Influence des réflexions partielles de l'onde aux changements de caractéristiques de la conduite et au point d'insertion d'une chambre d'équilibre

Autor(en): **Calame, Jules / Gaden, Daniel**

Objekttyp: **Article**

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

Band (Jahr): **61 (1935)**

Heft 24

PDF erstellt am: **10.07.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-47032

61e année 23 novembre 1935 N° 24

BULLETIN TECHNIQUE
DE LA SUISSE ROMANDE

ABONNEMENTS :
Suisse : 1 an, 12 francs
Etranger : 14 francs
Pour sociétaires :
Suisse : 1 an, 10 francs
Etranger : 12 francs
Prix du numéro :
75 centimes.
Pour les abonnements s'adresser à la librairie F. Rouge & Cie, à Lausanne.

Paraissant tous les 15 jours

Organe de la Société suisse des ingénieurs et des architectes, des Sociétés vaudoise et genevoise des ingénieurs et des architectes, de l'Association des anciens élèves de l'Ecole d'ingénieurs de l'Université de Lausanne et des Groupes romands des anciens élèves de l'Ecole polytechnique fédérale. — Organe de publication de la Commission centrale pour la navigation du Rhin.

Considérations sur le coup de bélier dans les conduites forcées d'usines hydrauliques.

Influence des réflexions partielles de l'onde aux changements de caractéristiques de la conduite et au point d'insertion d'une chambre d'équilibre,

par *Jules Calame* et *Daniel Gaden*.

(Suite.) [1]

I. Calcul des conduites forcées.

Selon M. Jæger, il ne suffirait pas, pour calculer le coup de bélier maximum, dans une *conduite à caractéristiques multiples*, d'introduire dans les formules d'Allievi une caractéristique moyenne, mais il serait nécessaire de tenir compte des réflexions partielles de l'onde aux changements de caractéristiques.

Il est utile de remarquer, tout d'abord, que les formules de récurrence de M. Jæger ne se prêtent pas du tout à l'introduction des quelques dizaines de changements de caractéristiques auxquels on peut s'attendre avec les variations de diamètre et d'épaisseur d'une conduite de quelque importance, mais qu'après deux et au plus trois changements de caractéristiques, un calculateur consciencieux se trouvera devant une somme de calculs considérables, sans avoir du tout acquis l'impression qu'il a quitté l'arbitraire pour la réalité [2].

Dans l'exemple numérique qu'il traite sous le chapitre *D* de la première partie de son ouvrage [3], M. Jæger compare aux siens les résultats de ce qu'il appelle la « proposition arbitraire d'Allievi » et il montre l'erreur à laquelle il prétend que l'on est conduit.

Or, voici les données de l'exemple en question s'appliquant à une chute $H_o = 142{,}80$ m :

Conduite formée de deux tronçons de caractéristiques très différentes ; il s'agit probablement, dans la réalité, d'une galerie et d'une conduite, sans interposition d'une chambre d'équilibre, avec un point haut particulièrement exposé où la pression n'est que $Y_o = 51{,}80$ m.

		1er tronçon	2e tronçon
Longueur	L	1634 m	508 m
Diamètre	D	3,00 m	2,10 m
Section	S	7,06 m²	3,46 m²
Vitesse de régime . .	V_o	1,70 m/s	3,47 m/s
Vitesse de propagation	a	1150 m/s	890 m/s
On en peut déduire :			
Durée de la phase . .	μ	2,84 s	1,14 s
Produit	LV_o	2780 m²/s	1762 m²/s

et de là, la vitesse moyenne de propagation sur toute la conduite

$$a_m = \frac{2\,(1634 + 508)}{2{,}34 + 1{,}14} = 1078 \text{ m/s}$$

et la vitesse moyenne d'écoulement :

$$V_{om} = \frac{2780 + 1762}{1634 + 508} = 2{,}115 \text{ m/s}$$

telles qu'on les a définies plus haut.

Fermeture linéaire. Vis-à-vis de la pression statique $H_o = 142{,}80$ m régnant à l'obturateur, on calculera selon Allievi, à l'aide des valeurs qui précèdent :

$$\rho_m = 0{,}815 \qquad \bar{\mu} = 3{,}98 \text{ sec.}$$

[1] Voir *Bulletin technique* du 14 septembre 1935, p. 217.

[2] On voit de plus toute l'illusion qu'il y aurait à parler de méthodes « exactes » et de méthodes « approximatives », approximatives, elles le sont toutes, à des degrés divers.

[3] *Op cit.*, pp. 131 à 147.

Pour la raison indiquée au début de ces lignes, nous ne prétendons pas à l'exactitude pour un temps de fermeture inférieur à la durée de la phase ; nous arrêterons donc nos calculs au temps de *5 secondes, déjà pratiquement bien trop réduit*, vu la valeur de la surpression à laquelle il conduit. Pour ce temps de fermeture, ici *particulièrement court*, nous avons effectué une vérification par un diagramme Bergeron que nous reproduisons à la fig. 1.

