Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande

Band: 57 (1931)

Heft: 25

Artikel: Répartition du coup de bélier le long d'une conduite hydraulique en pression

Autor: Bois, L. du

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-44180

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

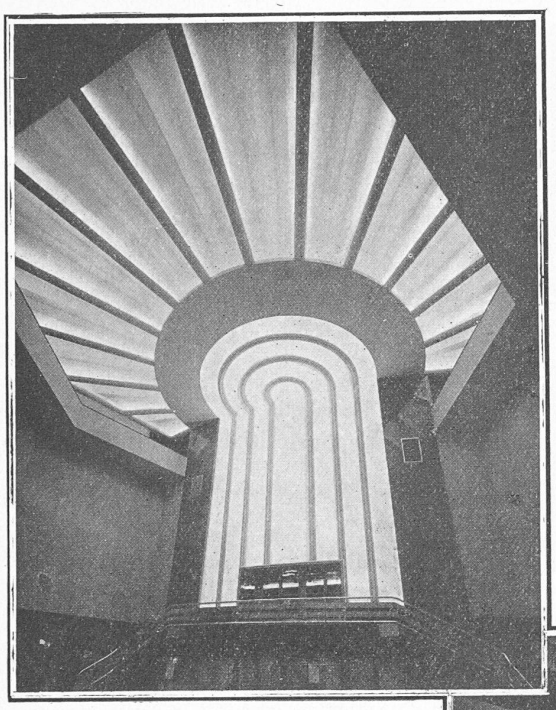
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées 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: 05.08.2025

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



de 60 W dans les cercles, 310 lampes (dont 180 de 60 W, 40 de 80 et 90 de 100 W) dans les montants verticaux, 52 lampes de 100 W dans les départs des rayons.

De plus, au départ de chaque rayon ont été placés quatre réflecteurs en verre argenté destinés à éclairer plus fortement la partie centrale.

Promenoir. L'éclairage du promenoir ceinturant la salle est réalisé au moyen de caissons approximativement rectangulaires, équipés avec des lampes « perles » de 16 watts. Ces lampes n'ont pu être placées dans des appareils, l'encombrement des corniches ne le permettant pas.

Accès aux balcons et Bar. L'accès aux balcons et le bar (fig. 4) sont éclairés au moyen de coupoles à deux étages dans les gorges desquelles sont placées des lampes de 25 W, espacées de 25 cm ; de plus des bandes cannelées en staff ayant des ondulations verticales sont éclairées par des lampes « perles » de 25 watts et donnent une curieuse impression de verre dépoli.

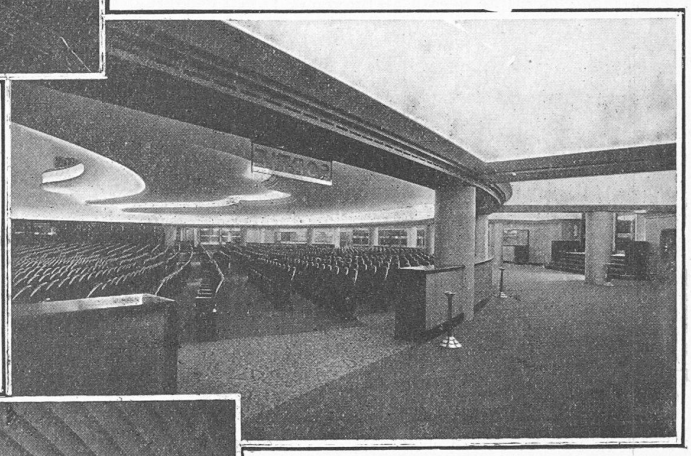
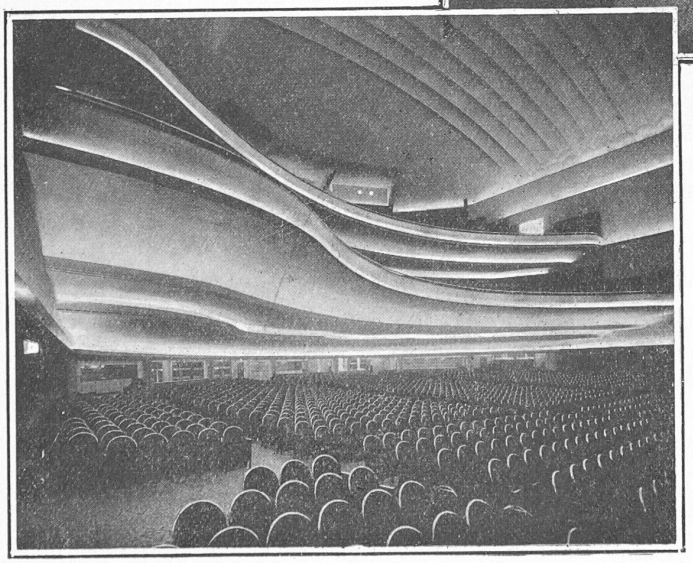


