement à l'aide d'un écran mobile en canal; celui-ci se terminant par un déversoir rectangulaire, il y a là un premier moyen possible de recouplement. Nous avons en outre profité de la proximité immédiate d'une station de tarage de débitmètres, où le débit est mesuré par pesée, pour obtenir un deuxième mode de comparaison. Enfin, l'interposition d'un diaphragme *vena contracta* nous a fourni un troisième recouplement.

Comme nous allons le voir en passant en revue ces diverses méthodes, toutes les mesures ont été faites en parfaite conformité avec les prescriptions des différentes normes ou codes d'essai en vigueur.

Mesures par écran mobile

Description de l'installation.

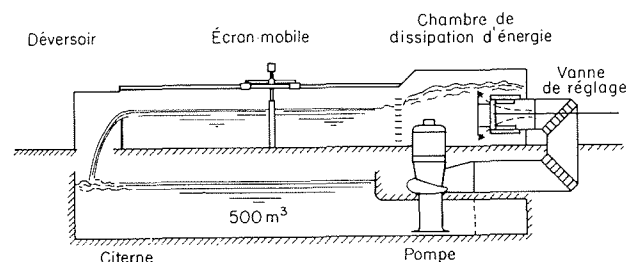
L'eau est amenée au canal de mesure par l'intermédiaire d'une vanne brise-charge à jet creux suivie d'une chambre de dissipation d'énergie et d'un tranquilliseur (fig. 1). Le canal a une longueur de 20 m et une largeur de 2,50 m et il se termine à l'aval par un déversoir en mince paroi, de 1 m de hauteur de pelle, sur lequel nous reviendrons plus loin.

Le long de ce canal se déplace un écran (fig. 2) constitué par une tôle mince nervurée et porté par un chariot glissant sur deux rails cylindriques grâce à quatre patins hydrostatiques à huile [1]; ce dispositif présente l'avantage d'avoir un coefficient de frottement très faible et remarquablement constant.

La vitesse moyenne de l'écoulement est obtenue en mesurant la durée de la course de l'écran sur une base de 10 m de longueur, à l'aide d'un spot lumineux porté par le chariot qui, en passant sur deux photo-diodes, déclenche et arrête un chronomètre électronique.

Le tirant d'eau dans le canal peut être lu sur dix tubes piézométriques reliés à cinq prises de pression en paroi sur chaque rive, réparties le long de la course utile de l'écran.

La gamme de mesure de cette installation s'étend de 0,15 à 3 m³/s, ce qui correspond à des tirants d'eau de 1,10 à 1,72 m environ et à des vitesses dans le canal de 0,05 à 0,70 m/s.



1/ Schéma du circuit de la station d'essai de pompes.
Diagrammatic pump test circuit.

* E.D.F., Direction des Etudes et Recherches, Chatou.

terie spéciale permet de déverser dans celle-ci l'eau contenue dans la bascule et donc de comparer périodiquement les indications obtenues par ces deux installations, qui ont par ailleurs été toutes deux étalonnées par le Service des Instruments de Mesure du Ministère de l'Industrie.

L'écart relatif $(V_C - V_B)/V_B$ des volumes mesurés par la capacité, V_C , et par la bascule, V_B , a pour valeur moyenne $-0,1\%$ avec une dispersion caractérisée par un écart-type de $0,1\%$, ce qui met en évidence l'excellent accord de ces deux méthodes absolues.

Mesures comparatives avec l'écran mobile.

Outre la difficulté due au fait que les gammes de mesure de la bascule et de l'écran mobile ne se recouvrent que très partiellement, une comparaison directe était impossible par le schéma même des deux installations.

Pour tourner cet obstacle, nous avons établi le circuit représenté par la figure 5, permettant d'alimenter, à partir du bac à niveau constant, tantôt la bascule et tantôt l'écran mobile, et c'est par l'intermédiaire d'un tube de Venturi que nous avons comparé les deux méthodes. Cet appareil, utilisé en permanence comme contrôle du débit de la Station de Tarage, est réalisé en tôle roulée soudée et est en tous points conforme, tant pour son exécution que pour ses conditions d'installation, aux spécifications des normes en vigueur [3] [4].

Les mesures se sont donc déroulées en trois phases :

1^{re} phase : Vanne 1 ouverte, vanne 2 fermée, étalonnage du tube de Venturi par pesée;

2^e phase : Vanne 1 fermée, vanne 2 ouverte, mesures simultanées au tube de Venturi et à l'écran mobile;

3^e phase : identique à la première phase, réétalonnage du tube de Venturi.