Pour obtenir, par la méthode d'Allievi, la valeur de *la surpression au point de discontinuité*, à la rencontre des deux tronçons, sur la base de la surpression qui a lieu à l'obturateur, il ne peut être question de tabler sur une répartition de cette surpression dans le rapport des longueurs, car les vitesses d'écoulement, dans les deux tronçons en question, sont trop différentes. Il faut compter logiquement sur le rapport des forces vives :

$$\frac{2780}{2780 + 1762} = 0{,}61.$$

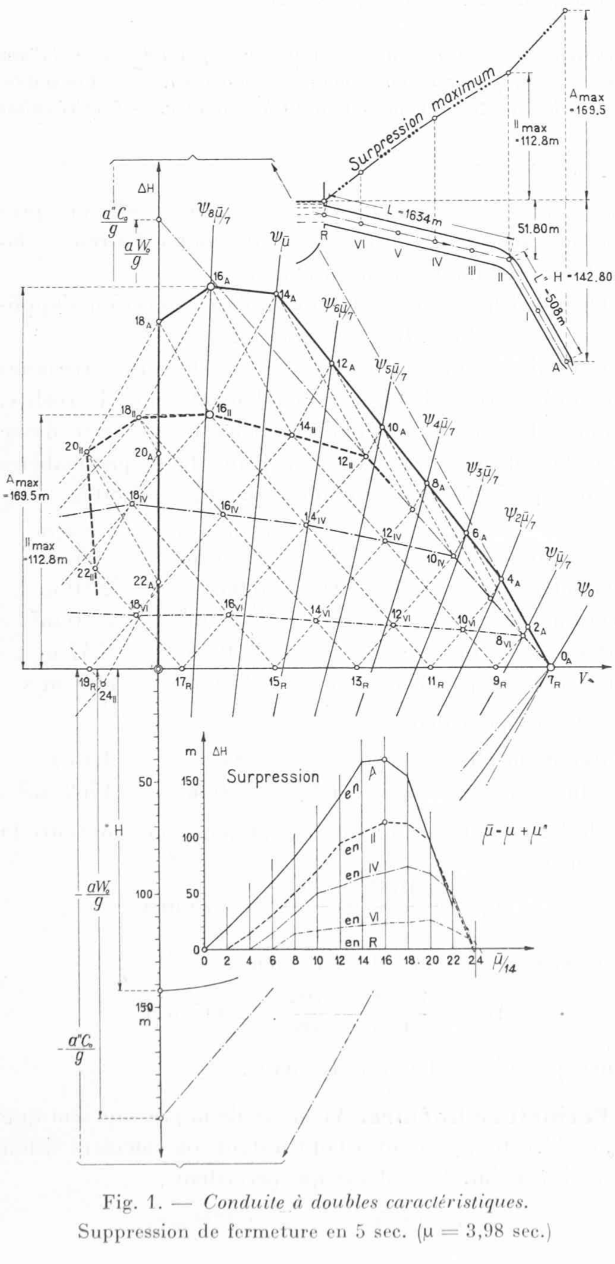

Fig. 1. — *Conduite à doubles caractéristiques.*
Suppression de fermeture en 5 sec. ($\mu = 3{,}98$ sec.)

Si $\tau = 5$, 10 et 20 secondes, on calcule, selon Allievi : $\vartheta = 1{,}255$ 2,51 et 5,2 secondes, ce qui conduit[1] aux résultats du tableau suivant, dans lequel figurent également les résultats des autres méthodes :

Fermeture en	5 sec.	10 sec.	20 sec.
A l'oburateur : B_{*m}			
selon Allievi	122 %	45 %	20 %
selon Bergeron	119 % *	—	—
selon M. Jæger	116 %	44 %	19,6 %
M. Jæger appliquant Allievi [2]	181 à 133,5 %	70,5 à 54,3 %	31,0 à 24,3 %
Au point de discontinuité : B_m			
selon Allievi	74,5 %	27,5 %	12,2 %
selon Bergeron	79 % *	—	—
selon M. Jæger	75,7 %	27,9 %	12,5 %
M. Jæger appliquant Allievi [2]	137,3 à 105,0%	23,5 à 41,3 %	35,5 à 18,5 %

*) La fig. 1 donne les surpressions A_{max} et II_{max} en valeur absolue ; on les a ramenées dans ce tableau en % de la chute $H_0 = 142{,}80$ m.

Comme on le voit, M. Jæger apporte, dans cet exemple, une remarquable confirmation de la méthode d'Allievi. S'il a cru qu'il en était autrement, c'est que, pour appliquer Allievi, M. Jæger a calculé la caractéristique ρ_* de la conduite entière de deux manières également fausses, dans lesquelles intervient non pas la vitesse moyenne V_{om} des deux tronçons, mais la *vitesse du seul tronçon inférieur ;* c'est une regrettable erreur. La figure 24 de son ouvrage n'est par conséquent pas exacte, ni les conclusions qu'il en tire[3].

