Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 29 (1903)
Heft: 3

Artikel: Intensité des coups de bélier dans les conduites d'eau
Autor: [s.n.]
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-23478

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: 16.07.2025

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

L'épaisseur des diaphragmes ou parois transversales, est de 10 cm., celle des tympans de 16 cm., celle de l'arc proprement dit est de 20 cm. à la clef et augmente un peu aux retombées, pour atteindre ensuite assez brusquement 60 cm. aux appuis, où l'on a admis que la voûte serait encastrée après le décintrement.

Le béton a été formé de gravier et de sable lavé de l'Inn, avec 300 kg. de ciment Portland de Wallenstadt par m³. Toutes les armatures sont en fer rond de petit diamètre (les plus gros, deux par nervure ou tympan, n'ont que 15 mm.), assez serrés, croisés et entrelacés d'une manière judicieuse, comme le montre la figure 2.

Les travaux, commencés à l'automne de 1900 (fouilles et bétonnage d'une culée, de mi-septembre à fin octobre), ont été repris au commencement de juin 1901 ; le cintre a été érigé en juillet et le bétonnage s'est fait aux dates suivantes : voûte (intrados) du 24 au 27 juillet; tympans et parois transversales du 28 juillet au 12 août 1902. L'empierrement a été fait du 23 août au 10 octobre; le décintrement a eu lieu le 10 octobre et les épreuves les 11 et 12 octobre 1902.

M. le professeur Ritter étant tombé malade quelque temps après, le procès-verbal de ces épreuves est resté en souffrance dès lors, et il ne nous a malheureusement été possible d'obtenir que des renseignements incomplets sur les observations faites au décintrement et alors.

L'abaissement total au décintrement était de 38 mm. à la clef, le 10 octobre au soir; il avait atteint 55 mm. le 11 au matin, avant les essais. La charge totale avait produit le 11 au soir un abaissement supplémentaire de 13 mm., portant ainsi le total à 68 mm.

Déchargé à moitié le 12 au matin, le pont accusait un tassement total de 75 mm., qui s'est réduit à 72 mm. une fois le tablier complètement déchargé.

Ces chiffres, nous le répétons, ne sont pas tout à fait exacts; ils prouvent cependant que les culées n'ont pas fait leur devoir comme il fallait parce que les accès n'étaient pas achevés au moment des essais, et que les rotules n'étaient certes pas superflues au cas particulier.

Les deux appuis s'étant relevés sous la charge alors que la clef tassait, il paraît évident que les culées, insuffisamment chargées par le remblai, ont basculé sur leur arête inférieure.

La charge totale était celle de 350 kg. par m² admise aux calculs. Un essai de surcharge roulante a été fait avec un chariot chargé de troncs d'arbre et de sacs de chaux et pesant 6000 kg., non compris les cinq chevaux (donc environ 2000 kg.) de l'attelage; cet essai a été jugé satisfaisant.

La population et les autorités sont d'ailleurs contentes de leur pont, qui leur a coûté 26 200 fr.[1], tout compris, et ne leur causera probablement pas des frais d'entretien considérables. L'extérieur est badigeonné au mortier de chaux.

Il n'y a pas eu d'accident pendant les travaux et ceux-ci, conduits avec soin par M. l'ingénieur Maillart, n'ont donné lieu à aucune réclamation.

Il n'est pas sans intérêt de noter que ce pont en béton armé s'est construit à 250 m. d'une carrière de calcaire; le moellon n'y est peut-être pas de très bonne qualité, mais les maçons l'emploient couramment dans le pays. *(A suivre).*

Berne, décembre 1902. E.

[1] Un pont métallique n'eût pas coûté sensiblement moins cher; mais un pont en maçonnerie aurait coûté bien davantage, car avec les matériaux du pays, à supposer qu'ils suffisent pour une telle voûte, les culées auraient dû être plus que doublées.

Intensité des coups de bélier dans les conduites d'eau.

Dans les numéros 3 et 4, année 1878, du *Bulletin de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes,* l'auteur du présent article a publié un petit travail intitulé : *Coups de bélier dans les conduites, étude des moyens employés pour en atténuer les effets.*

Le Traité des turbo-machines, par A. Rateau, ingénieur des mines, (Paris, Dunod 1900), contient une magistrale *Théorie des coups de bélier.*

J'espère intéresser les praticiens en résumant ici la question et en indiquant les formules simples, qui permettent de calculer l'importance des coups de bélier produits par la fermeture ou l'ouverture des vannes terminales d'une conduite.

