

CONGRÈS NATIONAL
DE LA
NAVIGATION INTÉRIEURE
1928

SOUS LE HAUT PATRONAGE DU ROI
ET SOUS LE PATRONAGE DU GOUVERNEMENT.

BRUXELLES (PALAIS DES ACADÉMIES)
LES 3, 4, ET 5 NOVEMBRE 1928.

2^e SECTION : LE MATÉRIEL ET LA VOIE

RAPPORT

SUR LES

Dispositifs du sasement des écluses

PRÉSENTÉ PAR

M. F. CAMPUS

Professeur à l'Université de Liège



Secrétariat du Congrès :
90, Rue de la Loi, Bruxelles.

LES DISPOSITIFS DE SASSEMENT DES ECLUSES.

I. — INTRODUCTION.

L'évolution des conceptions relatives à la construction des écluses de navigation, au cours des dernières années, a été conditionnée principalement par les dispositifs utilisés pour le sassement. Des modifications plus visibles, telles que la substitution du béton armé à la maçonnerie massive pour les parois de l'ouvrage et l'emploi de portes levantes à vannes, segments ou cylindres, en sont presque toujours dérivées.

La disposition courante en Belgique est celle des aqueducs longitudinaux de section sensiblement rectangulaire, établis dans les bajoyers massifs et communiquant avec le sas par des larrons. Le mode d'obturation en faveur est là vanne levante à ouverture rapide. C'est le système appliqué aux ouvrages les plus récents du Haut-Escaut, de la Sambre et du canal de Clabecq à Bruxelles. Certains estiment que les larrons des deux faces ne doivent pas être en regard et qu'il est favorable de leur donner une forme de trompe, formant en quelque sorte diffuseur. Dans un ouvrage exceptionnel, l'écluse maritime du Kruisschans, ils ont reçu une forme très spéciale, comportant des étranglements et des espèces de chambres d'amortissement (Voir note de M. Bonnet, Annales de l'A. I. G., 1926, 4^e fasc.). A en juger d'après les traités classiques français les plus récents (Jacquinot et Galliot, Navigation intérieure, Canaux éd. 1922), l'état de la question est sensiblement le même en France qu'en Belgique.

Avant 1914, les aqueducs longitudinaux et les larrons constituaient aussi la règle dans les pays de l'Europe centrale. Outre les vannes plates, on y employait aussi les vannes à segments et cylindriques. Ce système a été pratiquement abandonné en Allemagne dans la plupart des ouvrages récents. Les inconvénients du dispositif précédent ont, à la suite de recherches actives, provoqué le retour à d'anciennes solutions, moyennant certaines dispositions appropriées. Il s'agit surtout d'aqueducs courts dans les têtes, mais aussi de ventelles et même du sassement par l'ouvertures des portes. Cette évolution rapide a été rendue possible par deux

circonstances d'ailleurs connexes : la faveur dont jouissent les voies d'eau en Allemagne, suffisamment caractérisée par le gigantesque programme en voie d'exécution, et l'existence d'un grand nombre de laboratoires d'hydraulique fluviale, largement pourvus de personnel et de matériel. De nombreux pays voisins ont suivi cette voie : l'Autriche, la Tchéco-Slovaquie, la Suède, finalement les Pays-Bas, dont les ingénieurs ont eu recours à diverses reprises, dans les dernières années, aux laboratoires de Berlin (Voir note de M. Lacroix, A. T. P. B., 1928, fasc. 2). Actuellement un laboratoire est en voie de réalisation en Hollande.

II. — CRITIQUE DU SYSTEME ACTUEL.

Quels reproches peut-on faire aux aqueducs longitudinaux pourvus de larrons et de vannes ordinaires à ouverture rapide, du type classique. Tout d'abord, celui de ne pas réaliser une répartition régulière du débit tout le long du sas, ce qui est cependant son but. L'aqueduc étant de section constante, ainsi que les larrons, il est évident que le débit de ceux-ci doit décroître du premier au dernier. Pour assurer une répartition uniforme, il faudrait des larrons de section croissante d'amont en aval. Comme c'est l'inverse pour la vidange, on établit toujours les larrons de dimensions identiques. Il en résulte que, pratiquement, les larrons extrêmes fonctionnent les premiers et presque seuls. Cela a été mis en évidence expérimentalement à l'ancienne écluse d'Ymuiden (Voir Rapport de mission MM. Blockmans, Braeckman et Bonnet, A. T. P. B. 1927, fasc. 4). Donc, la majeure partie des aqueducs et des larrons sont inefficaces et le système fonctionne en réalité à peu près comme les aqueducs courts dans les têtes, auquel il avait été substitué.

Or, ces dispositions peu effectives sont par contre, très coûteuses. Je ne parle que pour mémoire des voûtements et revêtements en briques très dures ou en moellons, et des pierres de taille complexes qui servaient à la constitution des larrons. On aurait pu probablement s'en passer, puisqu'il n'y avait pas de débit, donc pas d'usure. Mais les cavités ménagées à la base des bajoyers les déforçaient précisément dans les sections dangeureuses et exigeaient, en tous cas, un surcroît notable de maçonnerie. Cela semble assez évident. Je me permettrai cependant de citer une expérience

personnelle, relative à un cas fortuit, et qui rend la constatation très frappante. Etant attaché aux travaux de reconstruction de l'arrière-port de Nieuport en 1919, je fus chargé d'étudier l'établissement d'un aqueduc longitudinal de 1 m. de largeur, dans une pile-bajoyer d'une écluse à reconstruire à l'ancien emplacement, et suivant les anciennes dispositions, ce qui limitait à 3 m. la largeur totale. Alors que cette dimension était largement suffisante pour assurer la résistance de la pile pleine, il n'en était pas du tout de même après un déforçement de l'importance indiquée et en tenant compte des pressions hydrostatiques. Je proposai l'emploi d'armatures dans le béton de part et d'autre de l'aqueduc. La quantité d'acier calculée, en conservant la même sécurité que pour la pile pleine, était assez élevée. J'ai exposé le calcul de ce cas peu fréquent de compression faiblement excentrique dans un premier travail sur le béton armé (A. T. P. B. 1924, fasc. 3, page 412), dont ce problème avait été l'origine.

Des économies s'apprécient le mieux par des chiffres réels. C'est pourquoi je cite celui de 1.250.000 florins des Pays-Bas (plus de 17 millions de notre monnaie) pour l'écluse d'Ymuiden, résultant de la suppression des aqueducs longitudinaux sur 640 m. de longueur, et du passage d'un des aqueducs courts à travers la chambre de la porte roulante de la tête intérieure (Cfr. De bouw van de nieuwe schutsluis c. a. te Ymuiden, par J. A. Ringers, C. Tellegen, P. J. Josephus Jitta et F. E. Mulder, pages 34 et 35). Pour trois écluses du Canal Juliana, l'économie réalisée d'une manière analogue est de 6 millions de francs (Voir Die Bautechnik, du 16 mars 1928, page 139). Ces économies sont nettes, déduction faite des frais d'études de laboratoire, d'ailleurs peu élevés.

Somme toute, l'ensemble des arguments précédents permet de conclure, d'une manière fondée, à l'opportunité d'une revision des dispositifs actuels de sasement.

III. — CONDITIONS DU PROBLEME.

J'ai déjà indiqué que les nouvelles dispositions étudiées, essayées et exécutées à l'étranger réalisent le sasement par ouverture des portes, ventelles ou aqueducs courts. C'est un retour à d'anciennes solutions appliquées d'une manière moderne. Ces systèmes étaient pratiquement tombés en désuétude depuis le dévelop-

pement des écluses de grande capacité. Leurs grands inconvénients consistaient en la lenteur de l'opération, qui n'excluait cependant pas l'agitation de l'eau et les mouvements dangereux des bateaux dans le sas. Les ventelles noyées à jalousies dans les portes d'aval et les aqueducs courts, débouchant dans une chambre voûtée ménagée dans le mur de chute (type du canal de la Marne à la Saône) avaient été des progrès insuffisants pour pallier à ces défauts. On les avait abandonnés pour chercher la solution dans un tout autre dispositif, celui des aqueducs longitudinaux et larrons, dont la critique a été faite ci-dessus.

Ces tâtonnements résultent de la difficulté du problème, dont les trois conditions essentielles sont :

1° la rapidité de l'opération du sassement ;

2° la réduction de l'agitation de l'eau et des actions exercées sur les bateaux, caractérisées, par exemple par les efforts qu'ils développent sur leurs amarres et qu'il est utile de réduire le plus possible ;

3° l'économie d'établissement, d'entretien et d'exploitation.

Ces conditions paraissent à première vue contradictoires. Il est donc très méritoire qu'on ait pu les accorder. Ce résultat a été obtenu grâce aux essais sur modèles effectués dans les laboratoires hydrotechniques.