Ouverture linéaire. Examinons aussi l'exemple d'ouverture linéaire calculé par M. Jæger (*op. cit.*, p. 147 à 152). Il semblerait, à l'entendre, que, pour ne pas atteindre, au point saillant de la discontinuité, une dépression supérieure à — 61,30 m, il suffirait que l'ouverture se fît en *6 secondes*, tandis qu'on trouverait *plus de 11 secondes* selon Allievi, soit presque un temps double de celui que conseille M. Jæger.

Or si, *au lieu de la valeur fausse attribuée par M. Jæger* à ρ, on introduit $\rho_m = 0{,}815$ (calculé à la fermeture et valable encore à l'ouverture) dans la première des équations (55) d'Allievi, on trouve $\vartheta = 2{,}03$ (au lieu de 2,76) et $\tau \sim$ *8 secondes*, temps déjà beaucoup plus court.

Quelques diagrammes construits d'après la méthode Bergeron montrent avec toute l'exactitude désirable, que pour réaliser une dépression de — 61,30 m au point de discontinuité, il y aurait lieu d'adopter un temps d'ouverture de *7,25 sec.* La fig. 2 reproduit le diagramme correspondant à une ouverture en 7,3 sec.

La concordance est donc encore satisfaisante entre les résultats obtenus selon Allievi et ceux construits par la

[1] Allievi-Gaden, abaque fig. 23.

[2] Ch. Jæger, *op. cit.*, p. 138, les valeurs de B_m indiquées ici ont été obtenues en divisant par $H_0 = 142{,}8$ m les valeurs de $H_0 B_m$ données par l'auteur.

[3] Même remarque au sujet d'un résumé publié par le même auteur dans la revue *Der Bauingenieur*, Berlin, Heft 47/48 du 23 novembre 1934, p. 472 ; l'article reproduit la même figure erronée, avec une correction apportée au commentaire.

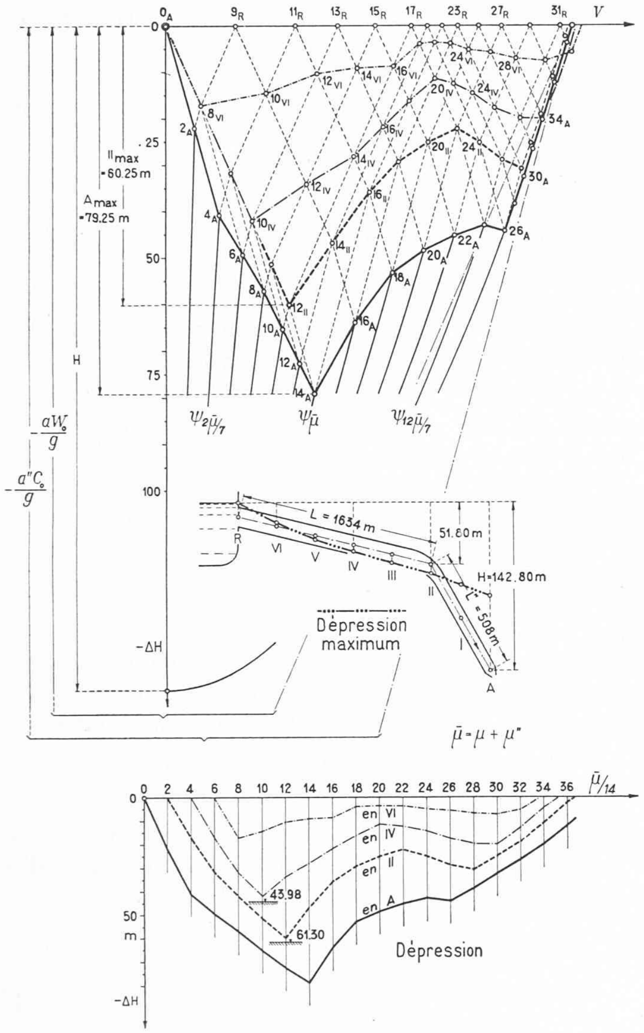

Fig. 2. — *Conduite à doubles caractéristiques.*
Dépression d'ouverture en 7,3 sec. ($\mu = 3{,}98$ sec.)

méthode Bergeron [1], tandis qu'elle est beaucoup moins bonne avec le résultat de M. Jæger qui nous paraît douteux. De plus, contrairement à l'opinion de M. Jæger — et le diagramme de Bergeron le montre clairement — il n'y a pas de point plus menacé que le point saillant de la conduite, siège de la discontinuité.