Il n'y a pas eu d'écart appréciable entre les deux étalonnages, qui conduisent à un coefficient de décharge $C = 0,976$, l'écart-type des points expérimentaux étant de $0,15\%$; cette valeur est en bon accord avec celle de $0,985 \pm 0,015$ indiquée par les normes pour un tube de Venturi de ce type.

Sur neuf points d'essai qui malheureusement ne pouvaient s'échelonner qu'entre 170 et 225 l/s, l'écart relatif $(Q_E - Q_B)/Q_B$ des débits mesurés par l'écran mobile, Q_E , et par la bascule (par l'intermédiaire du tube de Venturi), Q_B , a pour valeur moyenne $+0,15\%$ avec une dispersion caractérisée par un écart-type inférieur à $0,05\%$. Ici encore, l'accord entre les deux méthodes se révèle donc remarquable.

Mesures par diaphragme

Description du dispositif.

Sur le circuit spécial précédemment décrit (voir fig. 5), nous avons en outre interposé un diaphragme avec prises de pression à la *vena contracta*

dont les caractéristiques essentielles étaient les suivantes :

- diamètre de la tuyauterie $D = 350,95 \text{ mm}$
- rapport des diamètres $\beta = 0,456$
- nombre de Reynolds $R_D = 620\ 000$ à $830\ 000$
- longueur droite amont $L = 12,5 \text{ m}$

Tant par sa réalisation que par ses conditions d'installation et de fonctionnement, ce diaphragme satisfaisait donc pleinement aux prescriptions des normes [4] [5] dont l'application conduit à un coefficient de débit $\alpha = 0,6122$ avec un écart-type sur celui-ci de $0,25\%$.

La pression différentielle engendrée était mesurée à l'aide d'un manomètre air-eau et se traduisait, aux débits considérés, par une dénivellation de l'ordre de 1 à 1,70 m.

Mesures comparatives.

Pour les mêmes débits que précédemment, l'écart relatif $(Q_D - Q_E)/Q_E$ des débits mesurés par le diaphragme, Q_D , et par l'écran mobile, Q_E , a pour valeur moyenne $-0,65\%$ avec une dispersion caractérisée par un écart-type de $0,15\%$. Bien que plus élevé que les écarts observés entre les autres méthodes, cet écart reste parfaitement compatible avec les erreurs à craindre sur chacune des deux mesures.

Mesures par déversoir

Description de l'installation.

Comme il a été dit au chapitre premier, le canal de l'écran mobile se termine par un déversoir rectangulaire en mince paroi, sans contraction latérale, dont les principales caractéristiques géométriques sont les suivantes :

- largeur $b = 2\ 501,5 \text{ mm}$
- hauteur de pelle $p = 1\ 004,9 \text{ mm} \pm 0,4 \text{ mm}$
- longueur d'approche $L = 20 \text{ m}$
- hauteur de lame : $0,10 < h < 0,72 \text{ m}$ pour $0,15 < Q < 3 \text{ m}^3/\text{s}$

En outre, la hauteur de lame est mesurée par des prises de pression en paroi situées, sur chaque rive, à 3,50 m à l'amont du déversoir, et des dispositions sont prises pour assurer l'aération de la lame. Quant à la crête du déversoir, elle est constituée par une partie plane horizontale de 4 mm de largeur et par un chanfrein à 45° , avec une épaisseur totale de 12 mm.

Mise à part cette épaisseur un peu forte de la crête, toutes les dispositions constructives et les conditions d'utilisation du déversoir se trouvent donc conformes aux prescriptions des normes en vigueur ou en préparation [2] [6] et on se trouve en droit d'appliquer toutes les formules usuelles préconisées dans ces normes, que nous rappelons ci-dessous, ainsi que la formule récemment proposée à la suite notamment de travaux effectués à l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse [7].

