

**Zeitschrift:** Bulletin technique de la Suisse romande  
**Band:** 62 (1936)  
**Heft:** 5

**Artikel:** 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:** Calame, Jules / Gaden, Daniel  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-47565>

### **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:** 09.12.2025

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

# 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 & C<sup>ie</sup>, 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'École d'ingénieurs de l'Université de Lausanne et des Groupes romands des anciens élèves de l'École polytechnique fédérale. — Organe de publication de la Commission centrale pour la navigation du Rhin.

COMITÉ DE RÉDACTION. — Président: R. NEESER, ingénieur, à Genève. — Secrétaire: EDM. EMMANUEL, ingénieur, à Genève. — Membres: *Fribourg*: MM. L. HERTLING, architecte; A. ROSSIER, ingénieur; *Vaud*: MM. C. BUTTICAZ, ingénieur; E. ELSKES, ingénieur; EPITAUX, architecte; E. JOST, architecte; A. PARIS, ingénieur; CH. THÉVENAZ, architecte; *Genève*: MM. L. ARCHINARD, ingénieur; E. ODIER, architecte; CH. WEIBEL, architecte; *Neuchâtel*: MM. J. BÉGUIN, architecte; R. GUYE, ingénieur; A. MÉAN, ingénieur cantonal; E. PRINCE, architecte; *Valais*: MM. J. COUCHEPIN, ingénieur, à Martigny; HAENNY, ingénieur, à Sion.

RÉDACTION: H. DEMIERRE, ingénieur, 11, Avenue des Mousquetaires, LA TOUR-DE-PEILZ.

### CONSEIL D'ADMINISTRATION DU BULLETIN TECHNIQUE

A. DOMMER, ingénieur, président; G. EPITAUX, architecte; M. IMER; E. SAVARY, ingénieur.

### ANNONCES

Le millimètre sur 1 colonne, largeur 47 mm. :

20 centimes.

Rabais pour annonces répétées.

Tarif spécial pour fractions de pages.

Régie des annonces :  
Annonces Suisses S. A.  
8, Rue Centrale (Pl. Pépinet)  
Lausanne

SOMMAIRE : *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 et fin). — *Durcissement des bétons*, par J. BOLOMEY, ingénieur, professeur à l'Université de Lausanne. — VARIÉTÉS : *Radisthésie sur plan et calcul des probabilités*. — *L'activité de nos jeunes ingénieurs et techniciens dans les pays d'outre-mer*. — CHRONIQUE GENEVOISE. — *III<sup>e</sup> Conférence mondiale de l'énergie, à Washington, en septembre 1936*. — SOCIÉTÉS : *Société des Arts de Genève*. — *Société vaudoise des ingénieurs et des architectes* : *Conférence de M. Golaz*. — *Société genevoise des ingénieurs et des architectes*. — BIBLIOGRAPHIE.

### 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 et fin)<sup>1</sup>

Nous renouvelons nos excuses à MM. Calame et Gaden d'avoir dû, bien contre notre gré, diviser leur étude en « tranches », publiées à de trop longs intervalles.

A ce propos, déplorons, une fois de plus, qu'il n'existe pas, en Suisse, de périodique apte à publier *in extenso*, sans morcellement excessif, des mémoires de mathématiques appliquées à la technique, d'une certaine étendue. Réd.

#### 2. Chambre d'équilibre à sections multiples.

Ce qu'on a dit, au début de cette note, au sujet des conduites à caractéristiques multiples est encore vrai *a fortiori* des chambres à sections multiples, à savoir que la durée du temps de fermeture réel de l'obturateur est pratiquement toujours un multiple d'ordre élevé de la phase de durée  $\mu'$  de la chambre d'équilibre. Il est dès lors possible, comme pour une conduite, de caractériser une chambre à sections multiples par une caractéristique moyenne  $\rho'$  basée sur l'équivalence de force vive d'une chambre fictive dont la section constante  $F$  aurait pour valeur

$$F = L' : \sum (L'_i : F_i) \quad (10)$$

<sup>1</sup> Voir *Bulletin technique* du 14 septembre 1935, page 217 et 23 novembre 1935, page 277.

