

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 36 (1910)
Heft: 20

Artikel: Note sur le calcul du coup de bélier dans les conduites d'eau sous pression
Autor: Vaucher, A.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-81459>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 04.05.2025

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

Note sur le calcul du coup de bélier dans les conduites d'eau sous pression.

Par A. VAUCHER, ingénieur.

(Suite et fin¹).

OBSERVATIONS DIVERSES ET CONCLUSIONS

Cette dernière remarque relative au contre-coup maximum d'ouverture peut être sensiblement vérifiée au moyen de notre formule (22), après y avoir posé $V_0 = 0$; en effet, en dérivant par rapport à V_i son second membre et égalant à 0 l'expression en résultant, on trouve l'équation

$$V_i^2 + \frac{4gY_0}{3a} V_i - \frac{4}{3} \left(\frac{gY_0}{a} \right)^2 = 0$$

d'où l'on tire que le maximum du contre-coup aurait lieu pour $V_i = \frac{2gY_0}{3a}$ (soit $0,666 \frac{gY_0}{a}$ au lieu de $0,6 \frac{gY_0}{a}$ ci-dessus); le coup de bélier direct négatif correspondant tiré de l'équation (12) serait de $\frac{Y_0}{2}$ et le premier contre-coup positif en résultant donné par la relation (22) serait la moitié de ce coup direct négatif, autrement dit serait les 25 % de la pression normale Y_0 . La petite différence avec les chiffres énoncés plus haut provient de la substitution

admise dans les formules simplifiées de $\sqrt{\frac{Y}{Y_0}}$ par $\frac{Y+Y_0}{2Y_0}$.

Mais il importe de remarquer que les surpressions directes ou de contre-coup déterminées par les considérations qui précèdent se rapportent à des mouvements de vannage progressifs, tandis qu'en cas d'ouvertures et fermetures successives, la superposition d'ondes de surpression directe de fermeture à celles de contre-coup d'ouverture pourrait conduire à des surpressions énormes. Ainsi un régulateur qui commanderait par saccades un vannage, l'ouvrant et le fermant successivement, pourrait produire semblable effet et il ne paraît pas impossible que certains cas d'éclatement de conduites aient pu provenir en partie d'une telle cause.

En ce qui concerne le réglage des turbines il est intéressant de remarquer qu'en cas de fermeture rapide, la puissance du jet peut commencer par croître. Cette puissance étant évidemment proportionnelle à la pression Y et à la vitesse V variables, c'est-à-dire d'après l'équation (7 bis) à $V \left(Y_0 + \frac{aV_0}{g} - \frac{aV}{g} \right)$, en égalant à 0 la dérivée de cette expression par rapport à V , on voit qu'elle passe par son maximum pour $V = \frac{1}{2} \left[V_0 + \frac{gY_0}{a} \right]$, c'est-à-dire pour $Y = \frac{1}{2} \left[Y_0 + \frac{aV_0}{g} \right]$, condition qui évidemment

ne pourra être réalisée que si V_0 est plus grand que $\frac{gY_0}{a}$.

La présente étude pouvant à première lecture paraître un peu ardue, voici en conclusion les formules principales à en retenir pour calculer rapidement le coup de bélier en cas d'ouverture ou de fermeture rapides ou lentes, en appelant rapide un mouvement de vannage s'effectuant dans un temps inférieur ou au plus égal à $\frac{2L}{a}$ et lent celui s'effectuant dans un temps au moins égal ou supérieur à $\frac{2L}{a}$, les deux séries de formules coïncidant d'ailleurs pour $T = \frac{2L}{a}$.

Mouvement rapide du vannage. (Ouverture ou fermeture).— La formule (10 bis) ou (10 ter) avec ses cas spéciaux (11) et (12), donne le maximum de la dépression ou de la surpression à l'arrêt du vannage et la formule (22) celui du premier contre-coup après l'arrêt.