IV. — PHENOMENES ACCOMPAGNANT LE SASSEMENT.

M. Tison, de l'Université de Gand, a dans un mémoire récent (A. T. P. B. 1928, fasc. 1) rappelé, d'une manière détaillée, les essais effectués avant la guerre par M. Krey, directeur de la Preussische Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, pour les écluses du canal du Rhin à Herne (Zeutralblatt des Bauverwaltung, juin 1914). La substitution d'aqueducs courts aux aqueducs longitudinaux y était imposée par suite de la subdivision des bajoyers, réalisée pour parer aux conséquences des affaissements miniers. Le D^r Kery et ses collaborateurs, notamment le D^r Winkel, ont continué dans leur laboratoire l'étude du problème, entr'autres pour les écluses néerlandaises précitées (Voir Die Bautechnik, années 1924 et suivantes).

M. Tison a reproduit les formules élémentaires d'interprétation des phénomènes observés au cours des essais. On doit leur attribuer presque exclusivement une valeur explicative et comparative, car elles impliquent de nombreuses hypothèses simplificatrices. On conçoit l'impossibilité pratique de l'étude rigoureuse d'un phénomène d'écoulement variable aussi complexe, qui n'est d'ailleurs pas réellement utile. Je me borne à rappeler ces formules dans la mesure nécessaire pour définir l'importance des phénomènes, renvoyant pour plus de détails au mémoire précité et aux références bibliographiques.

Désignons par : h_0 la chute totale de l'écluse ;

h la chute à un instant quelconque t du sassement ;

l la largeur du sas ;

L sa longueur moyenne, de telle sorte que sa surface $S = L \times l$;

ω la section de l'orifice virtuel de sassement ;

μ son coefficient d'écoulement supposé constant ;

p_0 la profondeur minimum de l'eau dans le sas ;

p la profondeur de l'eau dans le sas à l'instant t ,

s le maître-couple immergé du bateau ;

V son déplacement ($V < Sp_0$).

Étudions le remplissage du sas et supposons l'ouverture de l'orifice instantanée. Le débit initial est

$$Q = \mu \omega \sqrt{2g(h_0 + \delta - \tau_0)}.$$

δ est la dépression éventuelle au-dessus de l'orifice de sortie de l'aqueduc amont, que des dispositions appropriées permettent d'annuler ou même de renverser.

τ_0 est la hauteur de l'onde initiale, se déplaçant à la vitesse

$$w_0 = \sqrt{gp_0} \text{ (formule de Lagrange).}$$

et dont la hauteur est sensiblement $\tau_0 = \frac{Q}{lw_0}$ (loi de continuité).

La vitesse d'écoulement de l'eau en arrière de la vague est approximativement $v_0 = \frac{Q}{l(p_0 + \tau_0)} = \frac{w_0 \tau_0}{p_0 + \tau_0}$

A vrai dire, la hauteur et le régime de l'onde doivent être troublés sur toute la longueur du bateau renfermé dans le sas ; dans cette région la vitesse de l'eau devient

$$v_1 = \frac{Q}{l(p_0 + r_0) s} > v_0$$

La tête de l'onde atteint l'extrémité aval du sas au bout du temps $t = \frac{l}{w_0}$

Il se produit par réflexion une onde remontante d'arrêt du débit, de hauteur r_1 , dont la vitesse est $w_1 = \sqrt{g(p_0 + r_0)}$, d'où $r_1 = \frac{Q}{l w_1}$

En arrière de cette vague vers l'aval, la vitesse d'écoulement de l'eau s'annule et $p = p_0 + r_0 + r_1$. Le phénomène continue de la sorte ; les formules précédentes ne sont pas rigoureuses d'ailleurs, car le débit varie avec le temps.

On devrait envisager une sorte de méthode de différences finies.

Pour ce qui est des effets exercés sur les bateaux, nous n'insisterons pas sur celui de succion vers l'amont, qui résulte de la dépression \hat{c} et peut être important si le bateau est très près de la porte amont. Il dépend de la conformation du débouché de l'aqueduc et il faut chercher, par des dispositions appropriées, à le supprimer.

L'eau exerce un effort sur le bateau immobile, provenant du mouvement relatif et que l'on peut, à la rigueur, exprimer au moyen des formules les plus perfectionnées de la résistances à la traction des bateaux sur les canaux, compte tenu de la pente superficielle correspondant à l'écoulement du débit, que l'on peut, sans grande erreur, supposer uniforme. Donc :

$$i = \frac{v_1^2}{c^2 R} = \frac{v_1^2 (l + 2p_0 + 2r_0 + l)}{c^2 [l(p_0 + r_0) - s]}$$

\mathcal{Z} étant le périmètre mouillé du bateau et c le coefficient de Bazin du mouvement uniforme. Si l'on applique la formule de M. Gebers, on obtient pour l'effort exercé initialement sur le bateau vers l'aval : $R_1 = (ks + 0,14 B) v_1^{2,25} + V l$.

$k = 1,7$ pour des bateaux fins et des péniches vides.

$k = 3,5$ pour des péniches chargées.

B est la surface mouillée totale du bateau.

Le coefficient 0,14 correspond à un bateau lisse, il peut être double pour un bateau en bois très rugueux. Il doit aussi être majoré si la profondeur d'eau sous le bateau est inférieure à 1 m. A la suite des expériences de 1912, M. Krey indiquait la formule

$$R_1 = \frac{K s v_0^2}{2g} + 0,15 B v_1^{1,83} + Vi.$$

K est un coefficient de résistance de rencontre dépendant des formes du bateau.

Le terme $R_1 = \varphi(v_0, v_1)$ est toujours modéré. Il s'annule pendant le passage de la première onde réfléchie vers l'amont, puis se reproduit lors du passage de la seconde onde réfléchie vers l'aval, mais nécessairement avec une valeur moindre lorsque ω est constant, car Q a diminué et p a augmenté. Donc, dans le cas classique, la valeur initiale, de R_1 ci-dessus exprimée, est la plus grande. On peut grosso-modo la considérer comme proportionnelle à

$$v_0^2, \text{ c'est à dire à } \frac{\mu^2 \omega^2 h_0}{l^2 p_0^2}$$

L'action la plus importante décelée par les essais sur modèles provient de la dénivellation de l'onde; elle est donc alternative. Son expression est $R_2 = s\tau_1$. Théoriquement, elle est donc maximum pour l'onde initiale τ_{10} . Cependant, les expériences montrent que les actions des premières ondes réfléchies peuvent être sensiblement égales ou même légèrement supérieures. Cela peut provenir de l'effet variable de l'effort de succion dirigé vers l'amont. Néanmoins, la formule précédente est suffisante pour fixer un ordre de grandeur. Donc :

$$R_2 = s\tau_{10} = s \frac{Q}{l\sqrt{gp_0}} = \frac{s\mu\omega}{l} \sqrt{\frac{2h_0}{p_0}}$$

En négligeant la succion, l'effort total maximum est donc $R = R_1 + R_2$.

Ces formules supposent que l'orifice se trouve à l'extrémité amont du sas.

Elles sont applicables à partir de la distance à laquelle la vitesse v_0 est uniformisée, c'est-à-dire où la veine s'est épanouie suffisamment. Des actions supplémentaires considérables pourraient se produire si le bateau recevait le choc direct de la veine liquide à la vitesse de sortie $u = \frac{Q}{\omega}$. L'épanouissement de la veine est pratiquement réalisé dans les systèmes anciens par le débouché latéral des aqueducs courts, surtout dans une chambre sous le busc amont, de même que par l'orientation des larrons, s'il y en a. Dans ce dernier cas une certaine réduction de R est obtenue du fait que l'on doit nécessairement envisager le débit Q comme réparti sur un certain nombre de larrons.

Si l'ouverture de l'orifice n'est pas instantanée, mais s'effectue uniformément à un temps τ plus court que la durée de la première onde, on peut approximativement admettre que l'onde s'établit suivant un front de pente

$$j = \frac{v_0}{\tau \omega_0} = \frac{\mu \omega}{\tau l p_0} \sqrt{\frac{2h_0}{g}}$$

La considération de cette pente, de v_0 de la position du bateau dans le sas et des temps $t = \frac{l}{w}$ et τ permet de déterminer la valeur maximum de R_2 dans ce cas, d'ailleurs nécessairement réduite. Par exemple, si $t = \tau$, on a

$$R_2 = Vj = \frac{V \mu \omega}{\tau l p_0} \sqrt{\frac{2h_0}{g}}$$

On peut donc, sans accroître les efforts exercés sur les bateaux, augmenter ω , c'est-à-dire la vitesse de remplissage, en augmentant τ proportionnellement. Une augmentation de p_0 est aussi favorable.