Fig. 5 (en haut).
Le hall éclairé par des gorges lumineuses.

Fig. 6 (à droite). — Le promenoir.

Fig. 7 (en bas).
Les fauteuils d'orchestre, on distingue les corniches disposées sous les balcons.

Photos Gravot.



18 m ; la surface de celui-ci a été étudiée pour obtenir des gorges verticales et des gorges horizontales d'égale brillance, et dont l'éclairement décroît au fur et à mesure qu'elles sont plus éloignées du centre.

La répartition des puissances est, pour le hall, la suivante : 598 lampes de 40 W dans les rayons, 190 lampes

Sous-station.

L'éclairage de la sous-station a été réalisé au moyen de surfaces de révolution d'égale brillance qui donnent un excellent éclairement sur le plan vertical des tableaux de distribution.

Répartition du coup de bélier le long d'une conduite hydraulique en pression

par M. L. DU BOIS, ingénieur.

(Suite.[1]*)*

Expression du coup de bélier.

Si nous partons maintenant de la formule Alliévi pour le coup de bélier dû à une fermeture instantanée

$$\beta = \frac{a.v}{g}$$

et en faisant usage de la relation que nous venons d'établir :

[1] Voir *Bulletin technique* du 28 novembre 1931, page 301.

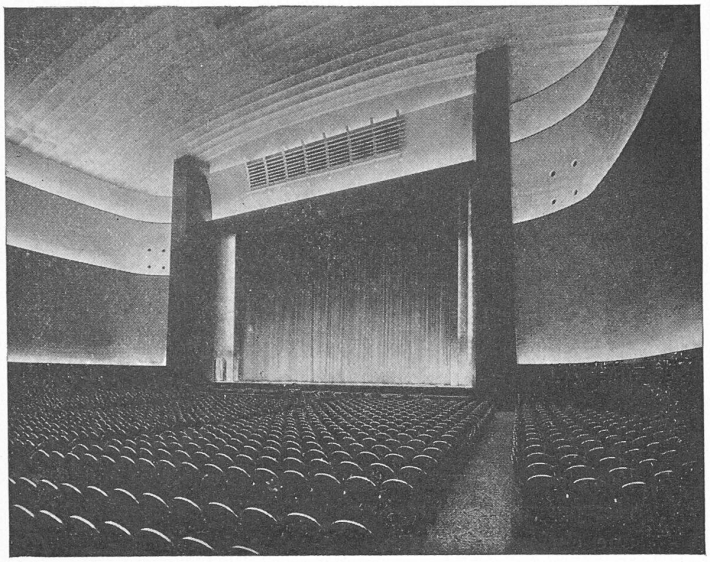


Fig. 8. — Eclairage général de la salle au moyen de trois corniches.
Photo Gravot.