L'expérience a conduit à la suppression des chambres d'air, qu'on ne retrouve plus dans les installations récentes, à moins qu'il ne s'agisse de conduites alimentées par des pompes.

Sauf dans le cas de vannes à commande hydraulique mal construites, ou lors du remplissage maladroit de conduites, il n'y a pas de fermeture instantanée, ou de manœuvre équivalente.

Le problème à résoudre habituellement est donc la détermination du coup de bélier produit par la fermeture (ou l'ouverture) progressive de la vanne terminale d'une conduite, en l'absence de chambre d'air.

Nous rappellerons cependant la formule à employer pour le cas de fermeture instantanée.

Lors même qu'il n'y a pas de chambre d'air, il reste cependant la *chambre élastique* due à l'élasticité des parois et à la compressibilité de l'eau, chambre dont l'effet est comparable à celui d'une véritable chambre d'air.

Nous appelons progressive la fermeture d'une vanne qui, abstraction faite des effets du coup de bélier, diminue

le débit proportionnellement au temps, pendant qu'on ferme. La fermeture d'une vanne papillon, par exemple, même faite régulièrement, ne remplit pas les conditions voulues, puisque pendant la première et plus importante partie de la fermeture, le débit n'en est presque pas influencé.

La perte de charge, due aux frottements de l'eau contre les parois de la conduite, est négligée dans l'établissement de toutes les formules que nous rappelons. Cette manière de procéder est admissible puisque, dans le cas particulier, le frottement, qui n'est pas toujours négligeable, constitue une circonstance favorable.

Ceci remarqué et sans répéter de démonstrations, voici les résultats auxquels on arrive :

Notations adoptées.

Les notations que nous employons ici sont à peu près celles de M. Rateau. Nous avons cru devoir les modifier légèrement pour ne conserver que les quantités qui sont les données mêmes ou les conséquences immédiates du problème.

L La longueur de la conduite jusqu'à l'orifice d'écoulement, exprimée en mètres.

l La longueur de la chambre élastique supposée de même diamètre que la conduite.

H La hauteur de chute à l'orifice d'écoulement.

v La vitesse de l'eau dans la conduite à l'origine de la fermeture (ou de l'ouverture).

Q Le débit correspondant à cette vitesse.

g L'accélération due à la pesanteur.

T La durée totale de la fermeture de l'orifice, faite à vitesse constante, de façon que la section efficace de l'orifice décroisse régulièrement.

t Le temps.

b Le coup de bélier ou surpression, exprimée en mètres de hauteur d'eau à l'instant t de la fermeture.

B Le maximum de b. L'indice i accolé à B s'appliquera au cas de la fermeture instantanée et l'indice T à celui de la fermeture en T secondes.

τ La période ou durée des oscillations de la pression dans la conduite, pendant ou après la fermeture, exprimée en secondes.

R La tension en kilogrammes par millimètre carré dans les parois de la conduite.

Volume de la chambre élastique.

Il n'est autre chose que celui qui est créé 1° par l'extension des parois de la conduite, sous l'effet de la pression et 2° par la compression de l'eau. La formule suivante, qui le détermine, donne la longueur l que ce volume occuperait dans un tuyau de même diamètre que la conduite.

La dilatation des parois fournit un premier volume, dont la longueur est :

$$\frac{R\,L}{10\,000}, \text{ pour une conduite en tôle,}$$

$$\text{et } \frac{R\,L}{5000}, \text{ pour une conduite en fonte.}$$

On sait que le coefficient d'élasticité de la fonte est moitié de celui du fer.

La tension R par millimètre carré à employer est celle qui existe au milieu de la longueur de chaque tronçon, à même épaisseur de parois, et non pas la tension maximum.

Si la tension R est constante (ou à peu près) comme c'est habituellement le cas pour les tuyaux en tôle, le volume dû à la dilatation des parois est *régulièrement* réparti tout le long de la conduite.

Si l'épaisseur des parois est constante d'un bout à l'autre de la conduite, comme c'est volontiers le cas pour les tuyaux en fonte, ce même volume est *progressivement* réparti sur cette même conduite (supposée de pente à peu près régulière).