Les expériences montrent que, pour un orifice donné, la durée τ d'ouverture de la vanne n'exerce que peu d'influence sur la durée de sassement, à condition qu'elle lui soit inférieure. Elles établissent aussi que l'augmentation de τ réduit considérablement les efforts R, principalement R_2 . Cela reste vrai, en dehors des limites d'application des formules précédentes, lorsque $\tau > \frac{L}{w_0}$

Ainsi s'effectue le remplissage du sas. Lors de la vidange, les mêmes phénomènes se produisent, mais l'onde initiale est négative et remontante. Sous cette réserve, on peut reproduire les considérations et formules précédentes en remplaçant p_0 par $(p_0 + h_0)$. Il en résulte que les efforts sont sensiblement moindres. L'action d'une succion éventuelle s'exerce vers l'aval et s'ajoute aux efforts initiaux.

En conclusion, on peut exprimer que l'effort maximum initial exercé sur un bateau pendant le sassement est sensiblement proportionnel à $\frac{\mu\omega\sqrt{h_0}}{\tau l p_0}$ dans les circonstances envisagées ci-dessus. Or, h_0 est indépendant et les dimensions l et p_0 sont déterminées par d'autres conditions. Pratiquement, la solution du problème est donc conditionnée par $\frac{\mu\omega}{\tau}$. L'effort sera d'autant moindre que τ sera plus grand et que $\frac{\mu\omega}{\tau}$ sera plus petit, ou $\frac{d(\mu\omega)}{d\tau}$ lorsque l'on considère une ouverture très lente de l'orifice.

V. — DISPOSITIFS NOUVEAUX DE SASSEMENT.

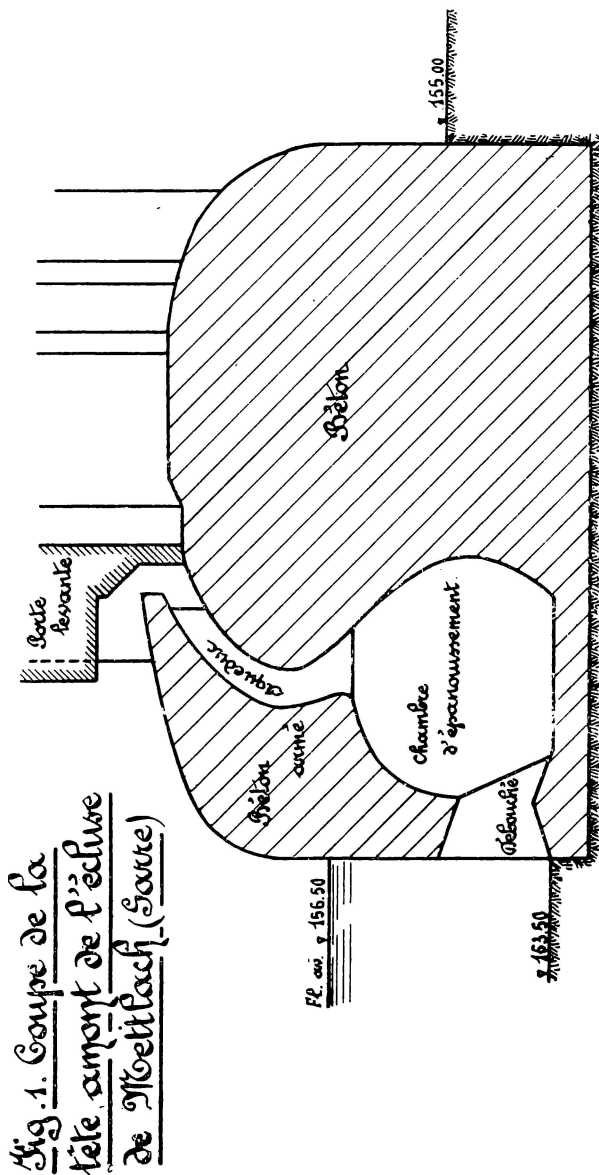
On est donc conduit à effectuer le sassement par levée lente d'une vanne découvrant un orifice progressivement croissant, et pouvant atteindre une grandeur finale beaucoup plus forte que par le passé. Ce peut-être une fraction notable de la section transversale de l'écluse, que l'on réalise éventuellement par l'ouverture très progressive des portes. Les essais sur modèles ont justifié ces dispositions et en ont permis la mise au point. J'ai assisté en janvier 1926, au laboratoire hydrotechnique de Darmstadt, aux essais finaux du dispositif étudié par le professeur Thürnau, à la demande des administrations allemande et sarroise, pour l'écluse de 1.500 tonnes à accoler au barrage de Mettlach sur la Sarre. J'en ai donné une description succincte dans un rapport au 14^e Congrès international de navigation au Caire en 1926 (en collaboration avec M. Hoffmann). Le professeur Thürnau n'a pas encore publié de mémoire relatant cet essai. Cependant, d'autres publications allemandes ont déjà exposé des dispositifs analogues (Die Bautechnik, 23 mars 1928, page 163). L'aqueduc de remplissage est établi

dans le mur de chute et débouche au ras du radier du sas (fig. 1). La porte d'amont est levante; son ouverture est très lente. Dès qu'elle est soulevée, une lame d'eau pénètre à grande vitesse dans l'aqueduc. Elle s'épanouit dans une chambre cylindrique à axe horizontal transversal et sort d'une manière tranquille par un orifice en forme de diffuseur. L'aqueduc est divisé, à l'entrée et à la sortie, par des cloisons longitudinales en béton armé, qui servent de support au plafond et contribuent à l'amortissement de l'énergie de la veine liquide. Le débit, initialement très faible, croît d'abord avec le temps. L'eau monte dans le sas et finit par noyer le seuil. La porte peut alors découvrir ce dernier et le sassement continue par orifice noyé sous la vanne. La levée est de 1 m. et dure environ 9 minutes, le sassement s'effectuant en 10' à l'échelle de l'essai, pour un sas de 110×12 m. et une chute de 9,50 m. L'ouverture complète de la porte s'achève à vitesse accélérée. Les efforts maxima exercés sur le modèle de bateau, relevés d'après le dispositif usuel décrit dans l'article de M. Tison, étaient inférieurs à 4.000 kg. par un chaland chargé de 1.500 tonnes. L'influence de la rigoureuse progressivité du levage était particulièrement mise en évidence par le fait suivant. L'opération était faite à la main par un assistant agissant sur une manivelle démultipliée. Il disposait d'un chronomètre et le diagramme de levage était enregistré pour le contrôle. Malgré les efforts de l'opérateur, de petites irrégularités se produisaient. Elles se traduisaient toujours par un accroissement de l'effort enregistré, à toute période de l'opération. L'influence du facteur $\frac{d(\mu\omega)}{d\tau}$ est ainsi expérimentalement mise en évidence.

D'autres dispositifs ont été préconisés et réalisés pour le sassement par l'ouverture des portes. Pour ceux qui utilisent des portes levantes, je renvoie aux références bibliographiques précitées et à l'Handbuch des Wasserbaues de M. H. Engels (tome II). C'est le système le plus employé. On a utilisé aussi des portes à segments ou à cylindres (Cfr. Engels, op. cit.) ainsi que des portes à secteurs en éventail (Rapport de MM. Vinberg et Lawski au Congrès international de navigation à Londres, 1923).

On a aussi étudié des ventelles de grandes dimensions, pourvues de dispositifs convenables d'amortissement (Voir Die Bau-

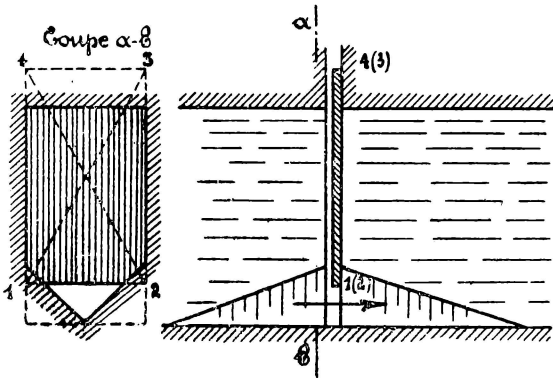
technik, nos 4 et 22 de 1925). Mais le système qui paraît devoir, comme moyen terme, se répandre le plus, comporte des aqueducs



courts contournant les portes dans l'intérieur des bajoyers des

têtes. Ils sont de très grande section, de forme appropriée à une ouverture très progressive, largement évasés au débouché de sortie et disposés de manière à assurer une sortie calme de l'eau par un

Fig. 2.