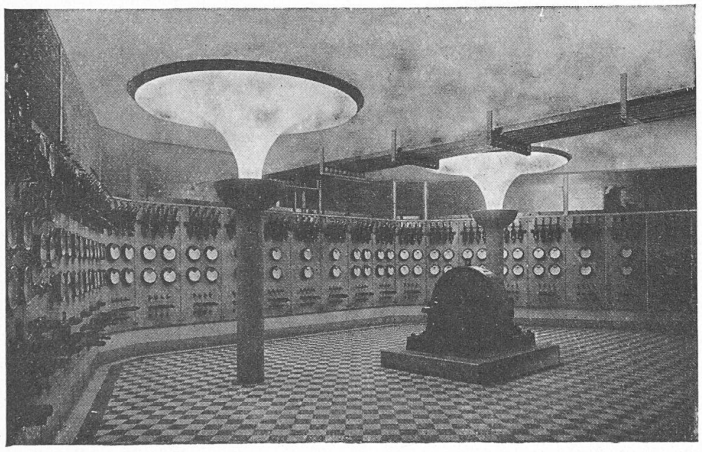


Fig. 9. — La sous-station éclairée par surfaces diffusantes.
Photo Gravot.

$$t' = \frac{L}{a} = \sqrt{\frac{Ll}{gh}}$$

nous obtenons :

$$\beta = \frac{a\varphi}{g} = \frac{L}{\sqrt{\frac{L.l}{gh}}} \cdot \frac{\varphi}{g} = \varphi\sqrt{\frac{L.h}{gl}}$$

C'est bien la formule Michaud pour le coup de bélier dû à une fermeture instantanée telle que nous l'avons obtenue plus haut.

Cette seconde formule a été établie par Michaud sans passer par la notion de la vitesse de propagation de l'onde.

Un exemple numérique ne sera pas de trop pour montrer que les résultats que l'on obtient sont bien les mêmes avec les deux formules.

Prenons la conduite de Fully, par exemple ; supposons un diamètre constant de 0,55 m ; une longueur de 4650 m, une pression au point bas de 1630 m et une épaisseur de tôle moyenne de 26 mm. Nous admettrons une vitesse φ avant la fermeture de 1 m/s.

Avec la formule Alliévi nous avons :
vitesse de propagation de l'onde :

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48{,}3 + \frac{0{,}5\,.\,0{,}55}{0{,}026}}} = 1290 \text{ m/sec.}$$

Coup de bélier

$$\beta = \frac{a\varphi}{g} = \frac{1290\,.\,1}{9{,}81} = 131 \text{ m.}$$

Pour appliquer la formule Michaud, nous déterminons tout d'abord la fatigue moyenne du métal :

$$\sigma = \frac{81{,}5\,.\,55}{2\,.\,2{,}6} = 862 \text{ kg/cm}^2 \text{ ou } 8{,}62 \text{ kg/mm}^2$$

Chambre élastique d'après l'expression indiquée plus haut :

$$l = \frac{4650}{10\,000}\left[8{,}62 + \frac{1630}{40}\right] = 23{,}0 \text{ m.}$$

Coup de bélier :

$$\beta = \varphi\sqrt{\frac{Lh}{2gl}} = 1\sqrt{\frac{4650\,.\,1630}{2\,.\,9{,}81\,.\,23}} = 129{,}5 \text{ m.}$$

Nous avons dû mettre le chiffre 2 au dénominateur de la fraction pour nous conformer à l'hypothèse de l'égale répartition de la chambre élastique, comme nous l'avons déjà fait voir. Les deux résultats concordent à très peu de chose près. La petite différence provient des deux chiffres quelque peu différents adoptés pour le coefficient de compressibilité de l'eau.

Cela nous confirme que l'expression du coup de bélier instantané

$$\beta = \varphi\,.\sqrt{\frac{L.h}{2gl}}$$

due à M. Michaud, est bien la même que l'expression :

$$\beta = \frac{a\varphi}{g}$$

due à Alliévi (ou Joukowski).

Conduite à diamètre variable.

Dans l'établissement de nos formules, nous n'avons jusqu'à maintenant pas eu besoin de tenir compte du diamètre de la conduite parce que celui-ci était supposé constant.