Dans les conditions qui nous occupent, ces différentes formules s'écrivent :

FORMULE DE BAZIN (1898) :

$$Q = \left(0,405 + \frac{0,003}{h} \right) \left[1 + 0,55 \left(\frac{h}{h+p} \right)^2 \right] \sqrt{2g} b h^{3/2}$$

FORMULE DE LA S.I.A. (1924) :

$$Q = 0,410 \left(1 + \frac{10^{-3}}{h + 0,0016} \right) \times \left[1 + 0,5 \left(\frac{h}{h+p} \right)^2 \right] \sqrt{2g} b h^{3/2}$$

FORMULE DE REHBOCK (1929) :

$$Q = \left(0,4023 + 0,0542 \frac{h}{p} \right) \sqrt{2g} b (h + 0,0011)^{3/2}$$

FORMULE DE KINDSVATER-CARTER (1959) :

$$Q = \left(0,4013 + 0,0500 \frac{h}{p} \right) \sqrt{2g} (b - 0,001) (h + 0,0010)^{3/2}$$

FORMULE DE TOULOUSE (1967) :

$$Q = \left(0,4180 + 0,0120 \frac{h + v^2/2g}{p} \right) \sqrt{2g} b \left(h + \frac{v^2}{2g} \right)^{3/2}$$

Mesures comparatives.

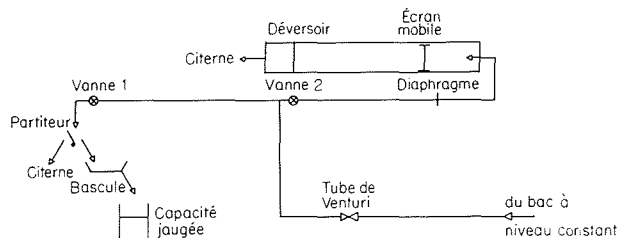
Le tableau ci-contre rassemble des résultats empruntés aux essais de cinq pompes différentes, s'échelonnant sur environ trois ans et couvrant une gamme de débits de 0,15 à 2,2 m³/s. Il présente, outre la hauteur de lame *h* et le débit mesuré par l'écran *Q_E*, les valeurs *Q_{Di}* du débit mesuré par le déversoir et calculé par chacune des formules ci-dessus et les écarts relatifs $\epsilon_{Di} = (Q_{Di} - Q_E) / Q_E$ correspondants.

La figure 6 représente, à titre d'exemple, les écarts obtenus en appliquant l'une de ces formules, celle de Toulouse. La dispersion des points autour de la courbe moyenne est caractérisée par un écart-type de 0,25 %.

Sur la figure 7 sont reportés, en prenant comme référence le débit mesuré par l'écran mobile, les écarts obtenus avec les différentes méthodes que nous avons passées en revue (pesée, capacité, diaphragme) et ceux auxquels conduisent les cinq formules proposées pour le déversoir.

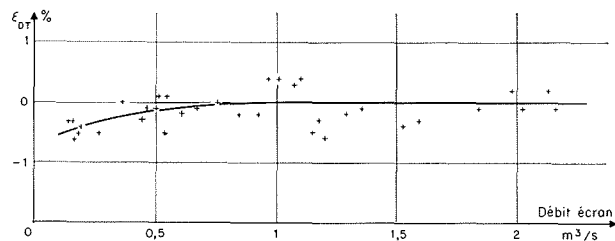
Les formules de la S.I.A., de Rehbock et de Kindsvater donnent des résultats qui s'échelonnent dans cet ordre entre - 1 et - 2,4 % environ. La formule de Bazin, que l'on considère souvent comme excessivement optimiste, fournit au contraire des résultats assez satisfaisants et ne conduit à des écarts supérieurs à + 1 % (mais qui croissent alors très rapidement) que pour des hauteurs de lame inférieures à 0,15 m. La formule de Toulouse est celle qui dans le cas présent donne les meilleurs résultats; on peut être tenté d'attribuer ceci au fait que les autres formules ne tiennent compte que très imparfaitement de la charge cinétique dans le canal d'approche, mais il faut cependant remarquer qu'elles ne sont pas plus satisfaisantes aux faibles débits où pourtant cette charge cinétique devient négligeable.

Parmi les facteurs susceptibles d'expliquer ces divergences, il en est deux, l'épaisseur de la crête

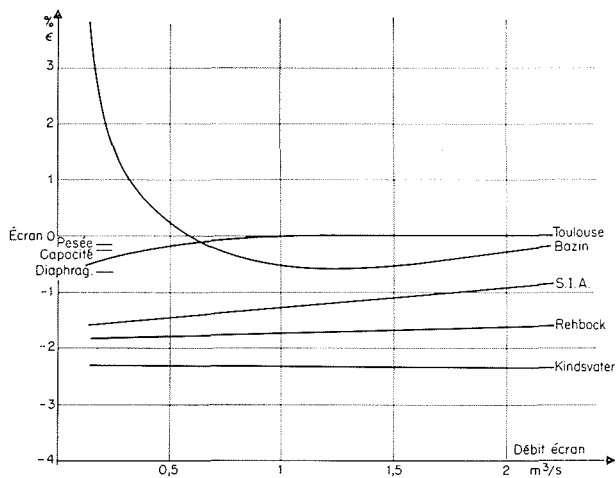


5/ Schéma de mesures comparatives. Comparative measurement diagram.

