L'ÉTUDE DES COUPS DE BÉLIER

DANS LES

CANALISATIONS MÉTALLIQUES SOUS PRESSION

RÉSULTATS OBTENUS PENDANT LA GUERRE
(SUITE)

NOTES DE M. C. CAMICHEL

ACADÉMIE DES SCIENCES (Séances des 7 et 28 août et du 23 octobre 1916)

Sur les coups de bélier ; examen de l'état d'une conduite

Dans les laboratoires d'hydraulique et dans l'industrie, il est nécessaire d'avoir affaire à des conduites bien définies, c'est-à-dire complètement purgées d'air ou contenant des poches d'air de volume connu, en des points déterminés.

L'objet de cette Note est d'indiquer brièvement quelques-uns des moyens qu'on peut employer pour déterminer l'état d'une conduite.

1° La méthode de la dépression brusque que j'ai décrite[1] permet de déterminer la vitesse a de la propagation de l'onde. Si la valeur trouvée pour a concorde avec la formule de M. Allievi, la conduite peut être considérée comme entièrement purgée d'air.

On peut donner une explication simple des graphiques obtenus. Soient l la longueur de la conduite, y_0 la pression statique à l'extrémité aval de celle-ci, ε la vitesse de l'eau et y_1 la pression à l'extrémité de la conduite au moment du maximum de dépression (époque o) ; y_2, y_3, y_4,... désignant les valeurs de la pression aux époques

$$\frac{2\,l}{a},\quad 2\times\frac{2\,l}{a},\quad 3\times\frac{2\,l}{a},$$

on démontre qu'on a

$$y_1 = y_0 - \frac{a\,\varepsilon}{g},\quad y_2 = y_0 + \frac{2\,a\,\varepsilon}{g},\quad y_3 = y_0 - \frac{2\,a\,\varepsilon}{g},\quad \ldots.$$

La dépression revient donc à l'extrémité aval changée de signe et doublée.

2° Pour déterminer la position d'une poche d'air, il suffit d'utiliser la propriété suivante : la dépression provoquée à l'extrémité aval de la conduite, rencontrant une poche d'air, se réfléchit avec changement de signe sur celle-ci. Cette méthode permet de localiser avec précision les poches d'air. M. Joukowski a indiqué un procédé assez voisin de celui-ci.

3° L'emploi des fermetures complètes, de durée inférieure à $\frac{2\,l}{a}$, permet également de savoir si la conduite est complètement purgée ; dans ce cas, la suppression doit être égale à $\frac{av_0}{g}$, v_0 désignant la vitesse de l'eau dans la conduite au moment de la fermeture.

D'ailleurs, le coup de bélier dû à une fermeture instantanée se transmet *intégralement* le long de la conduite, tandis que la présence, à l'extrémité aval de la conduite, d'une poche d'air de volume suffisant pour que la compressibilité du liquide et la dilatation de l'enveloppe soient négligeables donne, comme je l'ai montré, une répartition linéaire du coup de bélier, le long de la conduite, pourvu que celui-ci soit faible vis-à-vis de y_0.

En raison de l'importance actuelle de cette remarque, il est nécessaire de citer un exemple : une conduite de 105^{m}24 de longueur, de 80 ^{mm} de diamètre et de 5^{mm} d'épaisseur (en fer) (cette épaisseur est constante sur toute la longueur de la conduite), était munie de 2 manomètres, placés, l'un, A, au premier tiers amont, où la pression était 13^{m}50 d'eau ; l'autre, B, à l'extrémité aval, où la pression était 16^{m}0 d'eau. Une fermeture brusque a provoqué, à l'extrémité aval, un coup de bélier de 21^{m}60 enregistré par le manomètre B ; le manomètre A a indiqué un coup de bélier de 21^{m}50.

Dans une autre expérience, la même conduite a été munie, à son extrémité aval, d'une poche d'air de 6 600^{cm} mesurés à la pression de 750^{mm}, 2 et à 21° C. ; une fermeture brusque a donné les coups de bélier suivants :

Extrémité aval (manomètre B) . . .	+3,18	—2,33	+2,65
Premier tiers (amont, manomètre B)	+1,06	—0,73	+0,93
Rapport.......	3,0	3,18	2,86

On peut dire, par conséquent, que les fermetures instantanées dans une conduite entièrement purgée sont extrêmement dangereuses pour les portions supérieures de celle-ci ; une poche d'air placée à l'extrémité aval a un rôle efficace pour leur protection.