Si maintenant nous voulons considérer une conduite composée de plusieurs tronçons de différents diamètres nous raisonnerons comme suit :

Dans l'équation générale où nous égalons d'une part la force vive de la masse liquide et d'autre part le travail produit par la surpression, nous aurons tout d'abord pour la force vive non plus simplement

$$\frac{1}{2}\,\frac{L}{g}\,\varphi^2$$

mais

$$\frac{1}{2g} \Sigma \left(L' d^2 \rho^2\right)$$

L' s'appliquant ici aux longueurs des différents tronçons, et ρ aux vitesses de l'eau dans chacun de ces tronçons

Nous tiendrons compte de la même façon des différences de diamètres en mettant au lieu de la chambre élastique totale l la valeur $\Sigma\,(l'\,d^2)$; l' désignant de même ici les longueurs des chambres élastiques des différents tronçons.

Nous arrivons alors pour le coup de bélier à l'expression

$$\beta = \sqrt{\frac{h\,\Sigma\,(L'\,d^2\,\rho^2)}{g\,\Sigma\,(l'\,d^2)}}$$

Pour calculer le coup de bélier en un point quelconque de la conduite, on divisera la longueur totale en un nombre n de tronçons égaux ; h désignera alors chaque fois la pression au point milieu du tronçon.

Nous avons appliqué cette formule très simple à la conduite de Fully et nous allons donner quelques explications à ce sujet.

La figure 5 représente le profil de la conduite qui se compose d'un tronçon supérieur de 0,60 m de diamètre et de 2300 m de longueur et d'un tronçon inférieur de 0,50 m de diamètre et 2350 m de longueur.

Les épaisseurs de tôle varient de 6 à 41 mm ; les petits cercles simples désignent les extrémités des tronçons d'égale épaisseur. Le tronçon de 0,60 m de diamètre a été divisé en 10 parties de 230 m de longueur chacune et le tronçon inférieur de 0,50 m de diamètre en 10 parties de 235 m de longueur chacune. Cela fait en tout 20 tronçons numérotés à partir du haut, de 1 à 20.

Les milieux de ces tronçons sont figurés par des cercles doubles. Pour chaque tronçon nous avons calculé les longueurs des chambres élastiques que l'on trouvera dans le tableau I, colonne 12.

Les graphiques de la figure 6 montrent la répartition des chambres élastiques suivant la longueur de la conduite, on y trouvera les 4 courbes suivantes :