La longueur du volume engendré par la compression de l'eau est :

$$\frac{H\,L}{400\,000}.$$

Ce volume est *progressivement* réparti sur la longueur de cette même conduite.

La longueur totale de la chambre élastique, soit la somme des deux valeurs ci-dessus, est :

$$1)\quad l = \frac{L}{10\,000}\left(R + \frac{H}{40}\right), \text{ pour une conduite en fer ;}$$

$$1^{bis})\quad l = \frac{L}{10\,000}\left(2R + \frac{H}{40}\right), \text{ pour une conduite en fonte.}$$

Fermeture instantanée.

La valeur maximum du coup de bélier dû à une fermeture instantanée ou, si l'on préfère, l'excès, exprimé en mètres, que la pression atteint en sus de la normale est donnée par la formule :

$$2)\quad B_i = v\sqrt{\frac{LH}{g\,l}}.$$

Cette formule est la même (après remplacement équivalent des lettres) que celle qui est désignée sous chiffre I *bis* de notre mémoire de 1878 et que la formule n° 145 de M. Rateau (dans laquelle la lettre Z désigne la surpression relative) [1].

Fermeture progressive.

a) *Formules s'appliquant à l'hypothèse inexacte de la non élasticité.*

Il est utile de se représenter d'abord que l'élasticité des parois et la compressibilité de l'eau n'existent pas, et de voir quel doit être l'effet d'une fermeture progressive.

[1] Il y a une faute d'impression dans le volume de M. Rateau ; la fraction sous le radical de la formule 145 a été renversée.

Si l'on suppose que la fermeture se produit en T secondes et que la première partie de cette fermeture se fasse instantanément, de façon que la surpression qui naîtra instantanément aussi, β, soit suffisante pour que le débit de la conduite reste le même à travers l'orifice rétréci, cette surpression demeurera constante pendant toute la durée de la fermeture subséquente qui se fait avec une vitesse régulière. Cette surpression β est donnée par la formule :

$$3)\quad \beta = \frac{L\,v}{g\,T},$$

qui figure sous chiffre VIII dans le mémoire de 1878.

Cette valeur β du coup de bélier en est la valeur la plus petite possible. Elle ne se présente jamais puisque l'élasticité existe, mais elle constitue un point de comparaison important.

La surpression β, multipliée par la section de la conduite, n'est autre chose que l'effort constant qui, appliqué à un corps solide de même masse que la colonne liquide en mouvement et animé de la même vitesse initiale, l'arrêterait en T secondes. Le surtravail que fournit l'eau débitée pendant la fermeture, surtravail qui est le produit du volume débité $\frac{Q\,T}{2}$ par l'excès constant de pression β, régnant pendant le même temps, est bien égal à la puissance vive emmagasinée dans la colonne liquide en mouvement, qu'il s'agit d'arrêter.

Comme la fermeture des vannes d'une conduite ne s'opère jamais, en réalité, ainsi qu'il est supposé ci-dessus, M. Rateau a calculé le coup de bélier déterminé par une fermeture absolument régulière en l'absence d'élasticité. Il a trouvé que ce coup de bélier a une valeur donnée par sa formule nº 150. Cette valeur est toujours croissante et tend rapidement vers son asymptote.

Remarquant que, si dans une équation de la forme $Z = \frac{A}{1 - x}$ le terme x est une fraction très petite, on peut écrire sans grande erreur $Z = A\,(1 + x)$, on trouve, en employant les notations du présent article, qu'on peut écrire comme suit la valeur asymptotique de la formule nº 150 de M. Rateau :

$$4)\quad \beta' = \beta\left(1 + \frac{\beta}{2\,H}\right)$$

La valeur β' vers laquelle tend le coup de bélier produit par une fermeture parfaitement régulière, n'est autre que la valeur β du coup de bélier minimum multipliée par le coefficient $\left(1 + \frac{\beta}{2\,H}\right)$. Comme, en pratique, on s'arrange de façon que le coup de bélier soit une faible fraction de la charge totale, $^1/_{10}$ par exemple, il en résulte que le coefficient $\left(1 + \frac{\beta}{H}\right)$, qui multiplie β, est très voisin de $(1 + {}^1/_{20})$ dans le cas particulier.