$F_i$  désignant les diverses sections (constantes) successives  $F_1, F_2, F_3 \dots$  de la chambre réelle, et  $L'_i$  les longueurs respectives  $L_1, L_2, L_3 \dots$  des tronçons de même section, longueurs qui, totalisées, donnent précisément la longueur  $L'$  de la chambre. Ce n'est point faire là un raisonnement trop primitif<sup>1</sup>, car il permet de nouveau d'obtenir les résultats cherchés avec une exactitude amplement suffisante, par un calcul simple et sans risque d'erreur, ce qu'on ne saurait dire des équations de la « Théorie générale du coup de bélier » de M. Jæger.

\* \* \*

Envisageons d'abord le cas de la chambre à section multiple au pied de laquelle est censé se trouver l'obturateur<sup>2</sup>; c'est celui que calcule M. Jæger, dans un exemple numérique<sup>3</sup> où la caractéristique de la galerie est  $\rho = 7,13$ .

L'auteur considère, pour en comparer les effets, divers types de chambres que nous classerons comme suit (fig. 5) :

<sup>1</sup> Cf. Ch. JÆGER, *op. cit.*, p. 222.

<sup>2</sup> Le problème est celui traité dans notre *Théorie des chambres d'équilibre*, chap. I, premier cas.

<sup>3</sup> *Op. cit.*, p. 226-227.

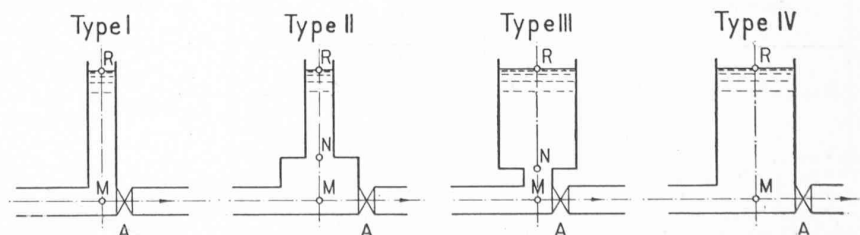


Fig. 5. — Comparaison de divers types de chambres d'équilibre, à l'égard du coup de bélier d'onde.

Type I. la chambre a, du haut en bas, la section de la galerie<sup>1</sup>, c'est-à-dire  $\rho' = \rho = 7,13$  et une durée  $\mu' = 0,064s$  de la phase dans la chambre.  
 $k = \rho : \rho' = 1.$

Type II. la chambre commence par un épanouissement inférieur<sup>2</sup>  $\rho'_1 = \rho : 8$ , de phase  $\mu'_1 = \mu' : 4$ , pour se rétrécir dans le haut, en une section égale à celle de la galerie, avec  $\rho'_2 = \rho$  et  $\mu'_2 = 3\mu' : 4$ . L'équivalence de force vive qui s'exprime aussi par l'égalité

$$\rho' = \frac{\mu'_1}{\mu'} \rho'_1 + \frac{\mu'_2}{\mu'} \rho'_2 \tag{11}$$

conduit, dans ce cas, à la valeur moyenne :  $\rho' = 5,57$ ,  
 $k = \rho : \rho' = 1,28.$

Type III. la chambre, à l'inverse du type II, est d'abord rétrécie<sup>3</sup>, avec  $\rho'_1 = 7,13$  et une phase  $\mu'_1 = \mu' : 8$ , puis s'épanouit dans une section huit fois plus grande, avec  $\rho'_2 = \rho : 8$  et  $\mu'_2 = 7\mu' : 8$ . On calcule pour ce type  $\rho' = 1,67$ ,  $k = 4,27$ .

Ajoutons-y :

Type IV. la chambre dont la section aurait, sur toute sa hauteur, une section huit fois plus grande que la galerie :  $\rho' = 0,89$ ,  $k = 8.$

Type V. la chambre dont la section serait infiniment grande (cas limite) :  $\rho' = 0$ ,  $k = \infty.$

Comparons maintenant à ceux de M. Jæger les résultats qu'on est en droit d'attendre de la résolution de l'équation d'Allievi<sup>5</sup> :

$$\zeta_m^2 - \frac{\rho'}{\rho} \zeta_m - 1 = 0 \tag{12}$$

et ceci, même pour un temps de fermeture pratiquement très court de *I* seconde,  $\theta' = 1 : \mu' = 15,6$ , a fortiori donc pour un temps de fermeture plus long, tel qu'on serait vraisemblablement appelé à le réaliser. On trouve :

Comparaison de quelques types de chambres pour une fermeture très courte, l'obturateur étant situé au droit de la chambre. (Fig. 5.)

