

Coups de bélier dans les conduites: résultats d'essais et vérification expérimentale des théories de M. Alliévi

Autor(en): **Neeser, R.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **36 (1910)**

Heft 1

PDF erstellt am: **26.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-81405>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Bulletin technique de la Suisse romande

ORGANE EN LANGUE FRANÇAISE DE LA SOCIÉTÉ SUISSE DES INGÉNIEURS ET DES ARCHITECTES — PARAISSANT DEUX FOIS PAR MOIS

RÉDACTION : Lausanne, 2, rue du Valentin. P. MANUEL, ingénieur et D^r H. DEMIERRE, ingénieur.

SOMMAIRE : *Coups de bélier dans les conduites*, par M. R. Neeser, ingénieur. — *Le Royal Hôtel, à Lausanne*. — Programme du concours pour deux stations-abris, à Genève. — Société fribourgeoise des ingénieurs et architectes : Séances des 26 novembre et 10 décembre 1909. — Société suisse des ingénieurs et architectes : Circulaire du Comité central aux Sections. — *Bibliographie*.

Coups de bélier dans les conduites.

Résultats d'essais et vérification expérimentale des théories de M. Alliévi,

par M. R. NEESER, ingénieur,
professeur à l'École d'ingénieurs de l'Université de Lausanne.

M. Alliévi, ingénieur, à Rome, a publié en 1904, dans la *Revue de Mécanique*, une « Théorie générale du mouvement de l'eau dans les conduites », étude qui constitue indiscutablement la plus complète et la plus élégante des solutions actuelles de cet important problème.

Ces remarquables travaux sont aujourd'hui bien connus des techniciens que ces questions intéressent ; il serait donc parfaitement oiseux d'en refaire ici l'exposé. Nous rappellerons toutefois, parce que l'occasion se présentera tout à l'heure de revenir sur ces points que, lors de l'établissement de l'équation différentielle du mouvement varié de l'eau dans une conduite, M. Alliévi tient compte :

1° de la compressibilité du liquide,

2° de l'élasticité des parois de la conduite qu'il suppose de diamètre et d'épaisseur constants et faite d'un matériel homogène.

L'auteur néglige, par contre, l'influence de la perte de charge due au frottement de l'eau sur les parois de la conduite.

Il nous semble qu'il serait fort désirable, étant donnée l'énorme importance technique des travaux d'Alliévi, que des essais nombreux et variés, exécutés avec soin et méthode, soit dans des laboratoires, soit sur des conduites industrielles, vissent apporter à ces théories la consécration des faits et des chiffres et leur fournir, si possible, des éléments nouveaux de développement et de perfectionnement. Le silence presque complet de la littérature technique à cet égard s'explique, en partie du moins, par le fait que les laboratoires techniques ne sont pas toujours outillés dans ce but, tandis que les entreprises industrielles sont, lorsque, par hasard, les exigences du service le permettraient, rarement disposées à prêter leur matériel à des essais de cette nature.

L'auteur de ces lignes ayant eu, en 1906, l'occasion d'expérimenter sur une conduite de grandes dimensions

alimentant des turbines Pelton, réussit alors à enregistrer automatiquement quelques coups de béliers créés intentionnellement et dans des conditions bien déterminées, qui confirmèrent de brillante façon les théories d'Alliévi.

En outre, la *Maison Piccard, Pictet et C^{ie}*, à Genève, a bien voulu communiquer au soussigné les résultats de toute une série d'essais analogues exécutés, en juin 1909, par ses ingénieurs sur les conduites de l'Usine de l'Acker-sand, près de Viège.

La communication de ce dossier et la comparaison des résultats expérimentaux avec ceux de la théorie est capable, croyons-nous, d'intéresser les lecteurs de cette Revue. Nous exprimerons ici à M. Léon Dufour, ingénieur, directeur de la Maison Piccard, Pictet et C^{ie}, qui n'a pas hésité à nous communiquer les résultats originaux des essais de Viège, nos remerciements les plus sincères.

A. ESSAIS DE 1906

Les données caractéristiques de la conduite qui servit aux essais sont les suivantes :

Longueur totale	970 m.
Chute	345 m.
Diamètres intérieurs	de 0,930 à 0,820 m.
Épaisseurs des tôles	de 4 à 23 mm.

Cette conduite était en tôles d'acier, rivée sur toute sa longueur.

Essai N° 1.