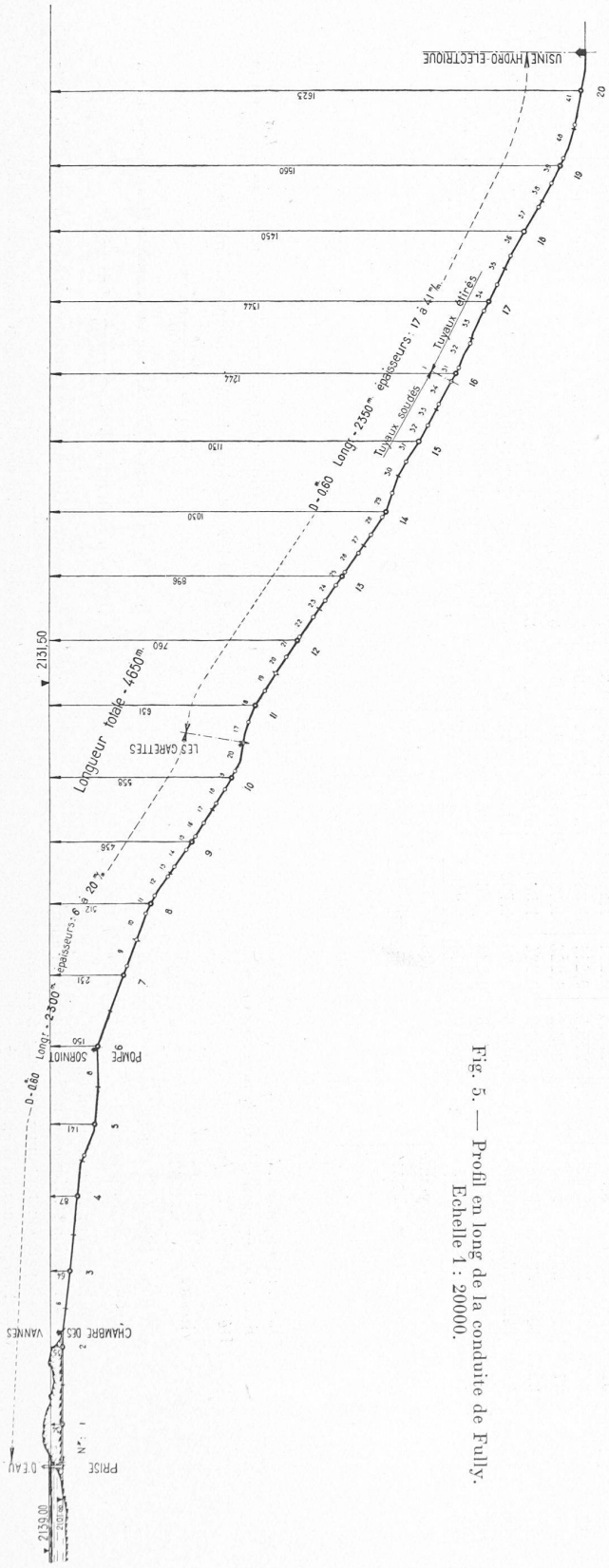
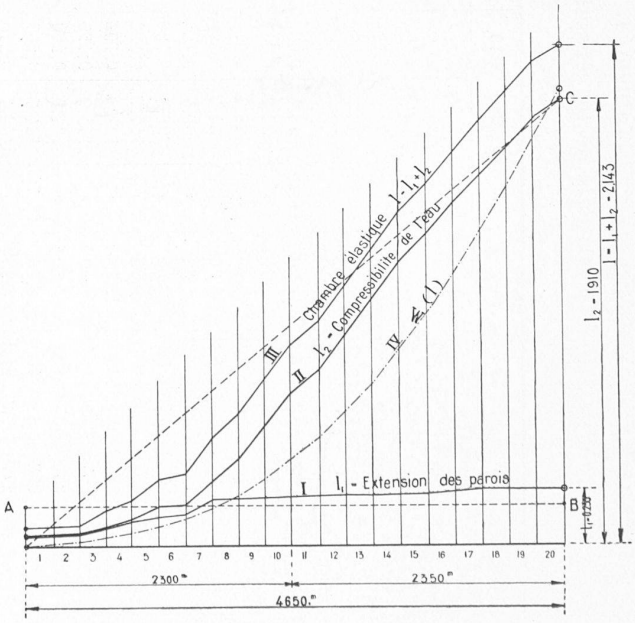


Fig. 5. — Profil en long de la conduite de Fully. Echelle 1 : 20000.



Fr. 6. — Représentation graphique de la chambre élastique suivant la longueur de la conduite.

Tableau I. — Conduite en pression de l'Usine de Fully.