4° La méthode de l'analyse d'une conduite par un robinet tournant, que j'ai indiquée, permet de rechercher les différentes périodes d'une conduite ; elle est utile dans les laboratoires, mais ne doit être employée dans l'industrie qu'avec la plus grande prudence, en raison des surpressions qu'elle peut donner.

Amplitude des harmoniques impairs dans les coups de bélier.

On doit à MM. de Sparre et Allievi de remarquables travaux sur les phénomènes de résonance. M. de Sparre considère des intervalles de temps égaux à $\frac{2\,l}{a}$, en supposant le distributeur fermé pendant la première période, complètement ouvert pendant la deuxième, fermé pendant la troisième, etc. Il démontre que le coup de bélier devient, par suite des résonances, toujours au moins égal à la hauteur de chute, à condition que l'on ait

$$y_0 > \frac{av_0}{g}.$$

1° J'ai vérifié expérimentalement ce résultat et, en même temps, donné non seulement la valeur maximum, mais encore la valeur minimum de la pression, et envisagé le cas des harmoniques impairs [1].

Soit y_k la pression pendant la k^{ième} période. J'admets que le régime permanent de résonance est établi, ce que je traduis par les hypothèses

$$y_{2n+1} = \text{const.} = \alpha, \qquad y_{2n} = \text{const.} = \beta.$$

En écrivant que le distributeur est fermé aux époques impaires et complètement ouvert aux époques paires, il vient :

$$y_0 + F_{2n+1} - F_{2n} = y_0 + F_{2n-1} - F_{2n-2} = \alpha,$$

$$v_0 - \frac{g}{a}(F_{2n+1} + F_{2n}) = v_0 - \frac{g}{a}(F_{2n-1} + F_{2n-2}) = 0,$$

$$v_0 - \frac{g}{a}(F_{2n} + F_{2n-1}) = v_0\sqrt{1 + \frac{F_{2n} - F_{2n-1}}{y_0}},$$

d'où

$$F_{2n} = \frac{av_0}{2\,g} - \frac{y_0}{2}, \qquad F_{2n+1} = \frac{av_0}{2\,g} + \frac{y_0}{2}$$

[1] *Comptes rendus*, t. 161, 1915, p. 412.

[1] *Sur les coups de bélier, examen de l'état d'une conduite* (*Comptes rendus*, t. 163, 1916, p. 150).

et

$$y_{2n+1} = 2y_0, \qquad y_{2n} = 0.$$

Donc, pourvu que l'on ait

$$y_0 > \frac{av_0}{g},$$

la résonance du fondamental a pour effet de faire varier la charge à l'extrémité aval de la conduite de o à 2 y_0.

La même propriété s'applique aux harmoniques impairs.

L'expérience a été faite au moyen du robinet tournant sur une conduite de fer de 186m80 de longueur, 80mm de diamètre et 5mm d'épaisseur ; elle a pleinement vérifié les conclusions précédentes.

2° *Au moment de la résonance d'un harmonique impair, le débit passe par un minimum.*

3° La répartition des pressions au moment de la résonance est facile à prévoir. Par exemple, quand l'harmonique 3 résonne, la surpression est égale à y_0 au premier tiers amont et à o au deuxième tiers aval. On peut expliquer ainsi certaines ruptures de conduites.

4° On produit dans une conduite des *battements* quand l'ouverture rythmique du distributeur est voisine de celle d'un harmonique impair.

5° On obtient dans une conduite des *ondes entretenues* en munissant celle-ci d'un clapet analogue à celui qui est employé dans les béliers hudrauliques ordinaires, avec cette différence essentielle que ce clapet fonctionne sur la conduite entièrement purgée d'air. Ce clapet permet de vérifier avec la plus grande facilité que la propriété du doublement de la pression est exacte quelle que soit l'ouverture du distributeur, pourvu que la condition $y_0 > \dfrac{av_0}{g}$ soit réalisée

La période du clapet est $\dfrac{4\,l}{a}$; dès qu'il y a de l'air dans la conduite, la période du clapet augmente. Le clapet est employé pour vérifier que la conduite est complètement purgée.

6° Le clapet automatique peut commander un moteur constitué par un simple piston plein actionnant une manivelle.

Ce moteur tourne exactement *au synchronisme* avec le clapet ; sa vitesse est indépendante de la charge ; quand celle-ci est trop grande, le moteur se décroche.