Manœuvres alternatives rythmiques. M. Jæger écrit à ce sujet [2] : « L'importance que les manœuvres alternatives rythmiques peuvent prendre est un fait nouveau ». C'est à se demander ce que M. Jæger entend dire, puisqu'il commente lui-même la Note V de l'auteur italien, traitant des phénomènes de résonance. Nous ne voyons vraiment pas ce que M. Jæger a ajouté de nouveau, en confirmant la démonstration d'Allievi qui aboutit à la loi du doublement de la pression, quelle que soit la valeur de ρ. Au contraire, il n'a pas saisi, comme il le dit lui-même, le sens des abaques d'Allievi, fig. 53 et 54, montrant pour quelles conduites, quels régimes d'écoulement et quels temps de manœuvre les maxima de surpression et dépression, dus à des fermetures et ouvertures successives rythmées, seraient supérieurs à ceux de la fermeture et de l'ouverture linéaires. Il est nécessaire, en effet, de ne pas oublier qu'avec n'importe quelle conduite on peut réaliser toutes les valeurs de ρ comprises entre zéro et le maximum ; on comprend alors que, *pour n'importe quelle conduite, on puisse théoriquement réaliser le doublement de la pression par résonance, entre les ouvertures* $1 : \theta$ *et zéro.*

Pratiquement, dans la majeure partie des cas, cette résonance ne peut être établie par un régulateur de turbine, d'abord parce que l'ouverture $1 : \theta$ est en général faible [1], souvent plus faible que l'ouverture de marche à vide de la machine et qu'à ce régime on ne saurait guère concevoir un régulateur provoquant des oscillations d'ouverture. En outre, pour des longueurs de conduites, c'est-à-dire pour des hauteurs de chute faibles et moyennes, la durée de la phase, qui est de quelques dixièmes de seconde, rend le synchronisme impossible ; les oscillations d'ouverture d'un régulateur, même mal mis au point, ne peuvent se faire avec cette rapidité et leur période reste plusieurs fois supérieure à celle de la conduite, ce qui diminue dans une énorme mesure les possibilités de surpression.

C'est seulement pour de hautes chutes ou du seul fait de la grande longueur de la conduite, que la durée de la phase devient telle que les mouvements du régulateur pourraient entrer en résonance avec la période propre de la conduite. Mais on peut alors faire appel à divers artifices [2] et les constructeurs de turbines ont heureusement mis au point leurs régulateurs bien des années avant que M. Jæger ait cru découvrir le danger qu'il s'agissait d'éviter.

Où nous partageons l'avis de cet auteur, c'est sur *la question des points hauts* d'une conduite dont le tracé n'est pas à pente constante. Même avec des manœuvres qui resteraient sans danger dans la partie basse de la conduite, il serait en effet possible de produire dans la partie haute des coups de bélier tels que, par rapport à la pression de régime, ils dépassent notablement la proportion de *deux* qu'Allievi envisageait comme un maximum, mais dans le cas d'une conduite à inclinaison régulière. *C'est une objection connue depuis longtemps* que M. Jæger renouvelle et ce n'est certes pas à l'ignorance de celle-ci qu'il faut attribuer, comme il l'écrit, « la majorité des accidents, parfois très graves, survenus à des conduites forcées » [3].

II. Influence d'une chambre d'équilibre.

Selon M. Jæger encore, le calcul du coup de bélier n'aurait pas été traité jusqu'à lui d'une façon satisfai-

[1] Il est, de plus, certain qu'en pratique on éviterait de s'approcher d'aussi près de la rupture de la veine liquide et qu'on ne tolérerait que des dépressions moins importantes, c'est-à-dire des temps d'ouverture plus lents pour lesquels la concordance serait encore meilleure.

[2] *Op. cit.*, p. 168.

[1] Le choix de θ est d'ailleurs laissé entièrement à la disposition du constructeur et il lui est d'autant plus facile de l'augmenter que, dans ce cas, θ représente le temps de fermeture que réaliserait le régulateur si, sur toute sa course, il était animé de la vitesse de manœuvre dont il est susceptible lors de ces faibles oscillations. θ est donc beaucoup plus grand que le temps de fermeture total.

[2] Ne fût-ce par exemple que le réglage de la vitesse de manœuvre du régulateur à la fermeture à une valeur différente de celle de l'ouverture.

[3] *Op. cit.*, pp. 153/154.

sante, dans le cas de conduites munies de chambres d'équilibre. Nous ne voulons pas nous attarder ici à discuter les diverses idées que développe cet auteur et il nous suffira de montrer une fois de plus ce que valent ses résultats vis-à-vis de ceux qui découlent du calcul, tel qu'on peut l'établir sur la base des équations fondamentales d'Allievi.

Pour bien montrer la portée de ce que nous allons avancer, après avoir exécuté et contrôlé par d'autres méthodes que la nôtre un très grand nombre d'exemples numériques dans les conditions les plus variées, nous passerons successivement en revue l'examen du coup de bélier dans les *chambres d'équilibre à section constante* (celles que M. Jæger appelle « prismatiques ») ; dans les *chambres à sections multiples* (« avec col d'entrée ou avec partie inférieure tubulaire ») ; et enfin dans les *chambres à étranglement* [1].

1. *Chambre d'équilibre à section constante.*

Il y a lieu de distinguer (D. Eydoux l'avait déjà montré [2] et M. Jæger le fait aussi avec raison) *deux cas* distincts selon que l'organe obturateur est placé *au droit de la chambre* ou *à l'extrémité inférieure* d'une conduite forcée.