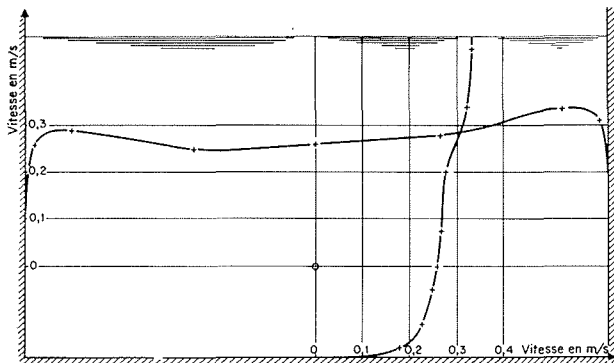
| Débit écran | Hauteur de lame | Débit déversoir, en m ³ /s | | | | | Ecart relatif, en % | | | | |
|-------------|-----------------|---------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | Q _{DB} | Q _{DS} | Q _{DR} | Q _{DK} | Q _{DT} | ε _{DB} | ε _{DS} | ε _{DR} | ε _{DK} | ε _{DT} |
| 0,1458 | 0,0992 | 0,1512 | 0,1437 | 0,1435 | 0,1426 | 0,1453 | + 3,7 | - 1,4 | - 1,6 | - 2,2 | - 0,3 |
| 0,1577 | 0,1044 | 0,1628 | 0,1553 | 0,1549 | 0,1542 | 0,1572 | + 3,2 | - 1,5 | - 1,2 | - 1,2 | - 0,3 |
| 0,1663 | 0,1080 | 0,1711 | 0,1637 | 0,1629 | 0,1622 | 0,1654 | + 2,9 | - 1,6 | - 2,0 | - 2,5 | - 0,6 |
| 0,1883 | 0,1174 | 0,1929 | 0,1851 | 0,1847 | 0,1839 | 0,1874 | + 2,4 | - 1,7 | - 1,9 | - 2,3 | - 0,5 |
| 0,1940 | 0,1198 | 0,1938 | 0,1911 | 0,1904 | 0,1895 | 0,1932 | + 2,5 | - 1,5 | - 1,9 | - 2,3 | - 0,4 |
| 0,2685 | 0,1436 | 0,2720 | 0,2645 | 0,2635 | 0,2625 | 0,2675 | + 1,3 | - 1,6 | - 1,9 | - 2,3 | - 0,5 |
| 0,3620 | 0,1814 | 0,3650 | 0,3570 | 0,3560 | 0,3545 | 0,3620 | + 0,8 | - 1,4 | - 1,7 | - 2,1 | 0 |
| 0,4420 | 0,2064 | 0,4430 | 0,4345 | 0,4330 | 0,4310 | 0,4405 | + 0,2 | - 1,7 | - 2,0 | - 2,5 | - 0,3 |
| 0,4580 | 0,2148 | 0,4700 | 0,4615 | 0,4600 | 0,4575 | 0,4675 | + 0,4 | - 1,4 | - 1,7 | - 2,2 | - 0,1 |
| 0,5000 | 0,2243 | 0,5015 | 0,4935 | 0,4915 | 0,4895 | 0,4995 | + 0,3 | - 1,3 | - 1,7 | - 2,1 | - 0,1 |
| 0,5115 | 0,2278 | 0,5130 | 0,5060 | 0,5030 | 0,5010 | 0,5120 | + 0,3 | - 1,1 | - 1,7 | - 2,0 | + 0,1 |
| 0,5330 | 0,2333 | 0,5320 | 0,5230 | 0,5215 | 0,5190 | 0,5305 | - 0,2 | - 1,9 | - 2,1 | - 2,6 | - 0,5 |
| 0,5460 | 0,2379 | 0,5400 | 0,5305 | 0,5275 | 0,5265 | 0,5465 | + 0,4 | - 1,2 | - 1,6 | - 2,1 | + 0,1 |
| 0,6040 | 0,2536 | 0,6030 | 0,5940 | 0,5925 | 0,5890 | 0,6025 | - 0,2 | - 1,6 | - 1,9 | - 2,5 | - 0,2 |
| 0,6705 | 0,2718 | 0,6700 | 0,6605 | 0,6585 | 0,6550 | 0,6700 | - 0,1 | - 1,5 | - 1,7 | - 2,3 | - 0,1 |