Désignons par :

L , la longueur totale de la conduite,

d , le diamètre d'un tronçon de conduite d'épaisseur et de diamètre constants,

δ , l'épaisseur des tôles de ce tronçon,

l , la longueur de ce tronçon,

ϵ , le module de compressibilité de l'eau à la température et à la pression de l'essai,

E , le module d'élasticité des tôles de la conduite,

g , la gravité,

γ , le poids spécifique de l'eau.

On sait que la vitesse a , avec laquelle les variations de pression créées en un point quelconque du tronçon de con-

duite considéré se transmettent le long de ce tronçon, est donnée par :

$$a = \sqrt{\frac{g}{\gamma}} \times \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{E} \cdot \frac{d}{\delta}}}$$

Mais, si la conduite est en tôle rivée, de diamètre et d'épaisseur variables, il y a lieu de remplacer dans l'expression de a , le terme $\frac{d}{\delta}$ par sa valeur moyenne :

$$\left(\frac{d}{\delta}\right)_{\text{moyen}} = \frac{D}{A} = \varphi \times \frac{1}{L} \times \Sigma \left(l \times \frac{d}{\delta}\right),$$

où φ désigne un facteur de correction devant tenir compte de l'augmentation de rigidité des tôles, due à l'influence des rivures¹, et le signe

Σ s'étend à la totalité des tronçons de la conduite.

On obtient ainsi :

$$a = \sqrt{\frac{g}{\gamma}} \times \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{E} \cdot \frac{D}{A}}}$$

Or, Alliévi démontre que, dans le cas d'un coup de bélier dû à la fermeture d'une vanne, la pression derrière celle-ci prend, dès que la vanne est complètement fermée, et à partir du temps

¹ On peut tenir compte de l'influence des rivures en supposant que l'excédent de matériel provenant des rivures circulaires et longitudinales d'un tronçon de longueur l et d'épaisseur δ , se répartisse uniformément sur toute la surface cylindrique du tronçon considéré, de façon à réaliser un élément de conduite de même longueur, même diamètre intérieur et même poids, mais sans rivures ; l'épaisseur δ' de ce tronçon serait naturellement plus grande que δ et l'on aurait alors :

$$\frac{D}{A} = \frac{1}{L} \times \Sigma \left(l \frac{d}{\delta'}\right) \quad \text{ou bien, si}$$

$$\varphi = \frac{\Sigma \left(l \frac{d}{\delta'}\right)}{\Sigma \left(l \frac{d}{\delta}\right)},$$

$$\frac{D}{A} = \varphi \cdot \frac{1}{L} \cdot \Sigma \left(l \frac{d}{\delta}\right).$$

$$T = \frac{2L}{a},$$

compté en prenant le début du mouvement de fermeture comme origine, l'allure d'une oscillation périodique qui jouit des propriétés suivantes :

1° la période d'oscillation est indépendante de la nature du mouvement de fermeture ; elle est toujours égale à

$$T = \frac{4L}{a};$$

2° ces oscillations ne sont pas amorties quelle que soit d'ailleurs la nature du mouvement de fermeture ;

3° l'amplitude, ainsi que la forme des oscillations sont, par contre, fonctions de l'allure du mouvement de fermeture.

Nous avons réussi à enregistrer cette phase du coup de bélier de fermeture, au moyen d'un dispositif de fortune, composé d'un manomètre enregistreur de Richard frères, dont le tambour, préalablement isolé du mouvement d'horlogerie destiné à le mouvoir, était entraîné par un tachygraphe de Horn. Le tambour de ce dernier appareil, animé d'une vitesse constante de 4,8 mm. par seconde était relié au tambour du manomètre par une ficelle d'indicateur.

Les variations de pression créées dans la conduite par la manœuvre de l'injecteur de l'une des turbines sont fidèlement reproduites par la figure 1.

On constate par ce graphique que, $\frac{2L}{a}$ secondes après la fermeture complète de l'injecteur, la pression varie effectivement suivant les ordonnées d'une courbe oscillatoire, à amplitude constante.