Dans le *premier cas*, M. Jæger a bien voulu reproduire exactement notre calcul [3] ; il reconnaît, dans ce cas, la grande efficacité de la chambre d'équilibre et l'exemple numérique qu'il traite le fait aboutir, au bas de la chambre, à des surpressions infimes, *dès que le temps de fermeture de l'obturateur est relativement long* vis-à-vis de la durée $\mu' = 2L' : a'$ de la phase dans la chambre d'équilibre. Or, ce que nous avons dit plus haut sur la durée des manœuvres à envisager dans la réalité, manœuvres *lentes* vis-à-vis de la durée $\mu = 2L : a$ de la phase d'une conduite sans chambre d'équilibre, est vrai *a fortiori* pour la durée $\mu' = 2L' : a'$ de la phase d'une chambre d'équilibre dont la longueur L' est beaucoup plus courte.

Dans le deuxième cas, celui d'une chambre d'équilibre située *au haut d'une conduite forcée*, M. Jæger part encore des mêmes considérations et des mêmes équations que nous et, si son développement s'écarte finalement du nôtre, c'est que, le sachant bien, nous avions introduit la simplification qui correspond le plus souvent à la réalité et qui consiste à regarder la longueur L'' de la conduite forcée comme bien plus grande que la longueur L' de la chambre. Pour calculer, dès lors, *la surpression maximum* relative B_{*m} au *bas de la conduite*, (valeur rapportée à la pression de régime H_o à l'obturateur), nous avions supposé que la réflexion des ondes était *totale au pied de la chambre*, autrement dit que la surpression relative B_m (valeur rapportée à Y_o) était nulle à cet endroit, la pression Y_o restant constante. Une fois B_{*m} obtenu, nous l'avons utilisé pour calculer B_m et avons montré par des exemples numériques que la valeur de la surpression au bas de la chambre, rapportée à H_o, soit $B_m \dfrac{Y_o}{H_o}$, restait pratiquement faible, ce qui justifiait l'exactitude du procédé.

Nous convenons toutefois volontiers qu'il se présente des cas, tel celui d'*une vanne de sûreté, située au haut d'une conduite forcée*, dans lesquels le tronçon de conduite L'' à considérer en aval de la chambre jusqu'à l'obturateur, est exceptionnellement du même ordre de grandeur que la longueur L' de la chambre elle-même et dans lesquels, en outre, la section F de la chambre est aussi faible que celle S de la conduite forcée, si bien qu'on ne saurait compter, dans ce cas, sur une réflexion *totale* des ondes du coup de bélier.

Mais ce problème peut être traité très simplement, en s'inspirant de la méthode même qui nous a conduits [1] à la relation

$$B_m = \frac{\rho}{\rho''_*}\,\frac{\mu'}{\mu''}\,\frac{B_{*m}}{k} \tag{4}$$

dans laquelle (fig. 3) :

$\rho = \dfrac{aW_o}{2gY_o}$ ou $\rho_* = \dfrac{aW_o}{2gH_o}$ désigne la caractéristique de la galerie d'amenée (en amont de la chambre d'équilibre),

$\rho' = \dfrac{a'V_o}{2gY_o}$ ou $\rho'_* = \dfrac{a'V_o}{2gH_o}$ la caractéristique de la chambre d'équilibre,

$\rho'' = \dfrac{a''C_o}{2gY_o}$ ou $\rho''_* = \dfrac{a''C_o}{2gH_o}$ la caractéristique de la conduite forcée proprement dite (en aval de la chambre).

k désignant le rapport $\rho : \rho'$ d'où $\rho : k = \rho'$.

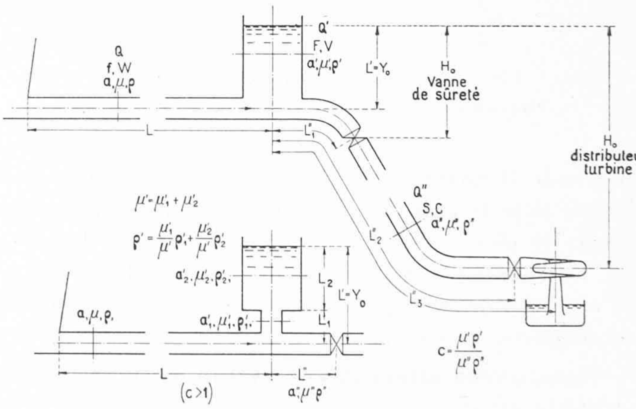

Fig. 3. — Notation.

On peut alors écrire :

$$B_m = \frac{H_o}{Y_o}\,\frac{\mu'\rho'}{\mu''\rho''}\cdot B_{*m}$$

ou encore, en tenant compte de la relation

$$Q_o = fW_o = FV_o = SC_o$$

et en posant

$$c = \frac{\mu'}{\mu''}\,\frac{\rho'}{\rho''} = \frac{L'S}{L''F} \tag{5}$$

$$B_m = c\,\frac{H_o}{Y_o}\,B_{*m} \tag{4'}$$

[1] Remarquons en passant que, dans une prétendue « citation » (p. 172 de son ouvrage), M. Jæger nous prête une classification des chambres d'équilibre que nous n'avons pas donnée sous cette forme et qui appelle de notre part des réserves.