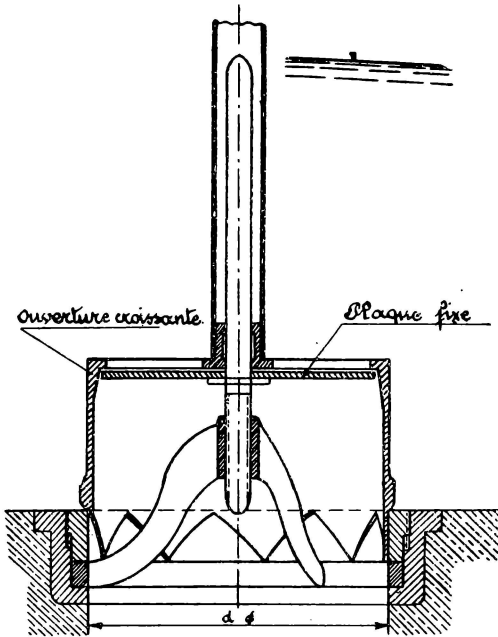


bon épanouissement de la veine. La forme spéciale de la section peut se limiter au siège de la vanne. Celle proposée par M. Krey pour les vannes plates est formée d'une partie inférieure triangulaire ou trapézoïdale surmontée d'un rectangle (fig. 2). Les vannes cylindriques reçoivent à la base une couronne à dents triangulaires (syst. Krey, fig. 3) ou un siège tronconique (Système Klink du Canal Juliana, fig. 4, références citées). La suppression des aqueducs longitudinaux permet de constituer les sas en béton armé.

L'action des dispositifs d'épanouissement est importante. Si l'on ne prend pas de précautions spéciales, l'eau pénètre dans le sas à une vitesse voisine de $\frac{Q}{\omega}$, donc très élevée. Ce courant se prolonge en veine noyée dans l'eau du sas et provoque la formation de tourbillons, éventuellement en dessous et au dessus d'elle. De ce laminage, du frottement contre les parois et de la forte agitation subséquente, il résulte une dissipation de l'énergie cinétique de la veine, qui s'épanouit et finit par remplir tout le sas à une vitesse sensiblement uniforme. La partie amont du sas est donc le siège de phénomènes très turbulents (Voir Die Bautechnik, n° 12

de 1928). Il est utile d'assurer l'épanouissement de la veine avant l'entrée dans le sas, ce qui se réalise le mieux par un diffuseur ayant toute la largeur de l'écluse, comme dans l'ouvrage de Mett-

Fig. 3.

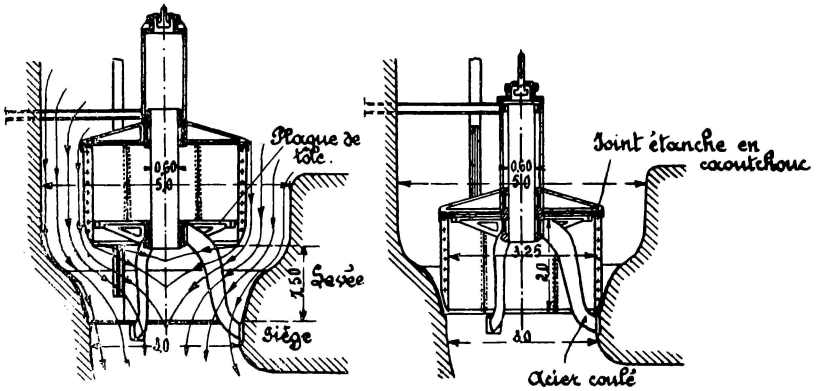


lach. Mais il faut en outre disposer avant le débouché des résistances spéciales ou d'autres agencements créant des pertes de charge ou, de préférence, des tourbillons dissipateurs d'énergie, afin que l'épanouissement se produise bien dans le diffuseur. L'eau en sort alors tranquilisée, à vitesse uniforme et faible, d'autant plus que le débit initial est moindre.

C'est en ce point que les dispositifs étudiés par les nombreux expérimentateurs allemands diffèrent le plus. Il en est de très complexes. Je n'insiste pas sur cet objet, renvoyant pour plus de détails à la bibliographie. J'estime que la préférence doit être accordée aux systèmes les plus simples, pourvu qu'ils soient satisfai-

sants. A noter que dans l'ouvrage de Mettlach, la vanne se trouve à quelque distance de l'ouverture de l'aqueduc, qui est donc plus ou moins accessible lorsque l'eau se trouve dans le sas au niveau

Fig. 4.



d'aval. Les constatations satisfaisantes faites aux écluses jumelles de Ladenburg sur le Neckar ont confirmé les résultats des essais sur modèles (Voir Die Bautechnik, 20 juillet 1928).

Le sasement par les portes s'applique surtout au remplissage. Aux têtes inférieures, les vannes levantes ne peuvent guère convenir qu'aux écluses à forte chute, dont le sas est fermé à la partie supérieure à l'aval par un mur fixe. Il y a généralement alors des bassins d'épargne étagés dans les bajogers, dont le sasement se fait par deux fosses centrales à vannes cylindriques, deux aqueducs longitudinaux et des larrons. Les plus récentes écluses allemandes en construction reproduisent encore ce type. Cependant, on peut concevoir le sasement des tranches extrêmes par le moyen des portes.

Pour les écluses de moyenne chute, les portes busquées restent en faveur pour la bouchure aval. La vidange peut se faire par ventelles noyées ou aqueducs courts. On ne se préoccupait guère, jusqu'à présent des phénomènes qui se produisent dans le canal de fuite et dans le bief d'aval. Dans les écluses les plus récentes, on établit dans le canal de fuite des dispositifs amortisseurs. Le

but est d'assurer l'épanouissement de la veine d'écoulement et de réduire le plus possible la zone de turbulence, pour éviter les affeuillements profonds en aval de l'ouvrage et permettre de rapprocher les postes d'attente des bateaux, en vue d'activer l'exploitation de l'écluse. En toute hypothèse, le débit sortant Q provoque la formation d'une onde positive dans le bief inférieur, de vitesse $w = \sqrt{gp_c}$, p_c étant le mouillage du bief, et de hauteur

$$\tau_c = \frac{1}{l_c} \frac{Q}{\sqrt{gp_c}}$$

l_c étant la largeur du plan d'eau. En cas d'ouverture rapide des vannes, cette onde à front raide peut être gênante pour les bateaux. L'ouverture progressive, selon les dernières conceptions, produit une sorte d'onde solitaire allongée, dont les effets sont peu sensibles. Il en est de même pour l'onde négative remontante, qui se produit dans le bief supérieur au début du remplissage. (Voir De Ingénieur, 7 avril 1928, ainsi que le rapport de MM. Smetana, Pacak et Till au Congrès international de navigation à Londres 1923).

Comme dispositifs d'épanouissement dans le canal de fuite, on utilise les débouchés évasés se faisant face dans les bajoyers opposés et un radier ultra-rugueux analogue au rip-rap de M. Bligh (Voir l'ouvrage *Dams and Weirs* de cet auteur).

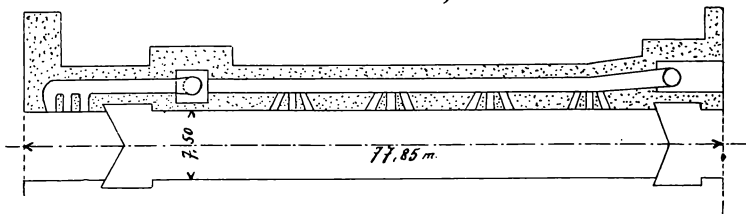
Une solution différente du sasement avait été préconisée, antérieurement aux recherches expérimentales, par MM. Jacquinet et Galliot, pour être appliquée aux écluses à forte chute : c'est celle de la fosse centrale de sasement. Dans chaque bajoyer, l'aqueduc d'amont est prolongé horizontalement jusqu'au milieu du sas. Il communique par un puits vertical avec un aqueduc longitudinal inférieur, régnant sur toute la longueur du sas et aboutissant au bief d'aval. Il est relié au sas par des larrons. S'il n'y a dans l'écluse qu'un seul bateau, placé au milieu, ce bateau ne subit pas d'effort longitudinal, quelle que soit la vitesse d'ouverture des vannes. Les phénomènes d'écoulement dans le sas se produisent symétriquement vers l'amont et vers l'aval à partir du centre et leurs effets se compensent. La solution est en défaut si l'écluse contient deux bateaux en tandem ; théoriquement on pourrait songer à les accoupler. Le principe est excellent pour les écluses à

forte chute pourvues de bassins d'épargne et presque tous les ouvrages de cette nature ont reçu des dispositions analogues. Les aqueducs longitudinaux n'ont pas, dans ces ouvrages, d'inconvénients au point de vue de la résistance et de l'économie, puisque les bajoyers très larges sont construits en béton armé, avec des évidements constituant les bassins d'épargne étagés.