Suppression en % de $Y_0 = H_0$	Type I	Type II	Type III	Type IV	Type V
Caractéristiques $\left\{ \begin{array}{l} \rho' = 7,13 \\ k = 1,00 \end{array} \right.$	5,57	1,28	1,67	0,89	0,0
$B_m$ selon équation (12)	58 %	43 %	11,2 %	5,9 %	0,0 %
d'après M. Jæger	57,3 %	13,6 %	6,3 %	—	—

<sup>1</sup> Op. cit., p. 205.

<sup>2</sup> Id., p. 226, op. cit., fig. 36 a.

<sup>3</sup> Id., p. 226, fig. 36.

<sup>4</sup> Déjà donnée dans notre *Théorie des chambres d'équilibre*, page 31, équation (4a<sup>m</sup>) pour ce cas, mais sous la forme

$$\zeta_m^2 - \frac{\rho}{k\rho'} \zeta_m - 1 = 0 \quad \text{avec } k = \rho : \rho'$$

Il n'y a, on le voit, aucune concordance entre les résultats des 2 méthodes, sauf pour la chambre du type I qui n'offre pas de réflexion secondaire. La concordance n'est pas meilleure pour des fermetures plus lentes. Pour en avoir le cœur net, nous avons construit des diagrammes de Bergeron pour le cas du type II où la divergence est la plus grande ; la courbe a complètement confirmé le résultat tiré de l'équation (12) ; le coup de bélier réel est au moins 3 fois plus fort que celui que calcule M. Jæger ; on pouvait d'ailleurs s'attendre à une pareille valeur, en comparant les caractéristiques des types I et II ; puisqu'on ne modifie la chambre que sur un quart de sa hauteur, le coup de bélier ne peut pas être si différent.

\* \* \*

Il reste à examiner le cas de la chambre à sections multiples, quand celle-ci est suivie d'une conduite forcée, à l'extrémité inférieure de laquelle est placé l'obturateur. Prenons l'exemple numérique de M. Jæger<sup>1</sup> et envisageons avec lui une chambre ayant d'abord sur le premier  $\frac{1}{8}$  de sa hauteur la même section que la conduite forcée  $\rho'_1 = \rho'' = 11,36$ ,  $\mu'_1 = \mu' : 8$ , puis s'épanouissant en une section 8 fois plus grande sur les autres  $\frac{7}{8}$  de la hauteur :  $\rho'_2 = \rho : 8$ ,  $\mu'_2 = 7\mu' : 8$ . Supposons aussi

$$\mu' = 0,048, \quad \mu'' = 0,623, \quad Y_0 : H = 0,324.$$

D'après (11)

$$\rho' = \left( \frac{1}{8} + \frac{7}{8} \cdot \frac{1}{8} \right) 11,36 = 2,66.$$

Or on a dans ce cas :

$$k = \rho : \rho' = 8,08 : 2,66 = 3,04$$

$$k'' = \rho : \rho'' = 8,08 : 11,36 = 0,71$$

c'est-à-dire qu'on ne réalise pas la condition  $k - k'' - 1 < 0$ .<sup>2</sup> Le maximum du coup de bélier, au pied de la chambre, a lieu à la fin de la première phase  $\mu'$  ; on le désigne par  $B_1$  dont la valeur est<sup>2</sup> :

$$B_1 = 2 \frac{\rho}{\rho_*''} \cdot \frac{\mu'}{\mu''} \cdot \frac{B_{*max}}{k + k'' + 1} \tag{13}$$

Quant à  $B_{*m} = \zeta_{*m}^2 - 1$ , il se calcule par l'équation d'Allievi ( $\rho_*'' = 3,68 > 1$ )

$$\zeta_{*m}^2 - \frac{\rho_*''}{\rho''} \zeta_{*m} - 1 = 0 \tag{14}$$

comme si la chambre était de section *infiniment grande*<sup>3</sup>.

On obtient alors les résultats suivants :

<sup>1</sup> Op. cit., page 247.

<sup>2</sup> Voir *Théorie des chambres d'équilibre*, page 46, la condition de validité de la relation (4).