Mouvement lent du vannage. — Le maximum du coup de bélier n'a pas lieu obligatoirement à la fermeture, mais il peut être atteint au temps $\frac{2L}{a}$, auquel il prend, en cas d'ouvertures ou fermetures proportionnelles au temps, la valeur donnée par la relation (13 ter) ou ses cas spéciaux (14) et (15).

La valeur du coup de bélier à l'arrêt du vannage peut être déterminée au moyen de la relation (20 bis), ou celle (19) s'il s'agit d'une fermeture totale, en calculant préalablement les valeurs du coup de bélier aux temps précédents de $\frac{2L}{a}$, en commençant par celui correspondant dans la

première demi-période 0 à $\frac{2L}{a}$, ce dernier étant en cas de variation linéaire donné par la relation (13 bis), et les suivants par la relation (17), dont (13 bis) et (20 bis) ne sont que des cas particuliers.

Mais si le mouvement du vannage est suffisamment lent, ou plutôt d'une durée T égale à plusieurs fois la périodicité $\frac{4L}{a}$, la pression à l'arrêt du vannage sera voisine de celle calculée d'après la relation (5) donnant la moyenne des dernières ondulations.

La différence des coups de bélier caractéristiques donnés par (13 ter) et par (5) dépendra des conditions exposées plus haut et peut être contrôlée par la formule (18).

Quant au premier contre-coup après l'arrêt du vannage, il sera donné par l'équation (21) ou par l'équation (22) si le mouvement du vannage a été rapide et nous rappelons ce qui a été mentionné plus généralement au sujet du phénomène après l'arrêt du vannage.

N.B. — L'application de ces formules est cependant subordonnée à diverses réserves faites au cours de cette étude.

Avant d'en donner quelques exemples, nous croyons utile d'ajouter encore les remarques suivantes :

¹ Voir N° du 25 septembre 1910, page 205.

Les valeurs du coup de bélier calculées ainsi s'entendent à l'extrémité inférieure de la conduite ; s'il doit s'agir de déterminer les valeurs correspondantes de la surpression aux autres points de la conduite (pour fixer par exemple ses épaisseurs), on peut admettre que le coup de bélier décroît linéairement le long de la conduite pour s'annuler à la chambre de mise en charge (et non proportionnellement aux pressions de régime de chaque élément de la conduite), ceci toujours en supposant que le coup de bélier résulte d'un mouvement du vannage au bas de la conduite.

Si les formules ci-dessus devaient être appliquées à d'autres vannages que celui d'admission aux turbines, il ne faudrait pas oublier qu'elles présupposent toujours que la vitesse de l'eau dans le vannage soit celle correspondant à la pression d'eau ; ainsi s'il s'agissait d'une vanne d'étranglement dans la conduite, les équations ci-dessus ne seraient applicables qu'à partir du moment où l'ouverture en serait suffisamment rétrécie pour que l'eau y passe avec la vitesse maximum correspondant à la pression.

Enfin, étant donné que pour les hautes chutes on adopte parfois des diamètres de tuyaux plus faibles au bas qu'au haut de conduite, les formules ci-dessus sont encore pratiquement applicables, à condition de calculer la vitesse de propagation a d'après les éléments relatifs à chaque tronçon, soit de poser :

$$a = \frac{L}{\Sigma \left(\frac{l}{b} \right)}$$

et de prendre une vitesse moyenne de l'eau dans la conduite égale à $\Sigma \frac{(lv)}{L}$, l désignant la longueur, v la vitesse d'eau et b celle de propagation afférentes à chaque tronçon.

Ces substitutions ne doivent cependant pas être considérées comme rigoureuses, d'autant plus qu'un changement de diamètre peut motiver la formation d'ondes secondaires d'une période d'oscillation en rapport avec les longueurs respectives des tronçons de diamètre différent.