C'est un dispositif ayant, dans le principe, quelque analogie avec le précédent qui a été appliqué aux nouvelles écluses du canal de Jonction à Moll, dont une est achevée. Je dois les renseignements suivants à l'obligeance de M. Denil, Directeur général des Ponts et Chaussées, qui a bien voulu me faire parvenir les plans de l'ouvrage, et à M. l'Ingénieur principal Byls. Je leur exprime mes vifs remerciements.

Les aqueducs longitudinaux ordinaires, obturés par vannes cylindriques hautes à levage rapide, communiquent avec le sas par quatre groupes équidistants de trois larrons divergents. Les groupes extrêmes ont des sections plus petites que les deux intermédiaires et le troisième à partir de l'amont se trouve à peu près au milieu de l'écluse (fig. 4bis). D'après M. Byls, le sasement est idéal au point de vue de la tranquillité des bateaux. Cela semble dû au fait que l'introduction du débit est bien répartie vers le

Fig. 4^{bis} - Coupe schématique de l'aqueduc de sasement de l'écluse n° II nouvelle à Moll.



milieu du sas et dirigée vers l'amont et l'aval, ce qui fait que les ondes interfèrent et se compensent pratiquement. A l'aval, l'aqueduc débouche par un triple orifice dans le canal de fuite, dont le radier est pourvu de saillies amortisseuses en chevrons, dérivées du principe des couloirs ultra-rugueux de M. Denil.

On peut espérer que les résultats du fonctionnement du dispositif en service courant justifieront l'innovation qu'il constitue et favoriseront la recherche de nouveaux perfectionnements.

Je ne cite que pour mémoire l'emploi possible de turbines et de pompes pour une partie du sassement.

VI. — ETUDE THEORIQUE DES DISPOSITIFS DE SASSEMENT.

A défaut de contribution expérimentale à la question, il m'a paru intéressant d'esquisser une vérification théorique des considérations précédentes. Elle a d'ailleurs l'avantage d'être plus générale et d'établir des formules qui peuvent être utiles pour l'étude des dimensions des organes et de la durée des opérations.

Nous considérons que l'écoulement se fait par orifices noyés, ce qui est pratiquement réalisé, et nous supposons le coefficient d'écoulement, μ constant. L'équation différentielle du mouvement variable est $S dp = Q dt = \mu\omega \sqrt{2gh} dt$.

$$\text{Comme } dp = -dh, \frac{\mu\omega \sqrt{2g}}{S} dt = -h^{-1/2} dh.$$

D'une manière générale, ω est fonction de t . En désignant la durée totale du sassement par T , elle est déterminée par l'équation

$$h_0^{1/2} = \frac{\mu \sqrt{2g}}{2S} [\varphi(T) - \varphi(0)]$$

La loi de variation de h en fonction de t est donnée par

$$h_0^{1/2} - h^{1/2} = \frac{\mu \sqrt{2g}}{2S} [\varphi(t) - \varphi(0)]$$

Donc $p = p_0 + h_0 - h = \psi(t)$ et $Q = S \frac{dp}{dt} = S \psi'(t)$

Il résulte de ces équations que

$$\int_0^T Q dt = S h_0,$$

c'est-à-dire que l'aire de la courbe des débits ou des vitesses de montée de l'eau dans le sas en fonction du temps est constante et indépendante de T.

Nous étudierons trois hypothèses au sujet de la variation de ω en fonction de t .

1^{er} cas. La section ω est constante et égale à Ω . La solution s'écrit

$$h_0^{1/2} = \frac{\sqrt{2g\mu} \Omega T}{2S}, \text{ d'où } T = \frac{2S h_0^{1/2}}{\sqrt{2g} \mu \Omega}$$

La loi de variation de h en fonction de t est

$$h_0^{1/2} - h^{1/2} = \frac{\sqrt{2g} \mu \Omega}{2S} t.$$

elle est représentée par une parabole du 2^e degré.

$$Q = -S \frac{dh}{dt} = \mu \Omega \sqrt{2g} h^{1/2}$$

Q varie donc linéairement en fonction de t , d'une valeur initiale $\mu \Omega \sqrt{2gh_0}$ à 0.

La vitesse moyenne de l'eau dans le sas varie de $\mu \Omega \frac{\sqrt{2gh_0}}{l p_0}$ à 0, c'est le facteur caractéristique de l'effort exercé sur le bateau, qui est maximum au début de l'opération.

2^e cas. La section croît en raison directe du temps: $\omega = kt$. Sa valeur finale est $\Omega = kT$. La solution s'écrit

$$h_0^{1/2} = \frac{\mu k T^2 \sqrt{2g}}{4S} \text{ d'où } T = \frac{4S h_0^{1/2}}{\sqrt{2g} \mu \Omega}$$

Pour que la durée soit la même que dans le cas précédent, la section finale, Ω doit être doublée. La variation de h en fonction de t s'exprime par :

$$h_0^{1/2} - h^{1/2} = \frac{\sqrt{2g\mu} kt^2}{4S}$$

$$\text{Enfin } Q = -S \frac{dh}{dt} = \mu kt \sqrt{2gh}.$$

Le débit est donc nul au début et à la fin de l'opération; il doit passer par un maximum intermédiaire, défini par

$$\frac{dQ}{dt} = 0 \text{ ou } h^{1/2} + \frac{t}{2} h^{-1/2} \frac{dh}{dt} = 0,$$

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{2h}{t} = -\frac{\mu \cdot k \cdot t \sqrt{2gh}}{S}$$

$$\text{Donc } \frac{\sqrt{2g} \mu \cdot k \cdot t^2}{2 S} = h^{1/2} = 2(h_0^{1/2} - h^{1/2})$$

$$h^{1/2} = \frac{2}{3} h_0^{1/2}, \quad h = \frac{4}{9} h_0 = 0,444 h_0$$

$$\frac{t^2}{T^2} = \frac{1}{3}, \quad t = \frac{T}{\sqrt{3}} = 0,58 T.$$

Donc les maximums de débit et de vitesse de montée se produisent au-delà de la moitié de l'opération, alors que le sas est plus qu'à moitié rempli. Comme $\frac{d\omega}{dt} = k = cte$, le coefficient caractéristique de l'effort sur le bateau $\frac{\omega}{t} \frac{\sqrt{h}}{p}$ varie de $k \frac{\sqrt{h_0}}{p}$ à 0. Il est donc initialement maximum, ce qui est défavorable.

3^e cas. La section croît proportionnellement au carré du temps: $\omega = kt^2$. La valeur finale est $\Omega = k T^2$. La solution s'écrit:

$$h_0^{1/2} = \frac{\sqrt{2g} \mu \cdot k \cdot T^3}{6 S} \text{ d'où } T = \frac{6 S h_0^{1/2}}{\sqrt{2g} \mu \cdot \Omega}$$

Pour que la durée totale de l'opération soit la même que dans le 1^{er} cas, la section finale doit être triple. La variation de h en fonction de t s'exprime par

$$h_0^{1/2} - h^{1/2} = \frac{\sqrt{2g} \mu \cdot k \cdot t^3}{6 S}$$

$$Q = -S \frac{dh}{dt} = \mu \cdot k \cdot t^2 \sqrt{2gh}.$$

Q est nul au début et à la fin de l'opération et passe intermédiairement par un maximum défini par

$$\begin{aligned} \frac{dQ}{dt} = 0 \text{ ou } 2 t h^{1/2} + \frac{t^2}{2} h^{-1/2} \frac{dh}{dt} = 0 \\ 2 h^{1/2} - \frac{t h^{-1/2}}{2} \frac{\mu k t^2 \sqrt{2gh}}{S} = 0 \\ \frac{\mu k t^3 \sqrt{2g}}{S} = 4 h^{1/2} = 6 (h_0^{1/2} - h^{1/2}), \\ \text{d'où } h^{1/2} = 0,6 h_0^{1/2}, \quad h = 0,36 h_0 \\ \frac{t^3}{T_3} = \frac{4 h^{1/2}}{6 h_0^{1/2}} = 0,4 \quad t = \sqrt[3]{0,4 T} = 0,74 T \end{aligned}$$

Le facteur caractéristique $\frac{d\omega \sqrt{h}}{dt p}$ a pour expression $\frac{k t \sqrt{h}}{2 p}$

Il est initialement et finalement nul et possède donc un maximum intermédiaire, défini par

$$\frac{d \left(\frac{t \sqrt{h}}{p} \right)}{dt} = 0$$

On obtient après développement l'équation :

$(p_0 + h_0 - h)(4 - 3 h_0^{1/2} h^{-1/2}) - 6 h^{1/2} (h_0^{1/2} - h^{1/2}) = 0$
 qui permet, en principe, de déterminer la valeur de h correspondant au maximum et le temps correspondant. La solution dépend de p_0 .
 Il est plus simple de procéder graphiquement en traçant une courbe de $\frac{kt\sqrt{h}}{2p}$ en fonction de t , déterminée au moyen de quelques

points. Cette méthode est suffisante, car le facteur $\frac{d\omega \sqrt{h}}{dt p}$ n'a pas de signification absolue, mais constitue un élément de comparaison, convenable surtout pour la période initiale de sassement.