La période d'oscillation T , mesurée au chronographe, variait entre 3 et $\frac{3}{5}$ et 3 et $\frac{4}{5}$ de secondes ; elle était donc de 3,7 sec. environ. Déterminée au moyen du graphique même, sur lequel une période est mesurée par 17,16 mm., on trouve, la vitesse d'entraînement du tambour ayant été de 4,8 mm. par seconde,

$$T = \frac{17,16}{4,8} = 3,57 \text{ sec.}$$

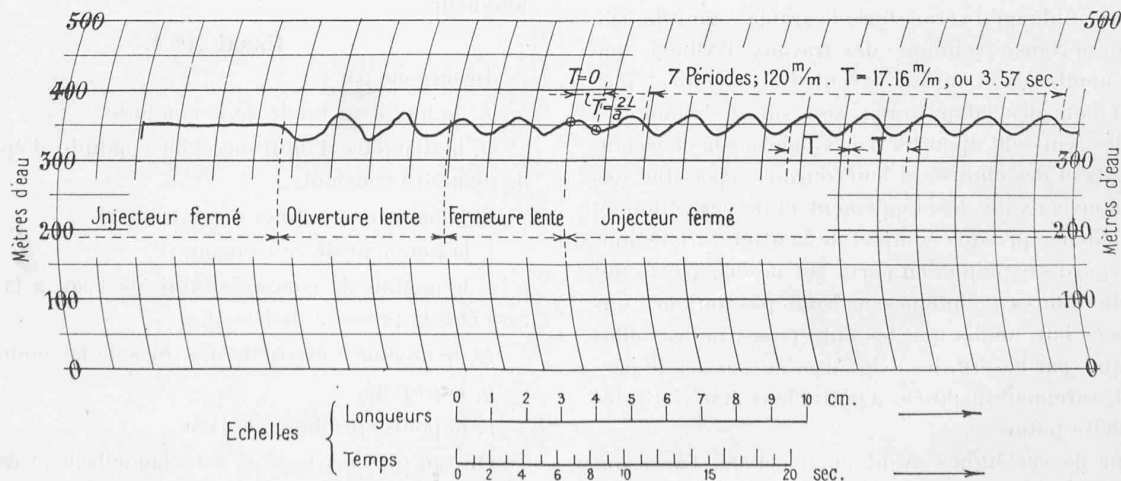


Fig. 1.

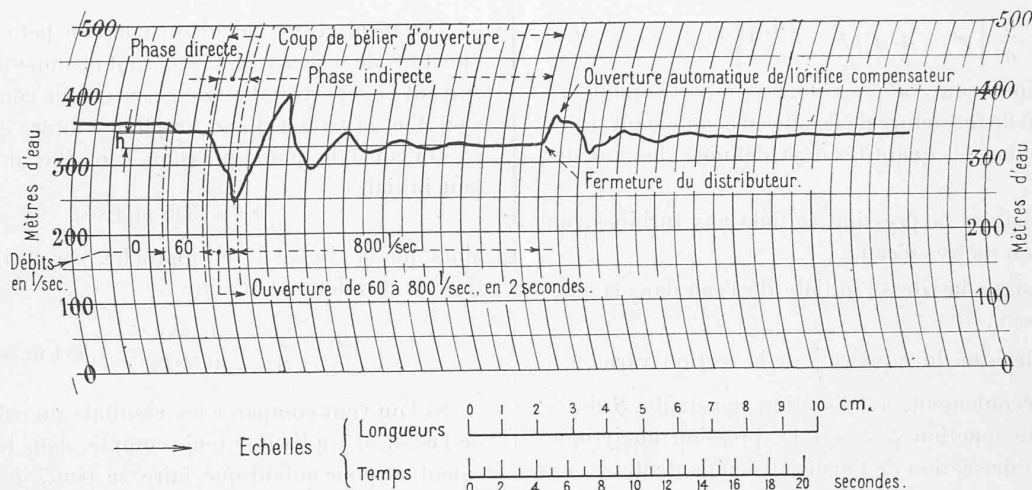


Fig. 2.

La différence entre les deux valeurs est donc peu importante; on peut admettre, en conséquence, que la valeur mesurée de la période d'oscillation est de :

$$T = \frac{3,7 + 3,57}{2} = 3,65 \text{ secondes.}$$

Or, d'après Alliévi, cette période doit être égale à

$$T = \frac{4L}{a};$$

mais,

$$L = 970 \text{ m.,}$$

$$g = 9,81 \text{ m./sec.}^2,$$

$$\gamma = 1000 \text{ kg./m}^3,$$

$$\frac{D}{d} = 94,5,$$

$$\epsilon = 2,1 \times 10^8 \text{ kg./m}^2 \text{ (1)},$$

$$E = 2,15 \times 10^{10} \text{ kg./m}^2 \text{ (pour l'acier doux);}$$

il en résulte :

$$a = 1035 \text{ m./sec.,}$$

et, par conséquent :

$$T = \frac{4L}{a} = \frac{4 \times 970}{1035} = 3,75 \text{ secondes.}$$

La différence entre les valeurs calculée et mesurée de la période d'oscillation est donc de :

$$\Delta T = 3,75 - 3,65 = 0,10 \text{ sec.,}$$

soit de $\Delta T = 2,7\%$ environ.