Enfin, si la conduite était dédoublée à sa partie inférieure, il se produirait aussi plusieurs ondes de pression directes ou réfléchies, se superposant et pouvant, suivant le cas, augmenter ou diminuer l'intensité du coup de bélier.

Ainsi si nous prenons un cas extrême où une seule des branches inférieures serait en marche, l'autre ou les autres jouant alors le rôle de chambre en quelque mesure élastique, la réaction correspondante devra donner lieu à une onde réfléchie secondaire pouvant amortir le coup de bélier dit plus haut « direct » si dans ce cas où en réalité plusieurs ondes de pression chevauchent les unes sur les autres, on continue à appeler coup de bélier direct celui de l'onde principale pendant le temps $\frac{2L}{a}$.

La présence de ces ondes secondaires paraît d'ailleurs confirmée par les diagrammes du *Bulletin technique de la Suisse romande*, du 25 janvier 1910, où l'on remarque dans une même période principale une série de décrochements

dont le nombre semble bien concorder avec le rapport des longueurs de conduites de diamètre différent.

Pour terminer cette étude nous en donnons un exemple d'application en nous en rapportant aux deux séries d'essais suivants :

1° Il s'agit d'essais effectués en 1900 à l'*usine de la Rageat* (Isère), au cours desquels il fut constaté que la surpression lors d'une fermeture dépassait d'environ 75 % celle prévue et que ce maximum se présentait avant la fermeture totale. Pression statique environ 360 m. $L = 730$ m. Deux tuyaux, chacun avec $D = 0,70$ m., soit section totale des deux $= 0,77$ m².

Pour une puissance de 2150 HP., qui devait correspondre à une vitesse moyenne d'environ 0,80 m./sec. dans les conduites, et une fermeture totale en 5,5 secondes, la pression s'est relevée de 21 m., dont 2 m. attribuables à la perte de charge (chiffre tiré des essais), c'est-à-dire que la surpression provenant du mouvement de fermeture a été de 19 mètres¹.

Les formules (4) ou (4 bis) du présent mémoire, ou celle N° 36 d'Alliévi donneraient pour la surpression à la fermeture une valeur d'environ 10,98 mètres, résultat auquel on arrive plus rapidement par la formule (5) qui donne

$$Y_m - Y_0 = 10,815 \times 1,015 = 10,98 \text{ m.}$$

comme ci-dessus, le premier facteur étant l'expression $\frac{Lv}{gT}$ et le second le facteur correctif m_2 .

Or si nous nous en reportons à ce qui est remarqué plus haut, il s'agissait là d'un cas où la surpression maximum devait avoir lieu au temps $t = \frac{2L}{a}$. D'après le tableau donné précédemment, nous aurons $a =$ environ 1200 m.

le maximum doit se produire au temps $t = \frac{2 \times 730}{1200} = 1,22$ seconde, et être égal à la valeur suivante, d'après la relation (13 ter) ou (14)

$$Y_m - Y_0 = 2 \times 10,815 \left[\frac{360}{360 + \frac{1200 \cdot 0,80}{2g}} - 10,815 \right] = 21,63 \times 0,90 = 19,5 \text{ m.}$$

La fraction dans la parenthèse est le facteur correctif m_1 indiqué plus haut, et ici $= 0,90$.

Remarquons que la formule d'Alliévi N° 14 mentionnée plus haut conduit au même résultat, qui coïncide bien avec l'essai en question.

Enfin la différence des deux maximum 19,5 — 10,98, soit environ 8,52 devrait, d'après l'équation (18), être la suivante :

$$10,815 (2 \times 1,0269 - 1,0153) - 97,8 (1,0269 - 1) = 11,23 - 2,63 = 8,6 \text{ m.}$$

résultat concordant sensiblement avec le précédent.

¹ Les renseignements ont été communiqués au soussigné par MM. de Haller et Piccard.



Photographie Lacroix fils, à Genève.

LE MUSÉE D'ART ET D'HISTOIRE DE GENÈVE

Architecte : M. M. CAMOLETTI, à Genève.