[2] *Op. cit.*, pp. 33, 42.

[3] Calame et Gaden : *Théorie des chambres d'équilibre*. Premier cas. Chapitre I.

[1] Théorie des chambres d'équilibre, p. 46, expression (6*b*).

Cette relation entre B_m et B_{*m} n'est d'ailleurs valable que si la section F de la chambre ne dépasse guère celle S de la conduite [1] ; mais c'est précisément ce cas qui nous préoccupe, car si F était beaucoup plus grand que S, la réflexion des ondes serait presque totale et, quelle que soit la longueur L' de la chambre, cette dernière jouerait, vis-à-vis du coup de bélier à l'obturateur, sensiblement le même rôle qu'un réservoir infiniment grand.

Il serait facile de démontrer que, si l'on veut tenir compte de l'influence de B_m, surpression au bas de la chambre, sur B_{*m}, surpression à l'obturateur, il faut écrire, au lieu de (4') :

$$B_m = \frac{c}{1+c}\,\frac{H_o}{Y_o}\,B_{*m} \tag{6}$$

Dès lors, *le coup de bélier maximum à l'obturateur* qui est, dans ce cas particulier, le *coup de bélier limite* [2]

$$B_{*m} = \zeta^2_{*m} - 1 \tag{7}$$

se calcule à l'aide de ζ_{*m} tiré de la relation

$$\zeta^2_{*m} - (1+c)\,\frac{\rho''_*}{\theta''}\,\zeta_{*m} - 1 = 0 \tag{8}$$

équation du 2me degré en ζ_{*m} qui est, il vaut la peine de le remarquer, *identique à l'équation* (19) *d'Allievi* [3] *dès l'instant où* $c = 0$.

Admettre, comme on vient de le faire, que la surpression maximum est donnée par la surpression limite, c'est supposer, en d'autres termes, que le *temps* relatif, θ'', *de fermeture est relativement long ;* et c'est pratiquement bien le cas si l'on ne veut pas atteindre, lors d'une fermeture de la vanne de sûreté, des valeurs de la surpression qui dépassent toutes les tolérances.

Quant à l'expression (5) de c, elle fait voir immédiatement quand ce terme correctif du coefficient $\rho''_* : \theta''$ joue un rôle appréciable en regard de l'unité, autrement dit quand il convient d'être prudent et d'utiliser l'équation (8) de préférence à l'équation d'Allievi :

$$\zeta^2_{*m} - \frac{\rho''_*}{\theta''}\,\zeta_{*m} - 1 = 0. \tag{9}$$

Or c est précisément appréciable dans le cas particulier de la *vanne de sûreté;* il atteint l'unité, si $L'' = L'$ et $F = S$ simultanément. Mais il est aisé de constater aussi que *c est négligeable, quand on considère la fermeture d'un obturateur situé à l'extrémité aval d'une longue conduite forcée ou quand la section de la chambre est grande.* Quand c tend vers zéro, la relation (6) reprend la forme (4') déjà connue et l'équation (8) s'identifie avec (9) établie par Allievi dans l'hypothèse d'un réservoir de section infiniment grande au bas duquel la réflexion des ondes est complète.

* * *

Ceci acquis, il devient fort instructif de reprendre, pour les examiner, les principaux exemples numériques proposés par M. Jæger et qui doivent donner, semble-t-il, une image vivante des résultats de sa « Théorie ». Reprenons d'abord précisément celui [1] *d'une très longue chambre d'équilibre étroite* de section constante envisagée à l'occasion d'une *fermeture de la vanne de sûreté, située dans le haut de la conduite forcée, à proximité de la chambre.* Des données constructives du problème [2] on tirera d'abord :

$$c = \frac{185{,}9}{139{,}8}\cdot\frac{10{,}2}{14{,}6} = 0{,}93 \quad \text{et} \quad \frac{c}{1+c} = 0{,}482.$$

Il faut donc s'attendre à une réflexion incomplète et, pour rendre le problème délicat, l'auteur va jusqu'à supposer, dans ce cas, une impossible manœuvre de fermeture s'effectuant en *1 seconde*, d'où $\theta'' = 1 : 0{,}214 = 4{,}67$.

Voici les résultats, à titre comparatif, en % de la pression H_o à la vanne de sûreté :

Surpression calculée	Selon équations (6) (7) (8)	Par un diagramme Bergeron	D'après M Jæger
B_{*m} à l'obturateur	248 %	246 % *	208,6 %
$\frac{Y_o}{H_o}B_m$ au pied de la chambre	127 %	124 % *	105,3 %

* La fig. 4 donne les surpressions A_{max} et HI_{max} en valeur absolue ; on les a ramenées dans ce tableau en % de la pression $H_o = 64{,}8$ m à l'obturateur.