Cet essai réalise un moyen aussi simple que précis de mesurer et de contrôler la valeur de la vitesse de transmission des ondes le long de la conduite.

Essai N° 2.

La figure 2 est la reproduction exacte d'un coup de bélier d'ouverture, créé dans la conduite par l'ouverture

(1) M. Amagat a publié dans les *Annales de Chimie et de Physique*, 1893, un tableau des valeurs de $\frac{1}{\epsilon}$ pour l'eau, duquel nous extrayons les chiffres suivants :
 Température de l'eau en degrés centigrades: 0° 20° 50° 100°
 $\frac{1}{\epsilon} \times 10^4$, en cm²/kg. = 0,511 0,468 0,449 0,478

complète, en deux secondes, du distributeur de l'une des turbines et relevé au moyen du dispositif utilisé pour l'essai N° 1. Le débit de la conduite fut, de cette façon, porté de 60 l./sec. à 800 l./sec.

L'enregistrement de ce coup de bélier dura 20 secondes; au bout de ce temps, d'ailleurs suffisant pour recueillir toute la phase intéressante du phénomène, le distributeur de la turbine dut être fermé afin d'éviter un emballement trop considérable de la turbine. Le coup de bélier de fermeture qui se produisit alors présente ceci d'intéressant, c'est que l'on y remarque l'action de l'orifice compensateur dont les turbines étaient munies et qui, agissant avec un retard de 0,5 sec. à peine, coupe la courbe ascendante de la pression.

Nous ne nous occuperons d'ailleurs ici que du coup de bélier d'ouverture, le seul qui ait été créé intentionnellement et dans des conditions connues.

On sait que les valeurs Y de la pression, en mètres d'eau, derrière la vanne de fermeture, pendant la phase de régime troublé qui suit le début de la variation de section de l'orifice d'écoulement, sont données par les équations :

$$Y^2 - 2Y \left[Y_0 + a \frac{V_0}{g} + a^2 \frac{\psi^2(t)}{g} \right] + \left[Y_0 + a \frac{V_0}{g} \right]^2 = 0$$

pour la phase directe du coup de bélier, soit pour :

$$t \leq \frac{2L}{a} \quad \text{et,}$$

$$Y^2 - 2Y \left[Y_0 + a \frac{V_0}{g} - 2F \left(t - \frac{2L}{a} \right) + a^2 \frac{\psi^2(t)}{g} \right] + \left[Y_0 + a \frac{V_0}{g} - 2F \left(t - \frac{2L}{a} \right) \right]^2 = 0$$

pour la phase indirecte du coup de bélier, soit pour :

$$t \geq \frac{2L}{a},$$

alors que la vitesse, V , de l'eau dans la conduite est donnée par :

$$V = V_0 - \frac{g}{a} \times F(t), \quad \text{si } t \leq \frac{2L}{a}$$

$$V = V_0 - \frac{g}{a} \left[F(t) + F\left(t - \frac{2L}{a}\right) \right], \text{ si } t \geq \frac{2L}{a}.$$

Ces équations sont valables pour n'importe quelle loi d'ouverture ou de fermeture de l'orifice d'écoulement. Elles renferment, outre des quantités déjà définies, les valeurs suivantes :

Y_0 , qui désigne la pression initiale aux turbines, au temps $t = 0$, en mètres d'eau,

V_0 , qui désigne la vitesse initiale de l'eau dans la conduite, en m./sec.,

$\psi(t)$, qui désigne le rapport $\frac{S}{S}$ de la section variable s de l'orifice d'écoulement, à la section constante S de la conduite ; cette fonction $\psi(t)$ est l'expression analytique de la variation de section de l'orifice d'écoulement,

$F(t)$ désigne une fonction du temps t , définie par :

Les résultats du calcul du coup de bélier d'ouverture, effectués de 0 sec. à 16,92 sec. sont résumés dans le tableau suivant et reportés, du moins en ce qui concerne la pression Y et la vitesse V , au graphique figure 3.