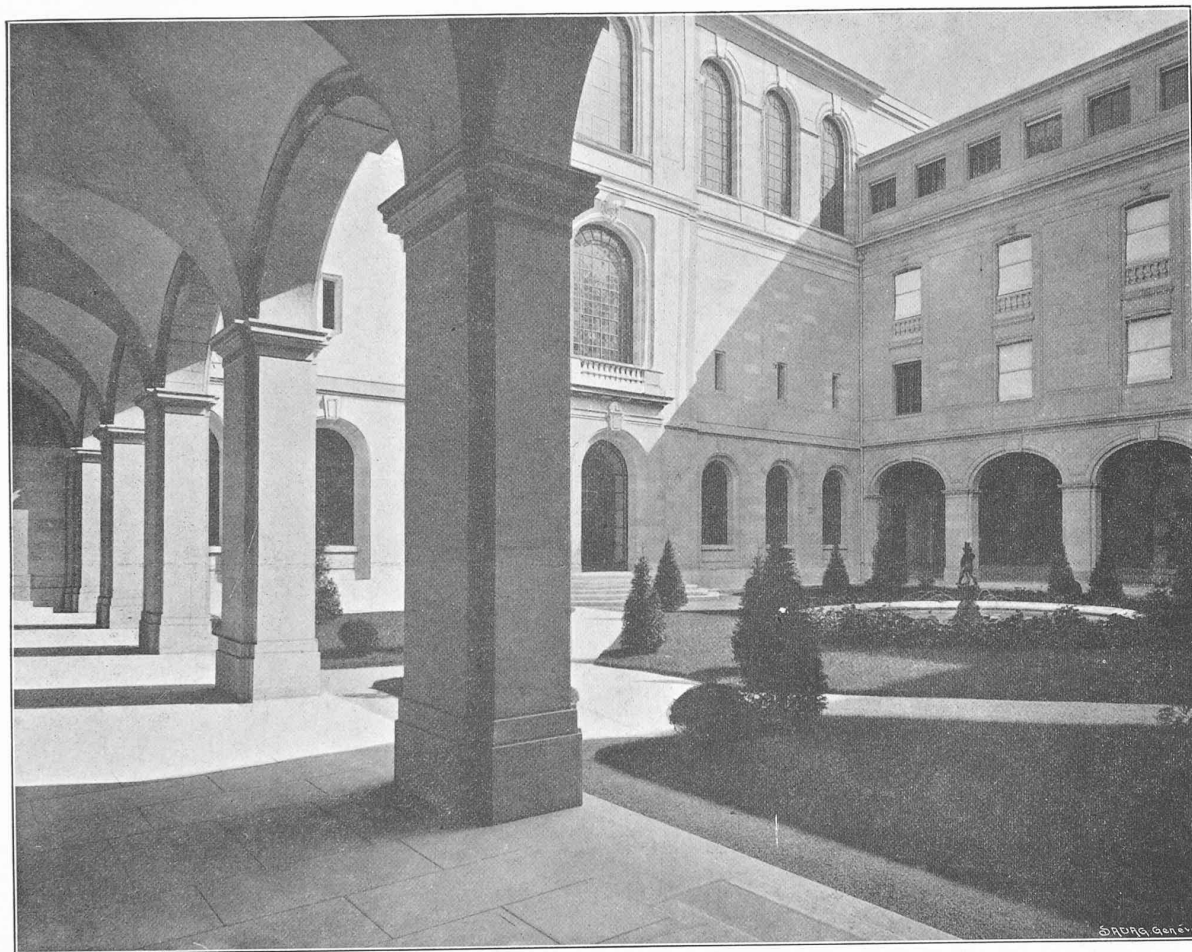


Photographie Lacroix fils, Genève.

Le grand escalier.