Les figures 5, 6 et 7 représentent les diagrammes théoriques, établis dans les 3 hypothèses envisagées, pour une écluse de 90 m. de longueur, 10.50 m. de largeur et 7 m. de chute, la durée du sassement étant de 8 minutes. On a supposé $\mu = 0,5$. Dans le premier cas, correspondant à l'ouverture instantanée d'un orifice constant, $\frac{\mu \Omega}{S}$

Fig. 5.

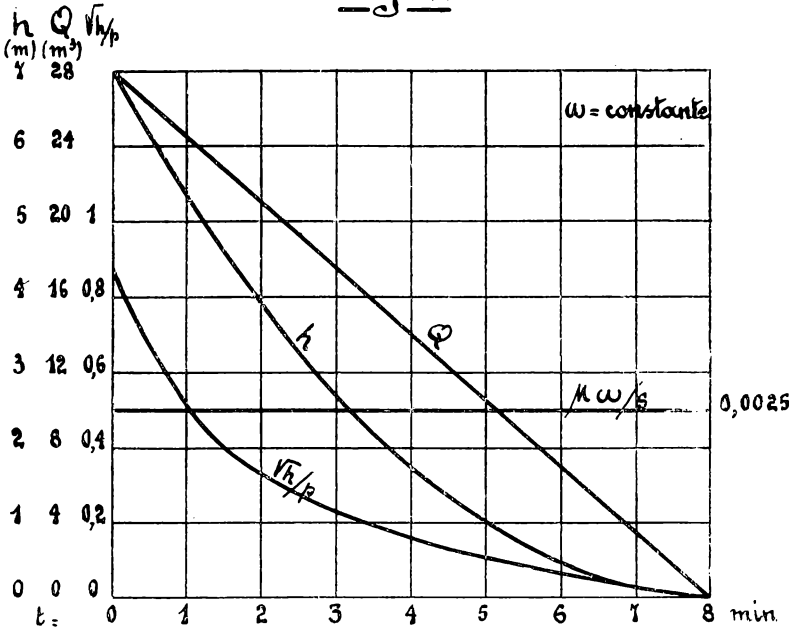
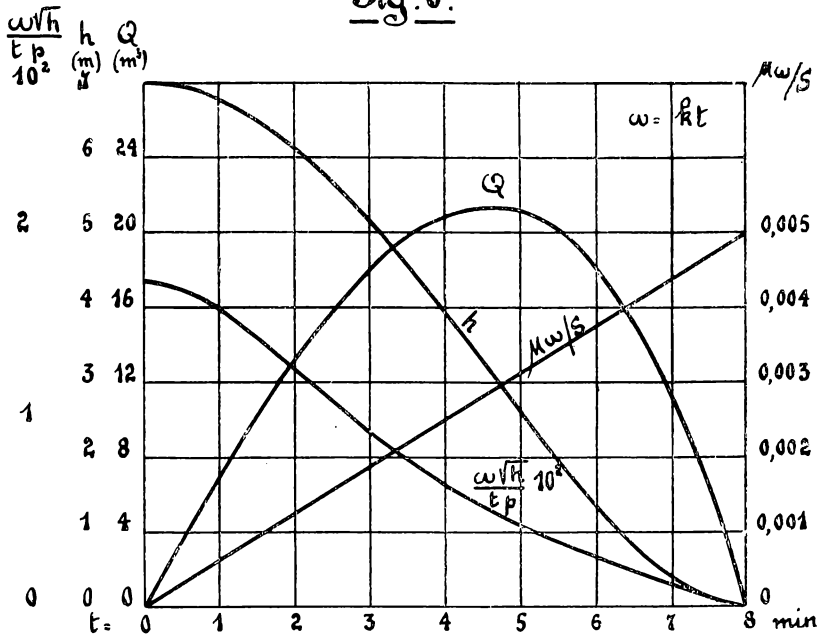
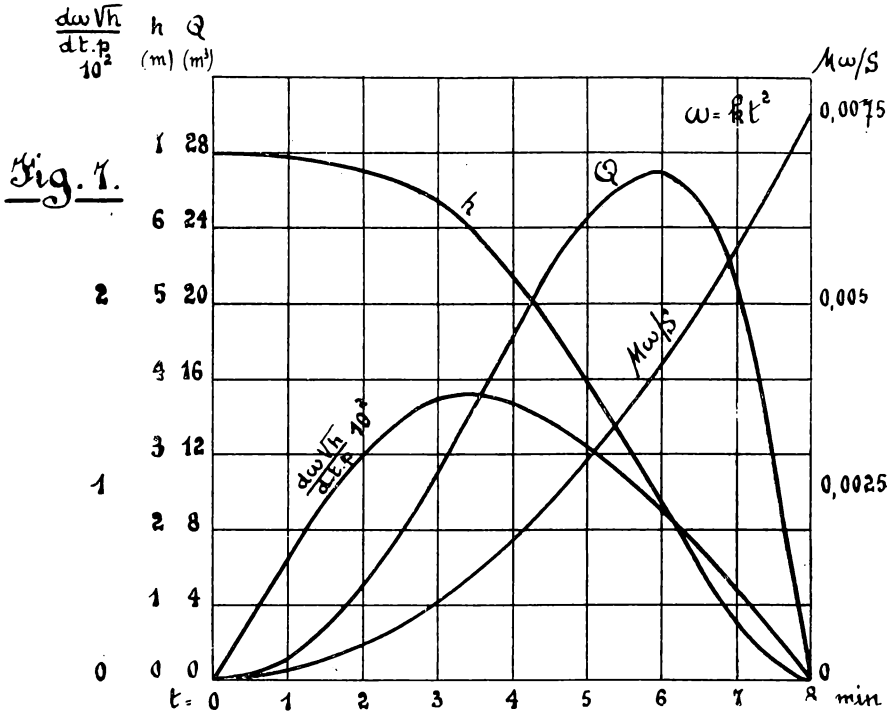


Fig. 6.



= 0,0025. On a représenté (fig. 5) les courbes de variation de h , de Q (ou $\frac{dh}{dt}$) et de $\frac{\sqrt{h}}{p}$ en fonction du temps. Le deuxième cas correspond au levage uniforme d'une vanne découvrant un orifice rectangulaire, dont la valeur finale est telle que $\mu \Omega = 0,005$. On



a représenté (fig. 6) les courbes de variation de $\frac{\mu w}{S}$, h , Q et de $\frac{w}{t} \frac{\sqrt{h}}{p} 10^2$ en fonction du temps.

Le troisième cas correspond au levage uniforme d'une vanne découvrant un orifice triangulaire, dont la section finale est telle que $\frac{\mu \Omega}{S} = 0,0075$. On a représenté (fig. 7) les courbes de variation

de $\frac{\mu w}{S}$, h , Q et $\frac{dw}{dt} \frac{\sqrt{h}}{p} 10^2$ en fonction du temps. Le maximum

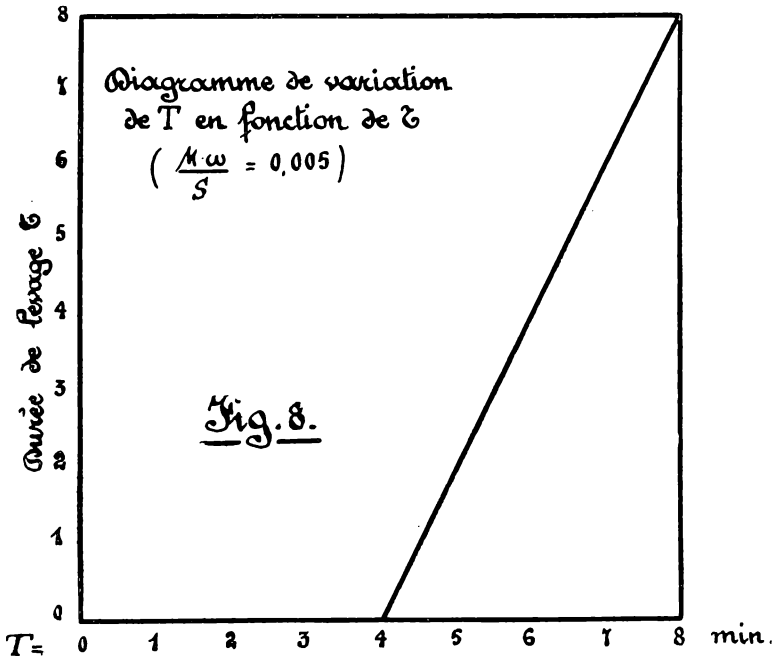
de débit du troisième cas est supérieur à celui du second, cela provient des allures différentes des courbes de Q , dont l'aire est constante. Observons qu'il existe un autre invariant, qui est l'aire de la courbe de $\frac{\mu\omega}{S}$, quelle que soit la valeur de T . En effet,

$$\int_0^T \frac{\mu\omega}{S} dt = -\frac{1}{\sqrt{2g}} \int_{h_0}^0 h^{-1/2} dh = \frac{2 h_0^{1/2}}{\sqrt{2g}}$$