On constate que la pression Y oscille autour de sa valeur initiale

$$Y_0 = 345 \text{ mètres,}$$

alors que la vitesse V se rapproche, par oscillations amorties, de la valeur de régime

$$V' = \frac{Q}{S} = \frac{0,800}{0,5945} = 1,354 \text{ m./sec.}$$

Si l'on veut comparer les résultats du calcul avec ceux de l'essai, il y a lieu de tenir compte, dans les résultats du calcul, et pour autant que faire se peut, de l'influence de la perte de charge sur l'allure du coup de bélier. Or, la

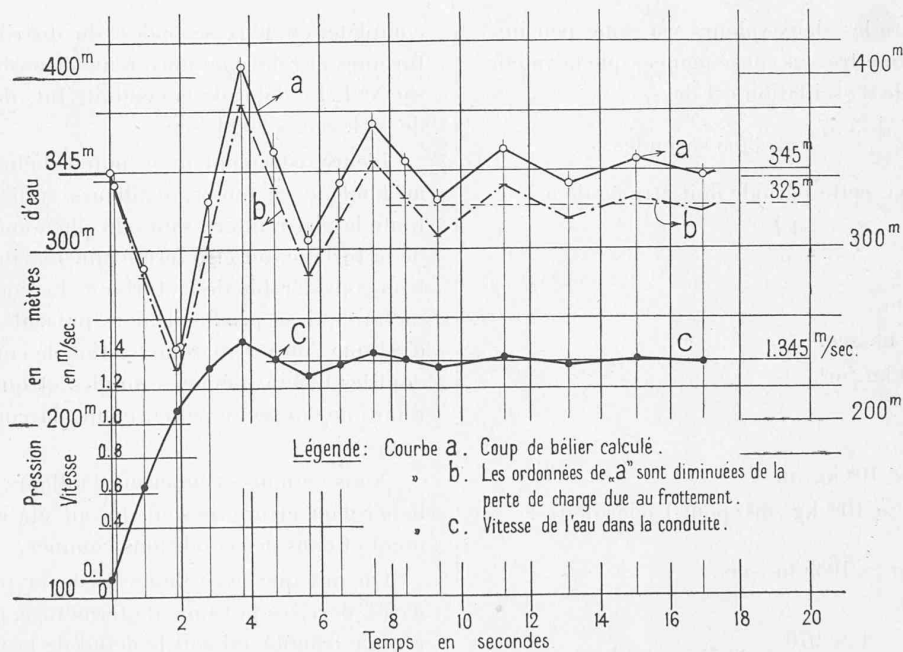


Fig. 3.

$$F(t) = Y - Y_0 \quad \text{si } t \leq \frac{2L}{a} \text{ et}$$

$$F(t) = Y - Y_0 - F\left(t - 2\frac{L}{a}\right) \quad \text{si } t \geq \frac{2L}{a}.$$

Introduisons les valeurs numériques suivantes :

$$Y_0 = 345 \text{ mètres,}$$

$$V_0 = \frac{Q_0}{S} = \frac{0,060}{\frac{\pi}{4} \times 0,872^2} = 0,009 \text{ m./sec.,}$$

$$S = \frac{\pi}{4} \times 0,872^2 = 0,5945 \text{ m}^2,$$

$\psi(t) = 0,00123 + 0,0076 \times t$, expression obtenue en tenant compte que le temps d'ouverture de l'injecteur de la turbine était de 2 secondes et en admettant, — hypothèse satisfaite avec une grande approximation, — que la loi d'ouverture ait été une fonction linéaire du temps.

figure 2 permet de reconnaître qu'entre la pression de régime à l'allure de 60 litres-seconde et la pression de régime au débit de 800 litres-seconde, il y a une différence de 20 m. environ. Cette différence provient justement de l'accroissement de perte de charge due à l'augmentation de débit. On sait que cette perte de charge est sensiblement proportionnelle au carré de la vitesse de l'eau, soit à V^2 ; nous pourrions donc tenir compte de cette perte de charge en diminuant les ordonnées de la courbe des pressions (courbe a, fig. 3) de la quantité $20 \times \frac{V^2}{1,35^2}$, et nous servir, dans ce but, de la courbe des vitesses (courbe c, fig. 3).

C'est ainsi qu'ont été obtenues les ordonnées de la courbe b (fig. 3) que nous allons comparer avec le coup de bélier enregistré.