<sup>3</sup> Il est d'ailleurs facile de se rendre compte du peu d'influence du rétrécissement de la chambre dans ce cas, en calculant :

$$c = \frac{0,048}{0,623} \cdot \frac{2,66}{11,36} = 0,018 \text{ très petit vis-à-vis de } 1.$$

A noter aussi que la notation d'Allievi en  $\rho, \theta, \zeta_m$  correspond bien à celle de la conduite forcée, notation qui est devenue, dans le cas où il y a une chambre d'équilibre,  $\rho_*'', \theta'', \zeta_{*m}$  l'astérisque rappelant que ces valeurs relatives sont rapportées à la pression de régime  $H_0$  à l'obturateur.

## Chambre située au haut de la conduite forcée.

Surpression	Fermeture en	2 sec.	10 sec.	30 sec.
$B_{*m}$ à l'obturateur	selon équation (14)	198 %	25,9 %	7,8 %
	d'après M. Jæger	200 %	26,4 %	8,5 %
$\frac{Y_o}{H_o} B_1$ au pied de la chambre	selon form. (13) <sup>1</sup>	4,5 %	0,6 %	0,2 %
	d'après M. Jæger <sup>2</sup>	1,07 %	—	—

Il y a concordance dans les valeurs de  $B_{*m}$  car ces valeurs ne sont pas, dans ce cas, influencées sérieusement par les faibles dimensions de la chambre (en regard de celles de la conduite d'aval). En revanche, la surpression  $B_1$  au pied de la chambre, a de tout autres valeurs que celle calculée par M. Jæger dans cet exemple<sup>1</sup>.

Un diagramme Bergeron, établi dans le cas de la fermeture en 2 sec, donne bien une surpression de 4,5 % au pied de la chambre, en accord avec notre formule (13).

## 3. Chambre à étranglement.

Au point de vue du coup de bélier d'onde, écrivions-nous en 1926<sup>3</sup>, « un étranglement, même très marqué, ne saurait être considéré comme un inconvénient, car une réduction de section ne peut avoir d'effet que pour autant qu'elle s'étend sur une longueur appréciable ». Par longueur appréciable de l'étranglement, au point de vue du coup de bélier, nous entendons une longueur dont le parcours par l'onde nécessiterait un temps comparable à la durée de la manœuvre de l'obturateur<sup>4</sup>.

S'il paraissait encore nécessaire de démontrer l'exactitude de cette proposition, les équations (6), (7) et (8) le permettraient aisément. Comme plus haut, pour que la surpression  $B_m$  au pied de la chambre reste faible ou, ce qui revient au même, pour que la surpression  $B_{*m}$  à l'obturateur se rapproche de la valeur qu'elle aurait dans le cas de la réflexion totale des ondes par un réservoir de section infinie, il est nécessaire et suffisant que le paramètre

$$c = \frac{\rho'}{\rho''} \cdot \frac{\rho'}{\sigma''} = \frac{L'}{L''} \cdot \frac{S}{F}$$

soit assez petit pour être négligeable devant l'unité.

<sup>1</sup> Voir *Théorie des chambres d'équilibre*, page 46, expression (5 b).

<sup>2</sup> *Op. cit.*, p. 248. Il est vrai que, pour les mêmes données, M. Jæger indique ailleurs, p. 259, une autre valeur, de 3 % (au lieu de 1,07) et il estime la concordance « rassurante ». Cette valeur de 3 % coïnciderait d'ailleurs assez bien avec celle de 3,6 %, que nous trouvons pour  $\frac{Y_o}{H_o} B_m$  à la limite, à l'aide de la formule (4).

<sup>3</sup> *Théorie des chambres d'équilibre*, § 43. Conclusion sur la chambre munie d'un étranglement inférieur. Importance dans ce cas du coup de bélier d'onde.

<sup>4</sup> Dans cet ordre d'idées, une longueur de l'étranglement, même de quelques mètres, dont le parcours se ferait en quelques millièmes de seconde ne serait appréciable que si la manœuvre pouvait s'effectuer en quelques dixièmes de seconde, ce qui, dans la réalité, ne se rencontre pas. Avec un temps de fermeture de quelques secondes, il faudrait déjà des longueurs de quelques dizaines de mètres pour qu'elles fussent appréciables ; or la longueur d'un étranglement ne dépasse guère quelques décimètres, éventuellement 1 à 2 mètres.