Cette propriété remarquable permet la solution très facile du problème. Si l'on impose une durée de sassement T , on en déduit l'ordonnée moyenne du diagramme de $\frac{\mu\omega}{S}$ qui est $\frac{2 h_0^{1/2}}{\sqrt{2g} T}$. Tout

diagramme de $\frac{\mu\omega}{S}$ ayant telle ordonnée moyenne satisfait au problème. On peut donc s'imposer des conditions supplémentaires, par exemple de réaliser la plus faible valeur de Q max, ou de $\frac{d\omega}{dt} \frac{\sqrt{h}}{p}$ max

La propriété de la constance de $\int_0^T \frac{\mu\omega}{S} dt$ explique aussi la

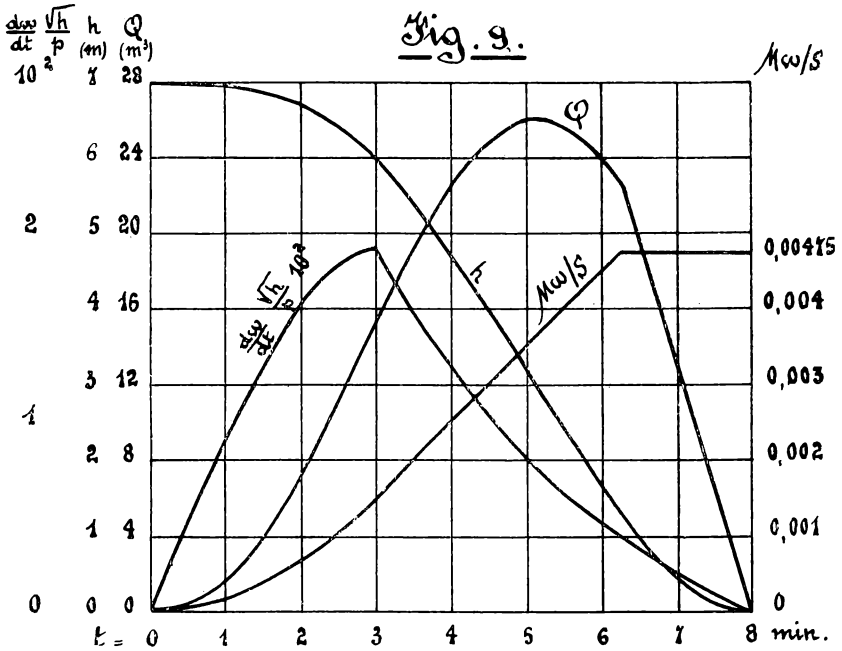


faible influence de la durée de levage de la vanne sur la durée de sassement T. La figure 8 représente le diagramme de variation de T en fonction de la durée τ du levage de la vanne, supposé uniforme, l'orifice étant constitué comme dans le cas de la figure 6. Cette loi linéaire est compatible avec celles qui ont été relevées expérimentalement. (Voir Die Bautechnik, n° 12 de 1928).

Les diagrammes précédents correspondent à des conditions théoriques, qui sont combinées dans les dispositifs pratiques. La figure 9 représente les courbes caractéristiques d'un orifice triangulaire à la partie inférieure, selon le système du D^r Krey, la vitesse de levage de la vanne étant supposée constante. Pendant la première partie de la manœuvre, $\omega = kt^2$, du temps 0 au temps t_1 , que l'on peut déterminer ainsi que tous les éléments correspondants. Du temps t_1 , au temps t_2 , ou a [$\omega = \omega_1 + k't$.] Ensuite il y a éventuellement du temps t_2 au temps T une troisième phase correspondant à $\Omega = \omega^2$. Le diagramme de $\frac{\mu \omega}{S}$ est donc discontinu, mais son aire satisfait à la propriété précitée. Les éléments pratiques qui déterminent le diagramme: forme de l'orifice, vitesse de levage, etc. peuvent être combinés en vue du meilleur résultat, selon les circonstances. L'étude précédente confirme les avantages des dispositions préconisées à la suite des essais sur modèles. On constate en effet que la troisième hypothèse, correspondant à l'orifice triangulaire, est la plus favorable pendant la période initiale. Mais la croissance de la section devient bientôt trop rapide et alors la deuxième hypothèse, correspondant à l'orifice rectangulaire, devient préférable. Les maxima de débit et d'effort sur le bateau sont moindres. Dans la phase finale, l'orifice constant est admissible. Observons que le dispositif défini par la figure 9, tout en supposant une section finale moindre que dans les cas des figures 6 et 7, donne des résultats comparatifs très satisfaisants.

L'avantage de systèmes progressifs au point de vue des ondes de sassement dans les biefs est aussi certain. Supposons le mouillage de 3 m. et la largeur au plan d'eau de 40 m. La vitesse de l'onde dans le bief inférieur est de 5,43 m. sec. Dans le cas théorique de la figure 5, il se produira une onde à front très raide d'environ 0,13 m. de hauteur. Les autres dispositifs produiront une intumescence très

allongée et à faibles pentes, ayant probablement l'allure des courbes de Q ; son effet sur les bateaux ne peut être sensible.



Les conclusions précédentes sont encore confirmées par la considération des caractéristiques énergétiques. La puissance instantanée de l'orifice est $\Pi = Q h = \mu \omega \sqrt{2g} h^{3/2}$.

L'aire du diagramme de π en fonction de t est un invariant, car

$$\int_0^T Q h dt = \int_{h_0}^0 S h dp = \frac{S h_0^2}{2}$$

Dans l'hypothèse $\omega = \Omega$, π varie de $\mu \Omega \sqrt{2g} h_0^{3/2}$ à 0 en décroissant constamment.

Dans le deuxième cas, $\omega = kt$, l'expression de la puissance est $\pi = \mu kt \sqrt{2g} h^{3/2}$.

Elle est nulle initialement et finalement et possède un maximum intermédiaire défini par

$$\frac{d \pi}{dt} = 0 \text{ ou } h^3_{1/2} + \frac{3 t}{2} h^1_{1/2} \frac{dh}{dt} = 0.$$

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{2h}{3t} = -\frac{\mu kt\sqrt{2gh}}{S}$$

$$\frac{\sqrt{2g} \mu k t^2}{2 S} = \frac{h^1_{1/2}}{3} = 2(h_0^{1/2} - h^1_{1/2})$$

$$h^1_{1/2} = \frac{6}{7} h_0^{1/2}, h = \frac{36}{49} h_0$$

Le temps correspondant est défini par

$$\frac{t^2}{T^2} = \frac{h_0^{1/2} - h^1_{1/2}}{h_0^{1/2}} = \frac{1}{7} \text{ d'où } t = \frac{T}{\sqrt{7}} = \frac{T}{2,65}$$

Le maximum de puissance se produit peu après le tiers de l'opération.

Dans la troisième hypothèse ($\omega = kt^2$), $\pi = \mu kt^2 \sqrt{2g} h^{3/2}$. Cette expression est nulle au début et à la fin de l'opération et passe entretemps par un maximum, déterminé par

$$\frac{d \pi}{dt} = 0 \text{ ou } 2 t h^3_{1/2} + \frac{3 t^2}{2} h^1_{1/2} \frac{dh}{dt} = 0$$

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{4}{3} \frac{h}{t} = -\frac{M kt^2}{S} \sqrt{2gh}$$

$$\frac{\mu k t^3 \sqrt{2g}}{S} = \frac{4}{3} h^1_{1/2} = 6(h_0^{1/2} - h^1_{1/2}).$$

$$h^1_{1/2} = \frac{9}{11} h_0^{1/2} \qquad h = \frac{81}{121} h_0$$

Le temps correspondant est tel que

$$\frac{t^3}{T^3} = \frac{h_0^{1/2} - h^1_{1/2}}{h_0^{1/2}} = \frac{4}{22} \text{ d'où } t = \frac{T}{\sqrt[3]{5,5}} = \frac{T}{1,765}$$

Le maximum de puissance se produit peu après la moitié de l'opération. La croissance de la courbe de puissance est plus faible dans le troisième cas que dans le deuxième pendant la phase initiale; par contre pendant la phase moyenne, le maximum de puissance est supérieur dans le troisième cas. Ces constatations viennent à l'appui des conclusions antérieures..