Calculs de la répartition du coup de bélier dû à une fermeture instantanée.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
																Avec chambre d'air.				
N°	Diam. : d m	L m	$\Sigma (L)$ m	h m	e_m mm	σ kg/mm²	$Ld^2\rho^2$	$\Sigma (Ld^2\rho^2)$	l_1 m	l_2 m	$l = l_1 + l_2$ m	$\Sigma (l)$ m	ld^2	$\Sigma (ld^2)$	β m	l' m	$l' d^2$	$\Sigma (l'd^2)$	β' m	$\Delta l = l . \frac{\beta}{h}$ m
1	0,60	230	230	34	6,0	1,70	16,10	16,1	0,039	0,039	0,078	0,078	0,028	0,028	31,6	0,661	0,238	0,238	10,9	0,072
2	»	»	460	35	6,0	1,76	»	32,2	0,041	0,041	0,082	0,160	0,030	0,058	31,6	0,665	0,240	0,478	11,0	0,074
3	»	»	690	64	6,0	3,20	»	48,3	0,074	0,074	0,148	0,308	0,053	0,111	37,8	0,731	0,263	0,741	14,6	0,088
4	»	»	920	87	6,0	4,36	»	64,4	0,100	0,100	0,200	0,508	0,072	0,183	39,6	0,783	0,282	1,023	16,7	0,091
5	»	»	1150	141	8,0	5,30	»	80,5	0,122	0,162	0,284	0,792	0,102	0,285	45,1	0,867	0,312	1,335	20,9	0,091
6	»	»	1380	150	8,0	5,64	»	96,6	0,130	0,173	0,303	1,095	0,109	0,394	43,5	0,886	0,319	1,654	21,3	0,088
7	»	»	1610	231	8,4	8,35	»	112,7	0,192	0,266	0,458	1,553	0,165	0,559	48,8	1,041	0,374	2,028	25,6	0,097
8	»	»	1840	312	11,0	8,48	»	128,8	0,196	0,360	0,556	2,109	0,200	0,759	52,1	1,139	0,410	2,438	29,2	0,093
9	»	»	2070	436	15,2	8,60	»	144,9	0,199	0,502	0,701	2,810	0,252	1,011	56,7	1,284	0,462	2,900	33,3	0,091
10	»	»	2300	558	19,0	8,80	»	161,0	0,203	0,642	0,845	3,655	0,304	1,315	59,3	1,428	0,513	3,413	36,7	0,090
11	0,50	235	2535	631	18,0	8,78	23,7	184,7	0,207	0,740	0,947	4,602	0,237	1,552	62,1	1,543	0,386	3,799	39,7	0,093
12	»	»	2770	760	21,3	8,93	»	208,4	0,210	0,893	1,103	5,705	0,276	1,828	66,5	1,699	0,417	4,216	44,0	0,097
13	»	»	3005	896	25,0	8,96	»	232,1	0,210	1,052	1,262	6,967	0,315	2,143	70,8	1,858	0,464	4,680	47,7	0,099
14	»	»	3240	1030	28,7	8,97	»	255,8	0,211	1,210	1,421	8,388	0,355	2,498	73,3	2,017	0,503	5,183	51,2	0,102
15	»	»	3475	1130	31,5	8,97	»	279,5	0,211	1,330	1,541	9,929	0,385	2,883	75,0	2,137	0,533	5,716	53,1	0,103
16	»	»	3710	1244	32,5	9,60	»	303,2	0,226	1,460	1,686	11,615	0,422	3,305	76,5	2,282	0,571	6,287	55,5	0,104
17	»	»	3945	1344	33,8	9,98	»	326,9	0,234	1,580	1,814	13,429	0,454	3,759	77,0	2,410	0,602	6,889	57,1	0,104
18	»	»	4180	1450	36,2	10,00	»	350,6	0,235	1,700	1,935	15,364	0,484	4,243	78,3	2,531	0,633	7,522	59,0	0,104
19	»	»	4415	1560	39,3	9,95	»	374,3	0,233	1,830	2,063	17,427	0,516	4,759	79,4	2,659	0,665	8,187	60,6	0,106
20	»	»	4650	1623	41,0	9,95	»	398,0	0,233	1,910	2,143	19,570	0,536	5,295	79,2	2,739	0,685	8,872	60,8	0,104
						Moyenne			3,506	16,064	19,570					31,380				
						$\sigma_m = 7,514$				+3,506										
										19,570										

$\Sigma (\Delta l) = 0,874$ m
$v_1 = 0,44$ m/sec
$t_1 = \frac{0,874}{0,44} = 1,985$ sec

$\Sigma (\Delta l) = 1,016$ m
$v_2 = 0,635$ m/sec
$t_2 = \frac{1,016}{0,635} = 1,60$ sec
$t_1 + t_2 = 1,985 + 1,60 = 3,585$ sec
$3,585 = {}^1/_4$ Période
Période calculée $= 4 . 3,585 = 14,34$ sec
Période observée $= 13$ sec.