Or ces équations (6), (7), (8) sont parfaitement applicables au cas de la chambre à étranglement si, pour bien mettre en évidence le rôle de l'étranglement, on admet que  $L'$  et  $F$  soient la longueur et la section, non pas de la chambre proprement dite, mais bien de sa partie étranglée et qu'au delà règne une section suffisamment grande pour qu'on puisse y négliger le coup de bélier.

Constatons, dès lors, que si, en vue de réaliser un étranglement, on donne à  $F$  une valeur même nettement plus petite que la section  $S$  de la conduite forcée, on peut néanmoins éviter toute influence défavorable sur le coup de bélier en choisissant, comme longueur  $L'$  de l'étranglement, une fraction infime de la longueur  $L''$  de la conduite forcée ; et ce n'est jamais là une condition difficile à satisfaire, au contraire.

Mais quelle peut bien être alors la surpression rencontrée par M. Jæger dans ses calculs et qui l'a conduit à prétendre, *urbi et orbi*, qu'une chambre à étranglement fonctionnerait ou « réagirait » très mal, qu'elle serait insuffisante, voire *dangereuse* parce que protégeant imparfaitement la conduite ?<sup>1</sup> Cette surpression « dangereuse » découverte par M. Jæger, n'est précisément que celle qui correspond à la perte de charge créée par l'étranglement lui-même, celle en vue de laquelle l'étranglement est établi, celle qui assure à la chambre à étranglement tout son intérêt au point de vue de l'oscillation en masse. Il est bien évident qu'en adoptant un étranglement il faut s'attendre à devoir en supporter l'effet, mais celui-ci, dans une chambre, calculée rationnellement, ne dépasse pas celui de la surélévation finale du niveau et n'apporte, dès lors, du point de vue de l'oscillation en masse, aucune surcharge nouvelle, par rapport à la chambre sans étranglement.

Il y a lieu de bien remarquer toutefois que, dans une chambre à étranglement, l'effet maximum de surpression provenant de l'oscillation en masse ne se produit plus seulement à la fin de la montée du niveau dans la chambre, mais déjà au début de la montée, dès l'instant que la fermeture est complète. Il ne faut cependant pas cesser de « constater dans les deux phénomènes du coup d'onde et de l'oscillation en masse des causes indépendantes », écrivions-nous encore, « mais du fait qu'ils se produisent, dans la chambre munie d'un étranglement inférieur, simultanément et non plus à des instants éloignés l'un de l'autre, il y a lieu d'ajouter leurs effets respectifs »<sup>2</sup>.

L'exemple numérique choisi par M. Jæger, dans ce cas de la chambre à étranglement, est parfaitement tendancieux, tant par les surpressions exagérées qu'il fait entrer en jeu, que par la valeur *extravagante* de la perte prévue par lui à l'étranglement,  $R_o = 186 m$ , pour une

<sup>1</sup> *Op. cit.*, pp. 249 à 259. Nous nous inscrivons naturellement en faux contre cette assertion, comme le fait aussi d'ailleurs M. L. BERGERON, voir *Revue générale de l'Hydraulique*, 1935, N° 2, chapitre E.

<sup>2</sup> *Théorie des chambres d'équilibre*, pp. 169-170. En outre, si l'on craint les conséquences de cette addition on peut toujours transformer la chambre à étranglement en chambre différentielle par l'adjonction d'un tube central. Du fait du temps nécessaire à la montée de l'eau dans ce tube, l'effet de surpression de l'étranglement s'établit plus progressivement et n'atteint sa plus grande valeur qu'un peu plus tard.