Lorsque la veine est épanouie dans le sas, sa puissance résiduelle a pour expression

$$\pi' = \frac{Q v_{02}}{2g} = \frac{\nu^3 w^3 [\sqrt{2g}] h^{3/2}}{l^2 (p_0 + h_0 - h)^2}$$

Le rapport à la puissance primitive est

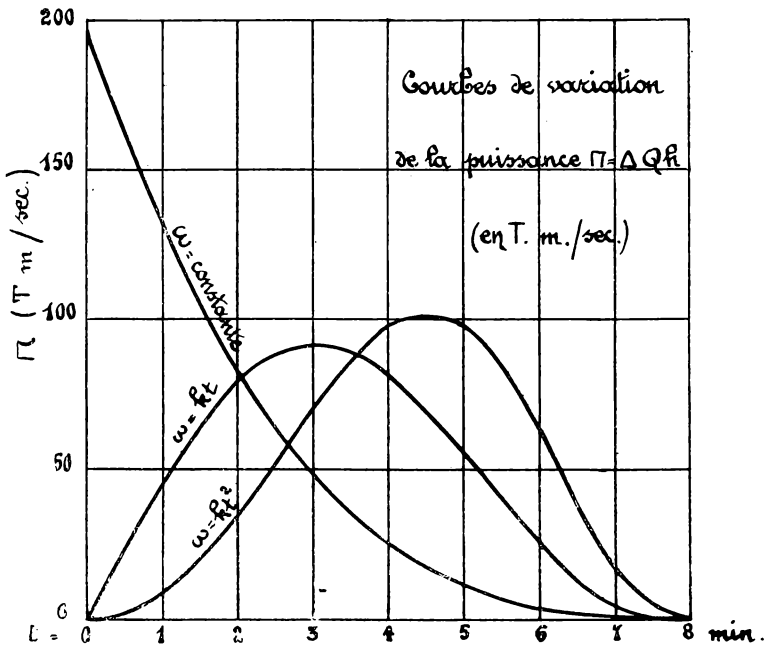
$$\frac{\pi'}{\pi} = \frac{n^3 \omega^2}{l^2 (p_0 + h_0 - h)^2}$$

Il est donc toujours très petit, de telle sorte que, à une faible fraction près, un entrée tranquille de l'eau dans le sas exige la dissipation préalable quasi totale de l'énergie de la veine.

Si $\omega = kt$, π est nul au début et à la fin et passe par un maximum entretemps tandis que π' est nul au début et ne cesse de croître ensuite.

Si $\omega = kt^2$, les variations sont analogues, mais la valeur finale de $\frac{\pi'}{\pi}$ est 9 fois plus grande que dans le premier cas et 2.25 fois plus grande que le second.

Fig. 10.



La figure 10 représente les courbes de π en fonction de t dans les trois cas. Elle montre que l'épanouissement de la veine s'effectuera le plus sûrement et avec les moindres dispositifs d'amortissement en réalisant la troisième hypothèse pendant la période du début du sassement, la seconde pendant la période moyenne et la première pour la phase finale.

On aboutit encore à la même conclusion en envisageant le rapport du débit instantané Q au volume d'eau du sas ou de la puissance instantanée au même volume. Ces caractéristiques n'ont guère de signification physique si l'on se reporte aux phénomènes accompagnant le sassement. Je ne les étudierai donc pas; les développements précédents me paraissent suffisants, tant au point de vue théorique que pratique, pour un exposé général. Les courbes caractéristiques et la propriété de l'invariant $\int_0^T \frac{\mu \omega}{S} dt$ semblent susceptibles de faciliter l'étude concrète des dispositifs de sassement.

On peut rechercher des lois de variation de ω satisfaisant à certaines conditions théoriques. Par exemple, la constance de Q , d'où résulte

$$\frac{dh}{dt} = -a, \quad h = h_0 - at \quad \text{et} \quad a = \frac{h_0}{T}$$

$$\omega = \frac{Q}{\mu \sqrt{2g} (h_0 - at)}$$

Ou bien encore $\pi = [\mu \omega \sqrt{2g} h^{3/2}]$

$$- S dh = \frac{\pi}{h} dt$$

$$\text{d'où} \quad \frac{h_0^2 - h^2}{2} = \pi t, \quad T = \frac{S h_0^2}{2 \pi} \quad \text{et} \quad \omega = \frac{\pi}{\mu h^{3/2} \sqrt{2g}}$$

Ces questions n'ont cependant pas grand intérêt pratique, d'autant plus que leur rigueur est affectée par l'incertitude du coefficient μ . Il n'est plus que probablement pas constant (1). L'erreur absolue ne paraît cependant pas devoir être grave. Une plus grande difficulté provient de la mauvaise connaissance que l'on

(1) Aux causes de variation provenant de la turbulence s'ajoutent celles provenant du fait que le mouvement n'est pas permanent, mais variable, et celles qui résultent des vitesses d'amont et d'aval. Pratiquement, il n'est possible de tenir compte de ces éléments que par la méthode expérimentale.

a de ce coefficient. Le Taschenbuch für Bauingenieure de M. Foerster, tome II, cite les chiffres suivants :

Orifices en mince paroi : $\mu = 0,6$.

Orifices à parois profilées : $\mu = 0,8$ à $0,9$.

Aqueducs courts : $\mu = 0,4$ à $0,5$.

Pour les aqueducs longs, M. Engels indique $\mu = 0,4$. L'application des formules usuelles d'hydraulique relatives au calcul des pertes de charge paraît peu sûre. Le meilleur moyen d'estimer μ en vue d'un projet consisterait, dans l'état actuel de la question, à recourir à un essai sur modèle. La loi de similitude étant assez exactement applicable, les résultats numériques semblent devoir être assez approximatifs. La méthode convient surtout pour rechercher, par comparaison, les dispositions les plus favorables. On peut aussi, par observation des durées de levage et de sassement pour des ouvrages existants, déterminer les valeurs moyennes de μ correspondant aux formules précédentes (1).

La loi de variation de ω dépend du profil de l'orifice, mais aussi de la vitesse de levage de la vanne. La loi $\omega = kt^2$ peut être réalisée par un levage à vitesse uniforme d'une vanne obturant un orifice triangulaire, mais aussi par le levage uniformément accéléré d'une vanne couvrant un orifice rectangulaire. En fait, lors du démarrage, la vitesse possède toujours une phase d'accélération, qui influe sur le sassement. De ce chef, la progressivité initiale du système Krey est encore plus grande qu'il ne paraît, mais c'est au détriment de la période moyenne.

Les orifices partiellement triangulaires ou trapezoïdaux ont l'inconvénient de demander, pour une même ouverture finale, des dimensions plus grandes qu'un orifice rectangulaire. Il s'y ajoute une certaine complication constructive, des possibilités d'obstruction éventuelle, etc. Je n'allègue ces points que pour justifier une certaine préférence que l'on peut accorder, me semble-t-il, aux dispositifs comportant des aqueducs et vannes de types courants, manœuvrés suivant une courbe de variation de vitesse appropriée et très progressive au début. La réalisation automatique d'un

(1) C'est ce qui a été fait à l'écluse de Panheel (De Ingenieur, n° 31 de 1928). On a trouvé une valeur assez constante et élevée de μ pendant la phase moyenne, égale à $0,66$. Elle variait en augmentant dans la phase finale.

tel régime de vitesse ne présente guère de difficulté. Le levage lent à l'avantage de réduire la puissance requise et la dépense de courant. Des démarreurs automatiques à contracteurs peuvent être actionnés par des relais à temps défini, tels qu'on les emploie dans certains appareils de levage. A l'écluse de Panheel (voir De Ingénieur, n° 31 de 1928), on a employé des tambours d'enroulement de câbles à rayon variable.

VII. — CONCLUSIONS.

Mon but était d'exposer l'état actuel de la question du sassement des écluses et surtout d'établir une confirmation théorique des principes des solutions les plus récentes, à savoir la progressivité de l'opération et l'épanouissement convenable de la veine par dissipation de son énergie avant l'entrée dans le sas. Les théories et formules exposées concordent avec les résultats connus d'expériences. Elles paraissent de ce fait dignes de confiance et propres, non seulement à inciter à la revision des solutions anciennes, mais à être pratiquement utiles pour l'établissement de dispositifs concrets à caractère moderne.

Liège, le 19 septembre 1928.

F. CAMPUS.