Pour faciliter cette comparaison, nous avons porté, à l'échelle convenable cela va sans dire, la courbe b de la

t	Δt	$\psi(t)$	$a^2 \times \psi^2(t)$	$F(t)$	$F\left(\frac{-L}{t+2\frac{L}{a}}\right)$	Y	V	N. B.	
secondes		mètres						m./sec.	
0		0.00123	0.1649	0	0	345.0	0.101		
0.94	0.94	0.00837	7.6362	- 55.6	0	289.4	0.628		
1.88	0.94	0.01551	26.214	-102.0	0	293.0	1.069		
2.82	0.94	0.01643	29.423	- 72.7	- 55.6	327.9	1.318	Injecteur fermé au temps $t = 2$ sec.	
3.76	0.94	"	"	- 41.8	-102.0	405.2	1.464		
4.70	0.94	"	"	- 61.4	- 72.7	356.3	1.373		
5.64	0.94	"	"	- 81.6	- 41.8	305.2	1.271		
6.58	0.94	"	"	- 68.9	- 61.4	337.5	1.336		
7.52	0.94	"	"	- 55.4	- 81.6	371.1	1.400		
8.46	0.94	"	"	- 64.0	- 68.9	349.9	1.361		
9.40	0.94	"	"	- 72.8	- 55.4	327.6	1.317		
11.28	1.88	"	"	- 61.4	- 72.8	356.4	1.373		
13.16	1.88	"	"	- 68.9	- 61.4	337.5	1.336		
15.04	1.88	"	"	- 64.0	- 68.9	349.9	1.360		
16.92	1.88	0.01643	29.423	- 67.2	- 64.0	341.8	1.346		
0.12		0.00214	0.4991	- 7.7	0	337.3	—		
2.00	1.88	0.01643	29.423	- 93.8	0	243.5	—	Injecteur fermé.	

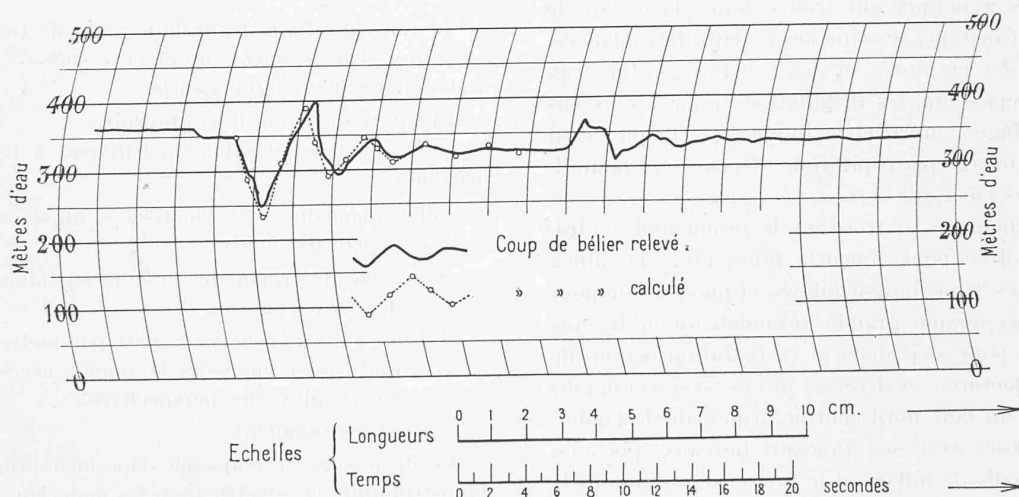


Fig. 4.

figure 3 sur le graphique relevé au manomètre enregistreur (voir fig. 4).

La coïncidence entre les résultats du calcul et le coup de bélier enregistré est, ici aussi, tout à fait remarquable. Le léger décalage des ondes de pression Nos 2, 3 et 4 peut fort bien provenir de l'imperfection avec laquelle se faisait l'entraînement du tambour du manomètre, relié au tachygraphe à vitesse constante, non pas au moyen d'une commande rigide mais, comme nous l'avons dit plus haut, par une ficelle d'indicateur, dispositif qui ne réalise naturellement pas le synchronisme parfait entre les mouvements des deux tambours. [Nous ferons remarquer, à l'appui de cette hypothèse que ce décalage disparaît pour les ondes suivantes.

(A suivre).

Le Royal Hôtel, à Lausanne.

(Pl. 1).

Architectes : MM. C. MAUERHOFER, A. VAN DORSSEER et C. F. BONJOUR.

Le Royal Hôtel comprend environ 150 chambres de maîtres avec cabinet de toilette, 64 chambres de bains ainsi que tous les locaux nécessaires pour le service d'un hôtel de premier rang.

Il est la propriété d'une Société anonyme dont le Conseil d'administration est composé de MM. Rochat, notaire, président; de Weiss, avocat, secrétaire; Kælin-Archinard, à Morgins; A. Bizot, propriétaire, à Lausanne; C. Maur-