LE MUSÉE D'ART ET D'HISTOIRE DE GENÈVE

Architecte : M. M. CAMOLETTI, à Genève.

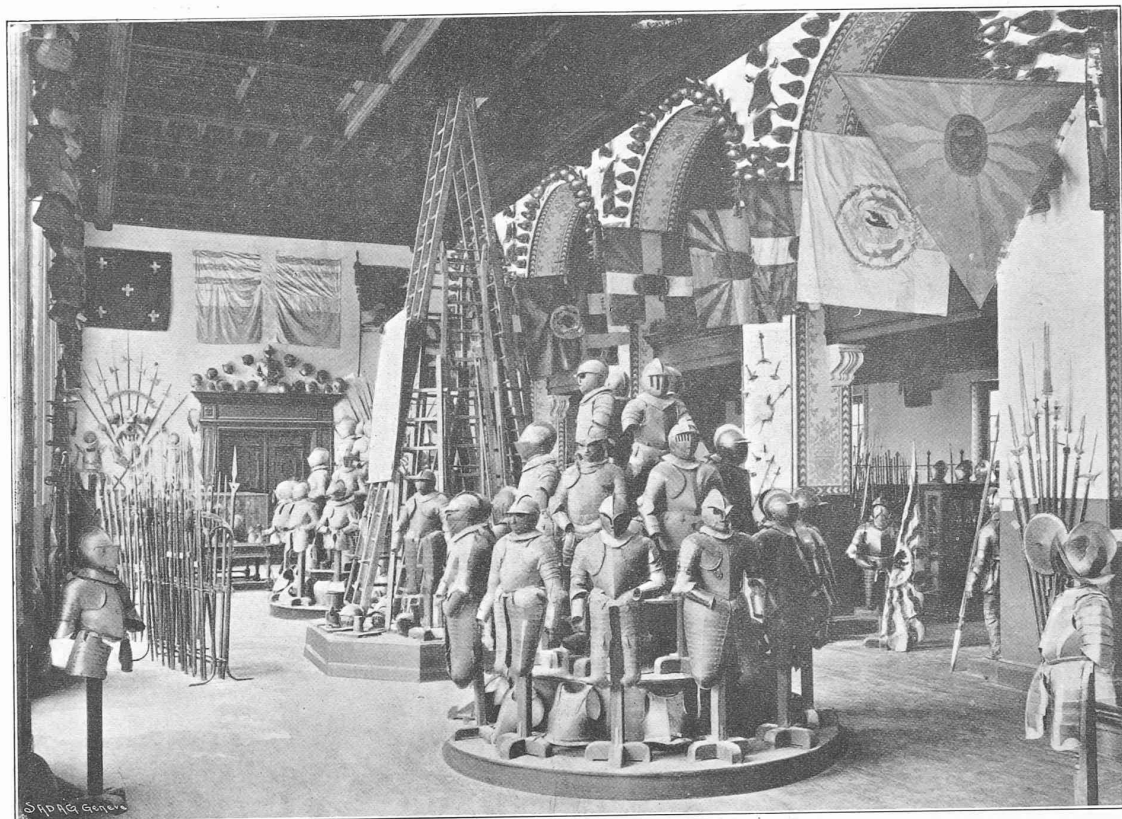


Photographie Lacroix fils, Genève

La Cour intérieure.

LE MUSÉE D'ART ET D'HISTOIRE DE GENÈVE

Architecte : M. M. CAMOLETTI, à Genève.



Salle des armures.



Photographies Lacroix fils, Genève.

Salle J.-J. Rigaud.

LE MUSÉE D'ART ET D'HISTOIRE DE GENÈVE

Architecte : M. M. CAMOLETTI, à Genève.

Si au lieu de fermer en 5,5 secondes, on l'avait fait dans un temps inférieur ou au plus égal à 1,22 seconde ci-dessus, le coup de bélier aurait atteint d'après l'équation (11) la valeur $\frac{1200 \times 0,80}{g} = 97,8$ m. qui serait le maximum pour une réduction brusque de 0,80 m./sec. de la vitesse dans la conduite.