Les valeurs de β et β' ne sont donc pas bien différentes, mais β' est toujours plus grand que β. Cela doit être, car le coup de bélier minimum β est supposé rester constant pendant toute la fermeture, tandis que le coup de bélier β' déterminé par le calcul de M. Rateau est variable et va en s'accroissant. Sa valeur finale doit être plus grande que β pour que toute la puissance vive de la colonne liquide en mouvement soit détruite.

b) *Formules tenant compte de l'élasticité.*

Les formules ont été établies en admettant que la chambre d'air et la chambre élastique agissent de la même manière, quoiqu'elles n'occupent pas le même point de la conduite. *Ces formules sont les seules applicables dans la pratique, même s'il n'y a pas de chambre d'air, puisque la chambre élastique existe toujours.*

La surpression que fait naître la fermeture varie avec le temps, suivant une courbe sinusoïdale, qui ondule autour d'une parallèle à l'axe des t. C'est ce que fait voir notre formule nº XI de 1878, résolue par rapport à la surpression ou coup de bélier b, et non plus par rapport au temps t :

$$5)\quad b = \beta\left[1 + \sin\pi\left(\frac{2\,t}{\tau} - {}^1/_2\right)\right]$$

$$\text{ou } \tau = 2\,\pi\,\sqrt{\frac{L\,l}{H\,g}}.$$

Cette courbe b se construit facilement.

Le maximum de b est (formule IX de 1878) :

$$6)\quad B_T = 2\,\beta = \frac{2\,L\,v}{g\,T},$$

et, en général, si la conduite comporte plusieurs diamètres successifs :

$$6^{bis})\quad B_T = \frac{2}{g\,T}\,\Sigma\,L\,v.$$

La surpression maximum B_T ou coup de bélier, qui se produit effectivement dans une conduite, est donc le double du coup de bélier minimum constant β qui pourrait se produire si l'élasticité n'existait pas. On se rend facilement compte *à priori* qu'il doit en être ainsi.

En effet, si le volume d'eau qui s'écoule pendant la fermeture est soumis à une surpression *constante*, celle-ci aura une certaine valeur déterminée et telle que le surtravail produit par l'eau sortante sera équivalent à la puissance vive de l'eau en mouvement. Lorsque cette surpression est, au contraire, *variable*, sa valeur maximum sera naturellement plus grande que la valeur constante du cas précédent, pour que le surtravail produit par l'eau sortante reste le même.

Les formules 5 et 6 ont été établies en admettant que le débit à travers l'orifice, pendant qu'on le ferme, n'est pas influencé par l'accroissement de la pression ou coup de bélier. Cette erreur volontaire est négligeable dans la

pratique. En effet, si par exemple le coup de bélier *moyen* est de $^1/_{20}$ de la chute, comme on l'impose quelquefois ($^1/_{10}$ au maximum), le débit *moyen* réel à travers l'orifice pendant sa fermeture est de $^1/_{40}$ plus grand qu'il ne le serait sans le coup de bélier. Par conséquent, la surpression qu'on calculera à l'aide de la formule 6 sera de $^1/_{40}$ seulement plus grande que la réalité.

L'erreur est négligeable. Elle agit d'ailleurs dans un sens favorable.

M. Rateau a établi la formule qui détermine en chaque instant de la fermeture la valeur de la surpression produite, et cela sans négliger, comme nous l'avons fait, l'accroissement de débit qui correspond à la surpression.

La formule n° 162 de son ouvrage, à laquelle il parvient, est bien compliquée et son utilisation pratique un peu pénible. On peut parfaitement, dans la pratique, négliger l'amortissement de la sinusoïde que cette formule donne et se contenter de la sinusoïde simple de notre formule 5.

Cette sinusoïde montre que les variations de la pression dans une conduite dont on ferme (ou ouvre) l'orifice ont une valeur périodique, dont la période est :

$$7) \quad \tau = 2\pi \sqrt{\frac{Ll}{Hg}}.$$

C'est ce que notre formule X, de 1878, a fait voir pour la première fois.

Construisons la sinusoïde de la formule 5 (fig. 1). Cela se fait simplement en portant sur l'axe des t la longueur $ON = \tau$ de la période ; on calcule la valeur $\beta = \frac{Lv}{gT}$ du coup de bélier minimum ; on trace à la hauteur β une parallèle à l'axe des t et on construit (avec une table des sinus) la sinusoïde $OMNP$ qui ondule autour de cette parallèle.