Légende :

Diam. : tronçon supérieur $d_1 = 0,60$ m $d_1^2 = 0,36$
Diam. : tronçon inférieur $d_2 = 0,50$ m $d_2^2 = 0,25$
Débit admis : 125 l/sec

Vitesses $\begin{cases} v_1 = 0,44 \text{ m/sec} & v_1^2 = 0,194 \\ v_2 = 0,635 \text{ m/sec} & v_2^2 = 0,403 \end{cases}$

Coup de bélier dû à une fermeture instantanée $\beta_i = \sqrt{\frac{h \Sigma (L d^2 v^2)}{2 g . \Sigma (l d^2)}}$

L = Longueur d'un tronçon en m
h = Pression statique au milieu du tronçon en m
e_m = Epaisseur moyenne du tronçon en mm
σ = Fatigue du métal en kg/mm²

l_1 = Chambre élastique due à l'extension des parois $= \frac{L \sigma}{10000}$ en m

l_2 = Chambre élastique due à la compressibilité de l'eau $= \frac{L h}{200000}$ en m

$l = l_1 + l_2$ = Longueur totale de la chambre élastique pour un tronçon de long. : L : $l = \frac{L}{10000} \left[\sigma + \frac{h}{20} \right]$

l' = Longueur de la chambre élastique avec adjonction d'un réservoir d'air.

β' = Coup de bélier après adjonction du réservoir d'air.

Courbe I : Chambres élastiques partielles résultant de l'élasticité des parois l_1.

Courbe II : Chambres élastiques partielles résultant de la compressibilité de l'eau l_2.

Courbe III : Chambres élastiques totales $l = l_1 + l_2$.

Courbe IV : Chambres élastiques totales cumulées $\Sigma(l)$.

On voit que cette dernière courbe est loin d'être une droite. Elle a bien l'allure parabolique que nous signalions plus haut.

Le tableau I donne l'ensemble des calculs. Dans la colonne n° 16 se trouvent les valeurs du coup de bélier occasionné par l'arrêt brusque d'un débit de 125 l/sec avant l'installation des réservoirs d'air. Les colonnes 17, 18, 19 et 20 se rapportent au cas de la conduite munie des réservoirs d'air.

Voici quelles étaient les caractéristiques de ces réservoirs : 3 cylindres verticaux de 0,60 m de diamètre et de 3,20 m de hauteur. Le niveau de l'eau était maintenu grâce à un petit compresseur à environ 1,30 m au-dessus du fond. Les fonds étaient des calottes demi-sphériques. Le volume d'air renfermé était donc d'environ 1,60 m³.

La variation du volume en fonction de la pression se faisait suivant la loi $p\,v = constant$. Cela représentait sur la conduite de 0,50 m de diamètre une chambre élastique de 5,90 m. Nous avons vu qu'une telle chambre concentrée au point bas de la conduite faisait le même effet qu'une chambre élastique de longueur double répartie sur toute la longueur, de sorte que nous avons doublé cette longueur de 5,90 m et que nous avons reporté les 11,80 m sur les 20 tronçons.

La colonne n° 20 donne les résultats obtenus pour la répartition du coup de bélier dans ce cas.

Les figures 7 et 8 donnent la représentation graphique des résultats obtenus par le calcul et les observations, dans les deux cas.