| 0,7555 | 0,2941 | 0,7540 | 0,7455 | 0,7435 | 0,7385 | 0,7555 | - 0,2 | - 1,3 | - 1,6 | - 2,2 | 0 |
| 0,8450 | 0,3159 | 0,8415 | 0,8325 | 0,8295 | 0,8245 | 0,8435 | - 0,4 | - 1,5 | - 1,8 | - 2,4 | - 0,2 |
| 0,9780 | 0,3358 | 0,9235 | 0,9145 | 0,9110 | 0,9055 | 0,9265 | - 0,5 | - 1,7 | - 1,8 | - 2,4 | - 0,2 |
| 0,9610 | 0,3448 | 0,9620 | 0,9530 | 0,9485 | 0,9430 | 0,9650 | + 0,1 | - 0,8 | - 1,3 | - 1,9 | + 0,4 |
| 1,004 | 0,3550 | 1,005 | 0,997 | 0,993 | 0,985 | 1,008 | + 0,1 | - 0,7 | - 1,1 | - 1,9 | + 0,4 |
| 1,071 | 0,3698 | 1,069 | 1,062 | 1,057 | 1,051 | 1,074 | - 0,2 | - 0,8 | - 1,3 | - 1,9 | + 0,3 |
| 1,099 | 0,3762 | 1,099 | 1,090 | 1,086 | 1,079 | 1,103 | 0 | - 0,3 | - 1,2 | - 1,9 | + 0,4 |
| 1,146 | 0,3843 | 1,135 | 1,126 | 1,122 | 1,114 | 1,140 | - 1,0 | - 1,7 | - 2,1 | - 2,8 | - 0,5 |
| 1,172 | 0,3906 | 1,164 | 1,155 | 1,150 | 1,142 | 1,169 | - 0,7 | - 1,5 | - 1,9 | - 2,6 | - 0,3 |
| 1,199 | 0,3955 | 1,137 | 1,170 | 1,172 | 1,165 | 1,192 | - 1,0 | - 1,7 | - 2,2 | - 2,0 | - 0,6 |
| 1,289 | 0,4157 | 1,282 | 1,272 | 1,266 | 1,258 | 1,287 | - 0,5 | - 1,3 | - 1,8 | - 2,4 | - 0,2 |
| 1,352 | 0,4290 | 1,346 | 1,337 | 1,330 | 1,321 | 1,351 | - 0,4 | - 1,1 | - 1,6 | - 2,3 | - 0,1 |
| 1,526 | 0,4627 | 1,513 | 1,504 | 1,496 | 1,485 | 1,520 | - 0,9 | - 1,5 | - 2,0 | - 2,7 | - 0,4 |
| 1,594 | 0,4763 | 1,503 | 1,574 | 1,564 | 1,554 | 1,590 | - 0,7 | - 1,3 | - 1,9 | - 2,5 | - 0,3 |
| 1,844 | 0,5237 | 1,837 | 1,826 | 1,813 | 1,800 | 1,843 | - 0,2 | - 1,0 | - 1,7 | - 2,4 | - 0,1 |
| 1,982 | 0,5492 | 1,977 | 1,967 | 1,954 | 1,939 | 1,985 | - 0,3 | - 0,3 | - 1,4 | - 2,2 | + 0,2 |
| 2,026 | 0,5562 | 2,017 | 2,007 | 1,993 | 1,975 | 2,024 | - 0,4 | - 0,9 | - 1,6 | - 2,5 | - 0,1 |
| 2,133 | 0,5757 | 2,130 | 2,120 | 2,103 | 2,086 | 2,137 | - 0,1 | - 0,6 | - 1,4 | - 2,2 | + 0,2 |
| 2,159 | 0,5792 | 2,152 | 2,139 | 2,123 | 2,105 | 2,157 | - 0,3 | - 0,9 | - 1,7 | - 2,4 | - 0,1 |