La concordance est très satisfaisante entre les deux premières colonnes de chiffres, malgré l'énorme surpression ; les résultats de M. Jæger sont, en revanche, erronés et dans un sens dangereux, puisqu'ils sont de 20 % trop faibles. Ajoutons toutefois que cette concordance n'est pas toujours aussi complète pour des temps de fermeture *aussi courts*, quand la surpression croît constamment sans atteindre la valeur limite admise dans l'établissement de nos formules. Il faut bien dire aussi que, dans la réalité, une vanne de diamètre 3,60 m, fermant *en 1 seconde* un débit de 32 m³/s, est encore à imaginer.

La concordance a lieu, en revanche, *toujours*, *pour des manœuvres de durée raisonnable*, conduisant à des surpressions d'allure asymptotique dont la limite est atteinte avant la fin de la manœuvre ; nous l'avons vérifié dans de nombreux exemples numériques.

[1] Plus exactement (*op. cit.*, pp. 46/47), elle est valable si $k - k'' - 1 < 0$ ou encore si $\frac{1}{\rho'} < \frac{1}{\rho''} + \frac{1}{\rho}$ ou encore (quand $a = a' = a''$) si $F < S + f$.

[2] Car $\rho''_* > 1$, le cas intéressant étant celui d'une chute faible ou moyenne. Si la chute était, au contraire, élevée, la longueur L'' de la conduite serait bien plus grande que celle L' de la chambre et l'effet de cette longueur L' deviendrait négligeable vis-à-vis de celui de L'', au point de vue du calcul du coup de bélier à l'obturateur.

[3] *Allievi-Gaden*, p. 33. Cette équation (8) du texte est représentée aussi par le faisceau de droites de l'abaque fig. 19 d'Allievi qu'on peut utiliser directement ici aussi, si l'on convient de lire, dans la figure, ρ pour $(1+c)\,\rho''_*$ et θ pour θ''.

[1] *Op. cit.*, p. 212.

[2] Voici d'ailleurs ces données :

Galerie d'amenée	$L = \infty$	$f = 10{,}2$ m²	$Q_o = 32$ m³/s	
		$a = 1300$ m/s	$W_o = 3{,}14$ m/s	
		$\mu = \infty$	$\rho = 3{,}41$	
Chambre d'équilibre	$L' = 185.90$	$F = 14{,}6$ m²	$Y_o = 61{,}10$ m	
		$a' = 1300$ m/s	$V_o = 2{,}19$ m/s	
		$\mu' = 0{,}286$ s	$\rho' = 3{,}38$	$\rho'_* = 2{,}24$
Conduite forcée (mais seulement jusqu'à la vanne de sûreté)	$L'' = 139.80$	$S = 10{,}2$ m²	$H_o = 64{,}80$ m	
		$a'' = 1300$ m/s	$C_o = 3{,}14$ m/s	
		$\mu'' = 0{,}214$ s	$\rho'' = 3{,}41$	$\rho''_* = 3{,}22$

Dans un second exemple [1] de *chambre de section constante, mais étroite* ($c = 0{,}079$) située de nouveau *au haut de la conduite*, mais où les temps de fermeture sont alors *beaucoup plus longs* vis-à-vis de μ', la concordance est complète avec les résultats de M. Jæger. Les résultats du calcul sont, en effet, dans ce cas, en % de la pression H_o à l'obturateur aval :

Surpression	Fermeture en	2 sec.	0 sec.	30 sec.
B_{*m} à l'obturateur	selon équation (6) (7) (8)	% 220	% 27,9	% 8,4
	d'après M. Jæger *	215-224	28,0-28,4	8,5
$\frac{Y_o}{H_o} B_m$ au pied de la chambre	selon équation (6) (7) (8)	16,2	2,0	0,6
	d'après M. Jæger *	14,8-16,68	2,04-2,18	0,618

* Des deux valeurs indiquées, la première, d'après M. Jæger, n'est qu'approchée.

Le troisième exemple [2] de *chambre de section constante, étroite*, avec obturateur *au bas* de la conduite forcée, concorde encore mieux [1]. Au total, il est assez piquant de constater que — contrairement à ce qu'affirme M. Jæger [2] — les valeurs de B_{*m} et de B_m peuvent être calculées *en quelques minutes*, sans avoir recours à sa théorie.

(*A suivre.*)

[1] *Op. cit.*, p. 216. Voici les données de cet exemple :

$L = \infty$ $\qquad L' = 32$ m $\qquad L'' = 408$ m

$\mu = \infty$ $\qquad \mu' = 0{,}049$ s $\qquad \mu'' = 0{,}623$ s

$a = a' = a'' = 1310$ m/s

$W_o = V_o = C_o = 6{,}03$ m/s $\qquad Y_o = 35{,}48$ m

$\rho = \rho' = \rho'' = 1{,}36$

$\rho_* = \rho'_* = \rho''_* = 3{,}68$ $\qquad H_o = 109{,}47$ m

[2] *Op. cit.*, p. 218.