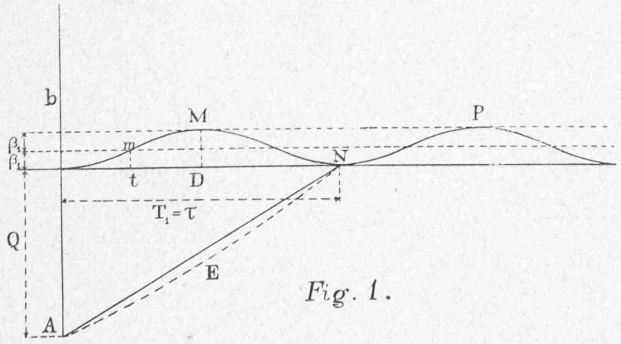

Fig. 1.

Les ordonnées telles que $mt = b$ représentent la surpression après le temps $t = Ot$.

Si, en dessous de l'axe des t, on porte en ordonnée la longueur OA égale au débit initial Q, le triangle OAN représentera le volume total débité pendant la fermeture d'une durée $T = \frac{2}{3} ON$. Lorsque cette *durée T de la fermeture est égale à la durée τ de la période* des oscillations de pression, on voit qu'à la fin de la fermeture le volume de la chambre d'air et la pression sont revenus à leur valeur initiale, le débit est nul et la colonne d'eau complètement immobile.

Le surtravail développé par l'eau sortie est représenté par un prisme dont la base est le triangle OAN et la hauteur le coup de bélier minimum $\beta = \frac{Lv}{gT}$, ou bien par le prisme qui a pour base ce même triangle et qui se termine, à sa partie supérieure, par la surface courbe dont la sinusoïde OMN est la trace sur le plan vertical. Ces deux volumes sont rigoureusement égaux entre eux, comme il est facile de s'en assurer, et le travail qu'ils représentent est l'équivalent de la puissance vive emmagasinée à l'origine de la fermeture dans la colonne liquide en mouvement.

En réalité, le triangle qui représente le volume total débité pendant la fermeture est le triangle curviligne $OAEN$ plus grand que OAN et la surpression maximum réelle est un peu inférieure à $MD = 2\beta$. Mais l'erreur commise est négligeable comme nous l'avons déjà dit. Le phénomène qui produit l'amortissement de la sinusoïde est un phénomène accessoire. Mêmes conclusions pour une durée T de fermeture égale à 2, 3, n fois la durée τ de la période.

(A suivre).

Divers.

Pont sur la Thur, près de Müllheim.

Parmi les travaux de parachèvement imposés à l'ancienne Compagnie du Nord-Est par l'arrêté du Conseil fédéral du 27 avril 1900 figure l'établissement de la double voie sur la ligne Winterthur-Romanshorn. Cette ligne passe, entre les stations de Felben et Müllheim, de la rive gauche sur la rive droite de la Thur. Elle traverse à angle droit la rivière corrigée, sur un pont en bois à quatre ouvertures (deux travées de rive de 39 m. et deux travées médianes de 50m,40) construit il y a cinquante ans. L'infrastructure de la ligne Winterthur-Romanshorn n'a pas été établie dès l'origine en vue de la double voie ; il faut donc, pour la seconde voie, allonger les piles et les culées existantes et établir sur ces prolongements un nouveau pont métallique, avec les mêmes ouvertures (pl. 1).

Mais, à côté de cette construction nouvelle, il est devenu nécessaire de remplacer le pont actuel en bois de la première voie. La charpente de ce pont, une poutre continue à treillis, du système américain Howe, est parfaitement conservée, mais il n'est pas possible de la renforcer de façon à satisfaire aux exigences modernes. Les calculs de résistance, basés sur l'ordonnance fédérale du 19 août 1892, ont démontré que la plupart des pièces travaillent à un taux sensiblement supérieur à la limite admissible.

Une autre raison qui s'oppose au maintien du pont en bois, c'est le danger d'un incendie, qui compromettrait en même temps la solidité du pont métallique de la seconde voie jusqu'à le rendre impraticable. Il est donc indispensable de procéder