6/ Ecart des mesures de débit par écran mobile et par déversoir (formule de Toulouse). Mobile screen and weir discharge measurement error (Toulouse formula).



7/ Résultats comparés des différentes méthodes de mesure du débit (la mesure par écran mobile étant prise comme référence).
Comparative results of various discharge measurement (referred to mobil screen data).



8/ Répartition des vitesses dans le canal sur une horizontale et sur une verticale.
Canal velocity distribution along one vertical and one horizontal.

et la répartition des vitesses dans le canal d'approche, dont plusieurs auteurs ont souligné l'influence. En ce qui concerne le premier, étudié en particulier par Jameson [8], une épaisseur anormalement grande peut, en diminuant la contraction de la nappe déversante, conduire à une augmentation du débit et expliquer ainsi à la fois les écarts que nous avons obtenus par rapport aux formules classiques et le bon accord avec la formule de Bazin, qui a fait ses expériences avec un déversoir dont la crête avait une épaisseur de 7 mm.

L'influence du second facteur est plus difficile à préciser; tous les codes d'essais exigent « un écoulement régulier » ou « une distribution normale des vitesses » mais sont impuissants à en donner une définition. Dans notre canal, l'alimentation par une vanne à jet creux entraîne, malgré les tranquillisateurs, un profil en travers des vitesses notablement concave (fig. 8) et, ce qui est peut-être le plus dangereux [9], une légère accélération des vitesses superficielles. Mais dans quelle mesure la répartition des vitesses relevée peut-elle être considérée comme anormale ?

Conclusion

Le but de ces quelques informations n'est évidemment pas de tenter d'établir la supériorité de telle ou telle formule de calcul du débit d'un déversoir, d'autant moins que nous sommes parfaitement conscient que les conclusions qui sembleraient se dégager de nos expériences pourraient parfaitement être inversées à l'occasion d'essais sur une autre installation (nous avons d'ailleurs tout récemment étalonné par pesée deux déversoirs rectangulaires pour lesquels les formules de la S.I.A. et de Rehbock donnaient des coefficients de débit tout à fait satisfaisants).

Notre propos était bien plutôt de souligner la difficulté de faire un choix entre diverses formules qui, même dans leur domaine commun d'utilisation, conduisent à des résultats sensiblement différents, et ce en fonction de critères dont il est bien difficile de faire l'inventaire et à plus forte raison d'établir l'influence. Il nous paraît donc illusoire, et nous rejoignons là l'opinion récemment exprimée par d'autres [10] de prétendre procéder à une mesure précise de débit (disons, pour fixer les idées, avec une erreur à craindre inférieure à $\pm 2\%$) en utilisant un déversoir non étalonné.

Il est par contre un autre aspect plus rassurant de nos observations : comme nous l'avons déjà signalé, les résultats présentés ci-dessus ont été recueillis durant une période d'environ trois ans; leur homogénéité très satisfaisante fait apparaître une excellente fidélité du déversoir rendant légitime l'utilisation de ce dispositif, après étalonnage, comme méthode secondaire de mesure.

Bibliographie

- [1] KERGOAT (A.). — Chariot à patins fluides. *Bulletin du Centre de Recherches et d'Essais de Chatou*, n° 3 (1963).
- [2] Code international concernant les essais de réception :
 - sur place des turbines hydrauliques. Publication 41 de la C.E.I. (1963);
 - sur modèle des turbines hydrauliques. Publication 193 de la C.E.I. (1965);
 - sur place des pompes d'accumulation. Publication 198 de la C.E.I. (1966);
 - sur modèle des pompes d'accumulation (à paraître).
- [3] Recommandation ISO/R 781, Mesure de débit des fluides au moyen de tubes de Venturi (juillet 1968).
- [4] NF X 10-102, Mesure de débit des fluides au moyen de diaphragmes, tuyères et tubes de Venturi (octobre 1968).
- [5] Recommandation ISO/R 541, Mesure de débit des fluides au moyen de diaphragmes et de tuyères (janvier 1967).
- [6] Projet de recommandation ISO 1438, Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts au moyen de déversoirs, déversoirs à échancrure et canaux jaugeurs à ressaut (août 1967).
- [7] BARBE (A.), BOYER (P.), COULOMB (R), MOREAU DE SAINT-MARTIN (J.) et NOUGARO (J.). — Loi hauteur-débit d'un déversoir en mince paroi, fonction de la charge totale \mathcal{H} et valable dans une large plage d'utilisation. *La Houille Blanche*, n° 3 (1967).
- [8] JAMESON (A.H.). — Flow over sharp-edged weirs; effect of thickness of crest. *Journal Institution of Civil Engineers*, vol. 31 (1948).
- [9] TISON (L.J.). — Cours d'hydraulique. Tome I, chapitre IV, Gand (1950).
- [10] CASTEX (L.). — Quelques nouveautés sur les déversoirs pour la mesure des débits. *La Houille Blanche*, n° 5 (1969).