Si pour les mêmes données de l'exemple ci-dessus on avait ouvert le vannage en 5,5 secondes, la vitesse dans la conduite passant de 0 à 0,80 m./sec., la dépression au temps $t = 1,22$ sec. calculée d'après la formule (13 *ter*) ou (15) de $21,63 \times 0,97 = 20,98$ m., tandis que près de l'ouverture complète l'équation (5) donnerait pour cette dépression une valeur de $10,815 \times 0,985 = 10,65$ m.

Si la même ouverture avait eu lieu dans un temps inférieur ou égal à 1,22 sec., la formule (12) donne pour la dépression correspondante :

$$Y_0 - Y_m = \frac{97,8}{1 + \frac{97,8}{2 \times 360}} = \frac{97,8}{1,136} = 86 \text{ m.}$$

et le premier contre-coup au temps $\frac{4L}{a} = 2,44$ sec. atteindrait d'après la formule (22)

$$Y_c - Y_0 = -86 \left(-\frac{6700}{7420} \right) = 77,6 \text{ m.}$$

Enfin, si dans cet exemple on voulait calculer la pression à la fermeture plus exactement que par la formule (5), il faudrait procéder successivement comme indiqué plus haut, c'est-à-dire ici calculer les surpressions de 1,22 en 1,22 secondes, pour les temps 0,62 — 1,84 — 3,06 — 4,28 et 5,5 sec.

Ainsi, pour $t = 0,62$ sec., la formule (13 *bis*) donne :

$$Y - Y_0 = \frac{97,8 \times 0,64}{5,5 \times 1,015} = \frac{11,38}{1,015} = 11,21 \text{ m.}$$

Pour $t = 1,84$, la formule (17) ou (17 *bis*) donne :

$$Y - Y_0 = \frac{32,72 - 2 \times 11,21}{1,090} = 9,37 \text{ m.}$$

Pour $t = 3,06$, elle donne :

$$Y - Y_0 = \frac{54,41 - 2(11,21 + 9,37)}{1 + \text{etc.}} = \frac{13,25}{1,0356} = 12,78 \text{ m.}$$

Pour $t = 4,28$ sec. :

$$Y - Y_0 = \frac{76,1 - 2(11,21 + 9,37 + 12,78)}{1 + \text{etc.}} = \frac{9,38}{1,030} = 9,10 \text{ m.}$$

Pour $t = 5,5$ sec. :

$$Y - Y_0 = \frac{97,8 - 2(11,21 + \text{etc.})}{1} = 97,80 - 84,92 = 12,88 \text{ m.}$$

On remarquera que la valeur moyenne des dernières oscillations correspond très sensiblement à la valeur calculée plus haut page 22 d'après la formule (5), qui était de 10,98 m., alors que $\frac{9,10 + 12,88}{2} = 10,99$.

Quant aux oscillations rythmiques après la fermeture totale elles auraient été de — 12,88 m. au temps $5,5 + 1,22$ seconde = 6,72, —, + 12,88 pour $t = 6,72 + 1,22 = 7,94$, etc., et ainsi de suite, à part l'amortissement dû aux résistances.

Pour d'autres vitesses d'eau dans la conduite et de fermeture obtenues lors de cette série d'essais de 1900, la surpression maximum coïncide également avec celle calculée d'après la relation ci-dessus (14).

Comme dernier exemple avant de terminer cette étude déjà plus longue que nous ne l'aurions voulu, nous prendrons les données relatives à la conduite de l'usine de Viège.

$Y_0 = 720$ m. $L = 1420$ m. dont 1157 m. en tuyaux de 0,70 m. de diam. et 263 m. en deux tuyaux de 0,50 m. de diamètre.