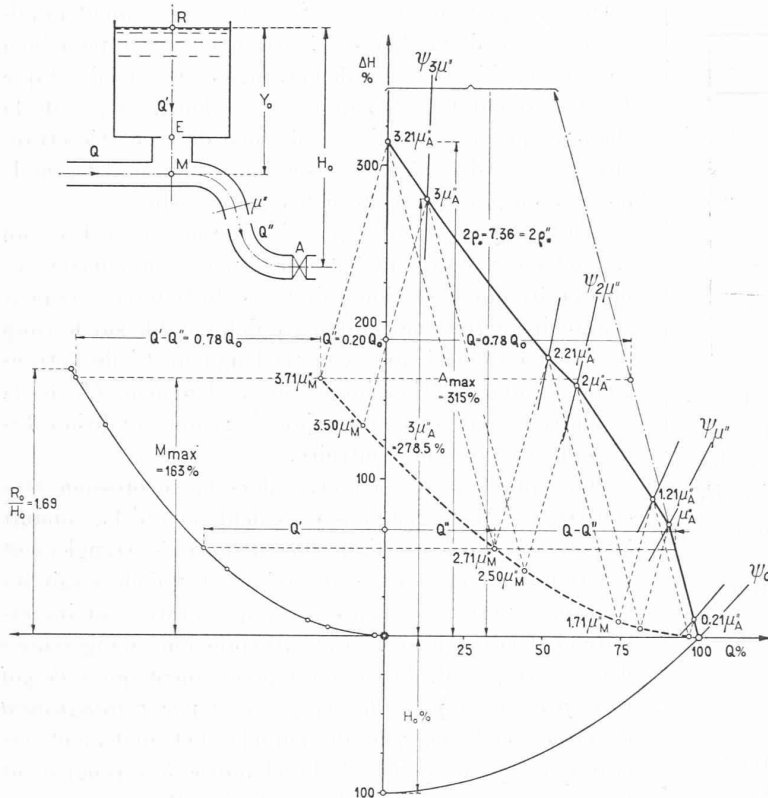


Fig. 6. — Chambre à étranglement. Fermeture en 2 sec. ( $\mu'' = 0,623$  sec.)

chambre ayant  $Y_o = 35,40$  m de hauteur d'eau en régime normal <sup>1</sup>.

Nous avons repris néanmoins le calcul de cet exemple, au moyen d'un diagramme Bergeron (fig. 6) et faisons à son sujet les remarques suivantes : Selon la suggestion que nous avons faite <sup>2</sup>, sans penser naturellement à des pertes  $R_o$  de cet ordre, il faudrait, pour obtenir la surpression maximum totale, ajouter les valeurs approximatives suivantes :

a) à l'obturateur :

la surpression du coup de bélier  $B_{*m} = 198 \%$

l'effet maximum de l'étranglement

$$\frac{R_o}{H_o} = \frac{186}{109} = B_o = 169 \%$$

soit : surpression totale . . .  $B_{*om} = 367 \%$  de  $H_o$

b) au pied de la chambre :

la surpression du coup de bélier  $\frac{Y_o}{H_o} B_1 = 4,5 \%$

l'effet maximum de l'étranglement  $B_o = 169 \%$

Surpression totale . . . . .  $B_1 = 173,5 \%$  de  $H_o$

Or le diagramme Bergeron (fig. 6) fait ressortir des surpressions maximum de 315 % et de 163 % aux points respectifs  $3,21\mu_A$  et  $3,71\mu_M$  dont nos chiffres se rappro-

<sup>1</sup> Nul n'ignore la relation qui doit exister entre la perte de charge maximum due à l'étranglement et la dénivellation finale. Or c'est une chambre de 186 m de hauteur au-dessus de la retenue dont M. Jæger voudrait affaiblir l'installation considérée, utilisant par ailleurs 109 m de chute !

<sup>2</sup> *Théorie des chambres d'équilibre*, page 169.

cheraient beaucoup plus s'il ne s'agissait pas d'un effet démesuré de l'étranglement. Si les chiffres groupés ci-dessus pèchent par excès, cela vaut mieux sans doute que les valeurs de nouveau *trop faibles* de 275,5 % et de 106 % que calcule M. Jæger <sup>1</sup>.

**Conclusions.**

La technique des usines et des machines hydrauliques — telles qu'on les réalise aujourd'hui — permet raisonnablement de ne pas envisager, lors du calcul des conduites forcées, des aléas qui doivent et peuvent être évités en cours d'exploitation. Il ne saurait, en particulier, être question, déjà du point de vue économique, de proposer un renforcement des parois tel qu'il permette à la conduite de supporter des sollicitations supplémentaires qui pourraient lui être imposées par des circonstances s'éloignant singulièrement des conditions de marche normales.