Voici pour le premier cas (fig. 7) les chiffres comparatifs :

	Usine	Sorniot	Chambre des vannes
Observations (maxim. ordinaires)	80 m	50 m	31,5 m
Calculs	79,2 m	44,5 m	31,5 m

La concordance des chiffres est assez bonne et la

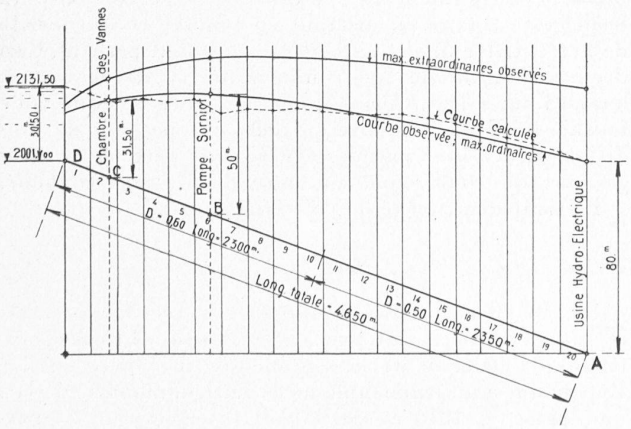


Fig. 7. — Repartition du coup de bélier suivant la longueur de la conduite sans chambre d'air.

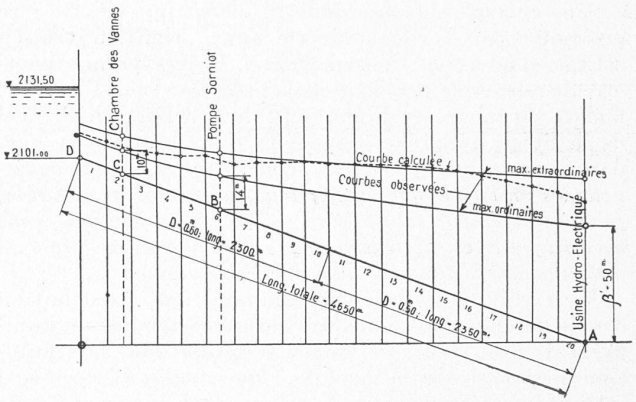


Fig. 8. — Répartition du coup de bélier suivant la longueur de la conduite avec chambre d'air.

courbe résultant des calculs a bien l'allure générale de celle des observations.

Pour le second cas (avec réservoirs d'air) les chiffres diffèrent davantage :

	Usine	Sorniot	Chambre des vannes
Observations : (maxim. ordinaires)	50 m	14 m	10 m
Calculs	60,8 m	21 m	11,5 m

Mais ce qui ressort très nettement des graphiques, c'est l'effet des réservoirs d'air qui s'est fait sentir surtout à la partie supérieure de la conduite. Ainsi, à lachambre des vannes on avait 31,5 m de coup de bélier avant et 10 m seulement après l'installation des réservoirs d'air.

En ce qui concerne les chiffres notés par les observations, il est bon de répéter que ces chiffres n'ont rien d'absolu ; ce sont des moyennes de séries d'observations assez prolongées, faites pendant la marche ordinaire de l'Usine d'emboutissage.

Cette manière de calculer la répartition du coup de bélier donne en tout cas des résultats qui concordent assez bien avec les observations, ce qui était loin d'être le cas avec les conclusions que l'on pouvait tirer de l'ouvrage de M. Eydoux et que nous avons mentionnées au début de ces notes.

Il serait intéressant de pouvoir vérifier l'exactitude de ce mode de calcul dans d'autres cas ; mais les observations de transmission de coups de bélier dus à des fermetures très rapides sont plutôt rares. *(A suivre.)*

Hommage à l'Ecole d'Ingénieurs de l'Université de Lausanne.

Note de la rédaction. — *Si l'article suivant n'a pas paru dans notre numéro du 28 novembre dernier, c'est par suite d'un malentendu. Nous en exprimons nos regrets à son auteur qui, nous en avons maintenant la certitude, exprime une opinion très répandue en Suisse romande, et pas seulement dans les milieux qui, de par leur nature même, sont favorables à l'Ecole d'ingénieurs de Lausanne.*

A la suite de cet « Hommage », nous publions le post-scriptum que le Conseil d'Etat vaudois a mis à sa lettre à la « Schweizerische Bauzeitung », reproduite à la page 308 de notre dernier numéro.