[1] A l'exception toutefois de la fermeture en 5 sec., pour laquelle la surpression à l'obturateur est de 55,3 % ; l'indication 0,533 de M. Jæger est sans doute une faute d'impression.

[2] *Op. cit.*, p. 220, lignes 4 et 5.

L'emploi du plomb pour l'insonorisation.

Depuis pas mal de temps déjà, les Américains utilisent, sur une assez grande échelle, le plomb dans les divers problèmes d'insonorisation qui se présentent à eux, et plus particulièrement dans les fondations antivibratiles des machines bruyantes.

Sans vouloir répéter les lois bien connues de la transmission des sons, nous croyons néanmoins nécessaire de rappeler quelques principes élémentaires.

Le son qui frappe une paroi est en partie absorbé par la paroi elle-même, en partie réfléchi à sa surface et la partie restante est transmise à travers la paroi.

Les cas extrêmes sont constitués par une paroi très poreuse, qui absorbe, et ne réfléchit pas, et par une paroi très lisse qui réfléchit et n'absorbe pas.

Le plomb se classe parmi les parois absorbant très peu et réfléchissant beaucoup. Contrairement à la plupart des métaux communs, son manque d'élasticité est tel que la feuille de plomb ne vibre pas sous l'impulsion d'un choc sonore et qu'il n'y a pas, en conséquence, de vibrations secondaires émises.

Il est bien évident que, si l'on associe au plomb un matériau poreux, bon absorbant, on aura un résultat remarquable, puisque le son non absorbé sera réfléchi par le plomb, ou encore le son qui aurait pu passer à travers le plomb sera absorbé par le matériau poreux, et, d'une façon générale, il y aura une série d'absorptions et de réflexions successives qui étoufferont complètement le son.

C'est pourquoi les Américains ont employé si souvent dans leurs fondations l'association amiante-plomb.

D'autre part, de la série d'expériences auxquelles se sont livrés de nombreux chercheurs sur une série de matériaux, il résulte que la réduction du son dépend de la masse des matériaux (donc de leur nature et de leur épaisseur), ainsi d'ailleurs que de la hauteur du son.

Le plomb était donc *a priori* un matériau intéressant, et c'est ce que divers expérimentateurs ont confirmé, ainsi que le montrent les chiffres donnés par Berger et Sabine.

Le Conservatoire des Arts et Métiers, à Paris, sous la direction de M. Cellerier, et sous le patronage du « Touring-Club de France », a examiné une série considérable de matériaux isolants ou de matériaux courants. Il était donc intéressant de savoir

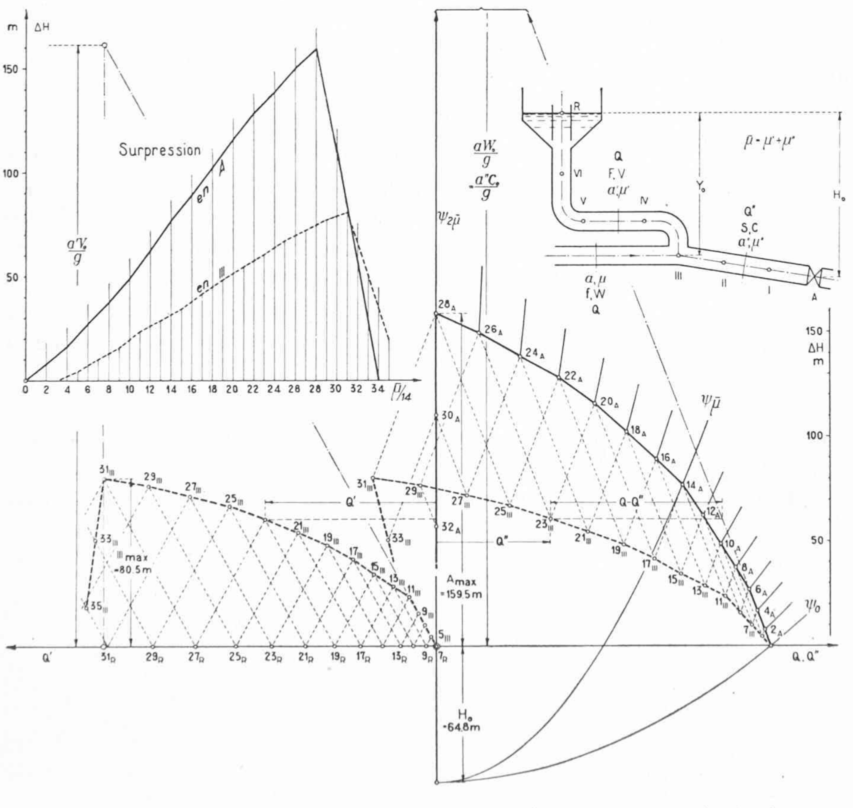

Fig. 4. — Chambre étroite, *fermée* en une seconde *par une vanne de sûreté*.