Il est, en effet, bien préférable et il est d'ailleurs possible d'obtenir des constructeurs que les *organes de commande* des dispositifs et appareils destinés à assurer l'écoulement de l'eau, son arrêt, le réglage du débit, soient *conçus et construits de façon qu'une défaillance* des organes mobiles *ne puisse en aucun cas conduire à*

*des ouvertures ou à des fermetures plus rapides que celles prévues dans le calcul des surpressions.*

Il est ensuite indispensable de calculer avec toute l'exactitude et la sécurité désirables les coups de bélier dans les divers points de la conduite, tels qu'ils résultent de la variation du débit qu'est appelée à provoquer la manœuvre normale de l'un ou de l'autre des organes obturateurs. Dès lors, le calcul d'une conduite doit se faire sur la base d'un *programme de manœuvres compatible avec les surpressions admissibles*, avec les possibilités de la construction et enfin avec les exigences du réseau auquel les turbines alimentées par la conduite fournissent la puissance. Or, un tel programme ne peut que conduire — les cas d'accidents demeurant réservés — à des *manœuvres « lentes »*, c'est-à-dire dont la durée est un multiple, souvent d'ordre élevé, du temps nécessaire au parcours de l'onde dans la conduite à l'aller et au retour.

<sup>1</sup> M. Jæger a raison de remarquer que la surpression maximum,  $B_{om}$ , au bas de la chambre, peut dépasser l'effet de l'étranglement  $R_o$  calculé avec le débit de régime  $Q_o$ . Dans la période de contre-coup qui suit la fermeture, la conduite refoule, en effet, un certain débit  $Q''$  qui vient s'ajouter au débit de la galerie  $Q$  pour produire le débit à l'étranglement. Il peut se faire qu'en valeur absolue  $Q + Q'' > Q_o$  mais seulement dans des cas de fermeture *très rapide*. Dans l'exemple considéré il se produit bien, en contre-coup, un refoulement de la conduite  $Q' = 0,20 Q_o$ ; mais le débit de la galerie  $Q = 0,78 Q_o$  a alors suffisamment diminué pour que, malgré tout,  $|Q + Q''| < Q_o$ .

D'ailleurs, si l'on connaît la surpression maximum à l'obturateur  $B_{*m}$  en fin de fermeture, on démontre que la surpression maximum au bas de la chambre  $B_{om}$  s'obtient par l'équation

$$B_{om}^2 - B_{om} \left\{ (2\zeta_*'' + B_{*om}) + \frac{\zeta_*''^2}{B_o} \right\} + \zeta_*''^2 \left[ 1 + \frac{B_{*om}}{2\zeta_*''} \right]^2 = 0$$



La note qui précède montre que, dans le calcul du coup de bélier qui résulte de pareilles manœuvres, il n'est, à moins de cas particulier, *ni nécessaire, ni utile de faire intervenir l'analyse de détail des réflexions partielles* de l'onde aux points de discontinuité pour connaître, en chaque point de la conduite, avec une exactitude suffisante, la valeur de la surpression maximum. Mais il est désirable et facile de se constituer, dès l'abord, un jugement sur la nature de la réflexion des ondes et de se rendre compte si la mesure dans laquelle intervient une discontinuité de la conduite ou une forme particulière de la chambre d'équilibre joue un rôle qu'il vaut la peine d'apprécier par le menu dans le calcul de la surpression maximum.

A cet égard et si la conduite est munie d'une chambre d'équilibre, on peut se rendre compte, par un calcul très simple qui consiste à chiffrer (à l'aide des seules dimensions des ouvrages) *un terme correctif*  $c$ , si l'on est dans un cas où la réflexion des ondes successives par la chambre d'équilibre se fait complètement ou non. Ce terme additionnel  $c$ , ajouté à 1, constitue un simple facteur de correction du coefficient  $\rho_* : \rho''$  dans l'équation d'Allievi qui fait connaître la valeur de la *surpression limite* à laquelle on est pratiquement conduit, à l'obturateur, avec les temps de manœuvre laissés à disposition.

Pour les manœuvres « lentes » (au sens donné ci-dessus), qui seules peuvent être envisagées dans la réalité, l'expérience a montré qu'on obtient la valeur du coup de bélier avec toute l'exactitude désirable en remplaçant, soit la conduite forcée à caractéristiques multiples, soit la chambre d'équilibre à sections multiples, par une conduite et par une chambre fictives de sections constantes, pour chacune desquelles on peut définir une *vitesse moyenne d'écoulement* et une *vitesse moyenne de propagation de l'onde*.