En prenant pour le tronçon de 1157 m. la valeur de a pour une pression moyenne de 400 m. et pour le tronçon inférieur à celle indiquée pour 700 m., on trouve :

$$2 \sum \left(\frac{l}{a} \right) = 2 \left[\frac{263}{1280} + \frac{1157}{1200} \right] = 2,34 \text{ sec.}$$

d'où

$$a = \frac{2 \times 1420}{2,34} = 1214 \text{ m./sec.}$$

valeur qui coïncide assez exactement avec celle mesurée de 1230 m. correspondant à $\frac{2L}{a} = 2,31$, d'après les indications du *Bulletin technique de la Suisse romande*, du 25 janvier 1910. Nous admettrons ces derniers chiffres dans les calculs qui suivent. Lors des essais une seule des branches inférieures débitait.

Fermeture en 2 secondes d'un débit de 150 litres/sec. à 0 litre. — Vitesse moyenne $\sum \frac{(lv)}{L} = 0,46$ m. La formule (11) pour fermeture totale brusque donne immédiatement $Y_m - Y_0 = 57,6$ m., surpression qui serait encore augmentée de 1 à 2 m. correspondant à la perte de charge inhérente au débit de 150 lit./sec.

Fermeture de 493 litres/sec. en 8 sec. — La vitesse moyenne à introduire dans les formules, calculée comme ci-dessus, ressort à 1,50 m. Il en résulte : $\frac{a V_0}{g} = 188$ m., soit $\frac{a V_0}{2g} = 94$ m., et $\frac{L V_0}{g T} = 27,14$ m. et la formule (14) donne immédiatement pour le premier maximum au temps 2,31 sec. :

$$Y_i - Y_0 = 2 \times 27,14 \left[\frac{720}{720 + 94 - 27} \right] = 49,6 \text{ m.,}$$

surpression qui sera relevée encore d'environ 5 mètres eu égard à la diminution de perte de charge.

Le contre-coup de bélier moyen donné par la formule (5), devrait être :

$$Y_2 - Y_0 = 27,14 \times 1,019 = 27,65 \text{ m.}$$

surpression qui sera relevée encore d'environ 10 mètres eu égard à la suppression de la perte de charge.

Mais cette surpression est en fait une moyenne d'oscil-

lations, tandis que s'il s'agit de déterminer l'amplitude d'oscillation précédant la fermeture, on peut procéder comme suit :

Au temps $t = \frac{4L}{a} = 4,62$ sec. la formule (17 bis) donne une surpression de :

$$Y - Y_0 = \frac{\frac{188 \times 4,62}{8} - 2 \times 49,6}{1 + \frac{94(8 - 4,64)}{720 \times 8}} = \frac{108,56 - 99,2}{1 + 0,055} = 8,89 \text{ m.}$$

Au temps $\frac{6L}{a} = 6,93$ on aura de même

$$Y - Y_0 = \frac{162,84 - 2(49,6 + 8,89)}{1,02} = 45 \text{ m.}$$

La formule (17 ter) donnerait directement le même résultat pour l'amplitude minimum $Y_4 - Y_0$ et (17 quarto) pour l'amplitude maximum $(Y_6 - Y_0)$ précédant la fermeture.

On remarquera que la moyenne de ces deux oscillations est une surpression moyenne de 26,95 m., se rapprochant donc déjà sensiblement de la valeur ci-dessus de 27,65 m. calculée d'après l'équation (5).

L'amplitude maximum de 45 m. augmentée encore d'environ 10 m. eu égard à la disparition de la perte de charge correspondrait donc à une élévation totale de la pression de 720 à 775 m. se présentant 1,07 sec. avant la fermeture complète, tandis que nous avons vu plus haut qu'au temps $\frac{2L}{a} = 2,31$ m./sec. cette pression aurait dépassé la pression de régime de 49,6 m. + environ 5 m. de diminution de perte de charge, soit 54,6 m.

Les deux maximum, grâce à la diminution de perte de charge, sont donc dans ce cas particulier sensiblement égaux.