A l'aide de ces deux définitions, basées sur le principe de l'équivalence de la force vive et de la durée de propagation, on ramène donc, dans des conditions *qui satisfont à toutes les exigences de la pratique*, le problème de la conduite à caractéristiques multiples, avec ou sans chambre d'équilibre, au problème de la conduite à caractéristique unique et aux équations d'Allievi ; on ramène, en outre, au point de vue du coup de bélier d'onde, le problème d'une chambre d'équilibre raisonnablement conçue, à sections multiples, sans étranglement ou avec étranglement (ou diaphragme), au problème de la chambre de section constante et aux formules de la « Théorie des chambres d'équilibre » qui donnent des résultats immédiats.

La comparaison, faite sur les données qui précèdent, des divers types de chambres d'équilibre, fait ressortir notamment qu'*aucun type ne mérite, a priori et si la chambre est bien conçue, d'être considéré comme dangereux*, car il suffit, pour rendre pratiquement la réflexion complète, de donner aux diverses régions de la chambre, même à étranglement, des dimensions compatibles avec les exigences du service, et de *telles dimensions sont faciles à réaliser*.

Dès l'instant où la réflexion des ondes par la chambre est pratiquement complète, il devient, de plus, tout à fait spécieux de vouloir associer le problème du coup de bélier d'onde et celui de l'oscillation en masse. Dire que la réflexion est complète par la chambre d'équilibre, n'est-ce pas dire, du même coup, qu'aucune onde montante, venant de l'obturateur aval et arrivant à la bifurcation, ne passe pratiquement dans la galerie d'amenée ? *L'oscillation en masse peut* dès lors, sans aucun scrupule, *être calculée sans tenir compte du coup d'onde*. De plus, nous continuons à être persuadés de la coexistence de ces deux phénomènes qui, au début d'une manœuvre, se superposent, leurs causes demeurant — nous l'avons démontré ailleurs — absolument *indépendantes*.

\* \* \*

Il nous en coûte d'avoir dû — à l'occasion de cette démonstration — apporter des oppositions formelles à diverses thèses de M. Jæger. Mais, étant donné le nombre croissant de ceux qui, ne pouvant songer à s'attaquer aux équations touffues données par lui, s'en remettent à ses conclusions et qui se sentent ébranlés par ses nombreuses publications, il nous a semblé que des affirmations aussi alarmantes ne pouvaient être maintenues sans qu'un contrôle intervînt par d'autres méthodes.

Genève, juillet 1935.

## Durcissement des bétons,

par J. Bolomey, ingénieur, professeur à l'Université de Lausanne.

La résistance probable des bétons peut être calculée par la formule de Feret :

$$R = K \left( \frac{c}{1-s} \right)^2$$

ou par celle, moins générale, mais d'un emploi plus facile sur les chantiers, qui en a été déduite :

$$R = K (C/E - 0,50).$$

$c$  = volume absolu du ciment dans l'unité de volume du béton ;  
 $s$  = volume absolu du ballast dans l'unité de volume du béton ;  
 $C/E$  = rapport du poids du ciment au poids de l'eau de gâchage ;  
 $K$  = coefficient de résistance du ciment utilisé à l'âge considéré.

Le rapport  $c : (1 - s)$  ou  $C/E$  dépend uniquement des conditions de fabrication du béton, c'est-à-dire du *dosage* en ciment, de la *compacité* du béton, de la *quantité d'eau* de gâchage. Cette dernière est, elle-même, fonction de la nature et de la granulation du ballast ainsi que de la consistance du béton.

Le coefficient  $K$  peut varier très fortement suivant : la *nature et la qualité* du ciment utilisé ; la *durée* du durcissement ; la *température et l'humidité* du béton pendant le durcissement.

$K$  est ainsi indépendant des conditions de fabrication du béton et ne dépend que de la qualité du ciment, de la durée et du mode de durcissement.

Dans une précédente étude nous avons rappelé les méthodes et formules permettant de déterminer rapidement, dans chaque cas particulier, la granulation la plus favorable du béton ; de calculer l'eau de gâchage ainsi que la résistance probable du béton correspondant à cette granulation, connaissant la consistance désirée, le dosage en ciment, le coefficient de résistance  $K$ .