Dans cet exemple de Viège les surpressions ainsi calculées dépassent celles mesurées, ce qui doit être attribué en grande partie aux ondes secondaires mentionnées plus haut et résultant de la deuxième conduite.

A titre de comparaison avec les résultats obtenus d'après la formule plus rigoureuse d'Alliévi N° 14, il est intéressant de remarquer qu'au temps $\frac{2L}{a}$ elle donnerait exactement après y avoir posé

$$H = 720 + 188 = 908$$

et

$$K = \frac{1,50}{\sqrt{2gY_0}} \frac{(8 - 2,31)}{8}, \quad \text{soit} \quad \frac{aK^2}{g} = 12,42.$$

$$Y - Y_0 = 769,74 - 720 = 49,74 \text{ m.}$$

au lieu des 49,6 m. calculés d'après la formule simplifiée (14).

Quant à l'ouverture brusque de 150 lit./sec. en 2 sec. elle donnerait lieu d'après l'équation (12) à une dépression de 55 m. et le premier contre-coup correspondant, au temps

$t = 2,31 + 2,31 = 4,62$ sec., serait d'après la formule (22) égal à + 51 m.

Nous avons vu plus haut que le *maximum de ce contre-coup positif* résultant d'une ouverture brusque se présentait pour une réduction de vitesse de $\frac{0,6gY_0}{a}$, soit pour $aV_i = 0,6Y_0$, soit dans le cas de Viège pour $\frac{aV_i}{g} = 432$ m., c'est-à-dire $V_i = 3,45$. La dépression résultant d'une telle ouverture brusque serait donnée par la formule (12) à $\frac{432}{1,3} = 332,5$ et le premier contre-coup suivant, positif, résulterait de la formule (22) à + 179 m., soit 24,8 % au lieu des 22,8 % énoncés plus haut.

Nous rappelons à cet égard que nous disions que notre formule (22) donnait le maximum du contre-coup d'ouverture brusque à 25 % de la pression normale Y_0 , soit ici à 180 m., pour une vitesse de $\frac{2gY_0}{3a}$, soit ici 3,83 m.-sec. (au lieu des 3,45 m. ci-dessus), la dépression le précédant étant $\frac{Y_0}{2} =$ ici à 360 m. au lieu des 332,5 ci-dessus ; la différence avec le chiffre énoncé provient des simplifications apportées dans l'établissement des formules préconisées dans cette étude et dont les limites permises sont indiquées plus haut.

On remarquera que bien que le dernier exemple de coup brusque d'ouverture et de son contre-coup positif touche précisément à ces limites, les résultats obtenus n'en coïncident pas moins encore d'une manière satisfaisante avec ceux ressortant d'équations plus rigoureuses mais d'une résolution moins rapide.

Le Musée d'Art et d'Histoire de la Ville de Genève.

D'une brochure publiée à l'occasion de l'inauguration du musée par son Directeur général, M. A. Cartier, le 15 octobre dernier, nous extrayons les lignes suivantes :

Le Musée d'Art et d'Histoire a permis à la Ville de Genève d'installer comme il convenait les collections qui, lentement formées au cours des siècles, constamment accrues par la générosité de nombreux donateurs et depuis une époque plus récente, par des acquisitions régulières, constituent aujourd'hui l'un des plus beaux fleurons de sa couronne.

L'édifice est situé entre les rues Charles-Galland et de Monnetier, d'une part, le boulevard Helvétique et la rue des Casemates, d'autre part ; il forme un quadrilatère régulier d'une superficie de 4400 m² cubant 106 000 m., avec une grande cour intérieure de 840 m², plantée en jardin à la française et égayée par un jet d'eau. Il est tout entier construit à l'extérieur et à l'intérieur, en pierre blanche de provenances très diverses, dont celle de Savonnières (Meuse) est la plus connue. La façade principale est ornée