Je n'ai pas pu faire des mesures de rendement sur le moteur que j'ai réalisé ; mais la propriété du minimum de débit, que j'ai indiquée plus haut, permet d'espérer que ce rendement sera satisfaisant.

On trouvera dans un travail qui sera prochainement publié par la *Lumière électrique* le détail des recherches qui viennent d'être résumées.

Sur la détermination de la vitesse de propagation a dans les conduites forcées industrielles.

La détermination de la vitesse de propagation a dans les conduites forcées est une question fondamentale ; or, toutes les expériences connues paraissent donner une vitesse de propagation notablement supérieure à la valeur théorique, calculée d'après les formules de M. Allievi ; je me propose de démontrer, dans cette Note, que cette contradiction provient de la méthode expérimentale employée et qu'elle disparaît si l'on opère avec des précautions convenables. Il est facile de citer des exemples de cette différence entre la vitesse de propagation théorique et la vitesse expérimentale.

Les expériences de l'Ackersand ont donné une période expérimentale inférieure de 4,7 pour 100 à la période calculée. La hauteur de chute était 720 mètres.

Pour la chute du lac Fully, de 1 650 mètres, la valeur théorique de la période est 15s,97, comme l'a calculé M. de Sparre, tandis que la valeur expérimentale trouvée par M. Boucher est 13s,5.

Les expériences que j'ai faites à l'usine Soulom (hauteur de chute 125 m.) avec M. Eydoux, nous ont donné un résultat analogue ; la période propre d'oscillation de la conduite a été 1s,36, tandis que la période théorique était 1s,46.

Mais, en revanche, en appliquant, avec M. Eydoux, la méthode (1) de la dépression brusque à cette conduite, nous avons trouvé une vitesse concordant avec la vitesse théorique.

Pour expliquer la différence entre la valeur de la période propre trouvée expérimentalement et la valeur théorique de la période, je propose de faire intervenir la constitution de la conduite, en tronçons pour lesquels la vitesse et le diamètre diffèrent ; on lira avec intérêt les travaux récents de M. de Sparre (2) et de M. Eydoux (3) sur cette importante question.

M. de Sparre a étudié le coup de bélier dans une conduite formée de deux sections pour lesquelles la durée de propagation est la même ; il considère des périodes $\theta = \dfrac{2\,l}{a} = \dfrac{2\,l'}{a'}$, l et l' étant les longueurs, a et a' les vitesses pour les deux sections. Il a établi une formule générale qu'il a appliquée à la conduite de Fully. Cette formule,

$$\zeta_n(1)^{n-1}\ 130{,}6\,\frac{\cos\dfrac{2n-1}{2}\beta}{\cos\dfrac{\beta}{2}}, \qquad \text{avec} \quad \frac{\beta}{2} = 37^\circ 35',$$

donne le coup de bélier ζ_n (à la fin de la $n^{\text{ième}}$ période θ)

$$\theta = \frac{2\,l}{a} = 3^s{,}972,$$

valeur adoptée en partant de la formule d'Allievi.

En utilisant cette formule, dans le cas d'une fermeture de 4 secondes, j'ai trouvé les périodes suivantes :

15s,2 14s,2 13s,2 14s,2 13s,2 14s,2 13s,4

En excluant la première période pendant laquelle a lieu la fermeture, la moyenne des six périodes est 13s,73, qui diffère peu de la période observée directement par M. Boucher 13s,5. La période théorique est 15s,9.

On voit donc que la période théorique se trouve supérieure à la période expérimentale et que la différence observée entre la période de l'oscillation et la période théorique de la conduite s'explique complètement par la structure de la conduite, formée de tronçons pour lesquels le diamètre et l'épaisseur diffèrent.

On peut en conclure que, pour la détermination, dans les conduites forcées des usines, de la vitesse de propagation a, il est inexact d'utiliser, comme on l'a fait jusqu'ici, l'observation de la période d'oscillation, et qu'il est nécessaire d'employer un procédé faisant intervenir une perturbation de courte durée, par exemple la méthode de la dépression brusque. L'utilisation du robinet de vidange des conduites permet, en général, l'application de cette méthode avec la plus grande facilité.

(1) *Comptes rendus*, t. 161, 1915, p. 412.
(2) *Congrès de la Houille blanche de 1914* (Rapport sur les expériences de Verenon).
(3) *Comptes rendus*, t. 163, 1916, p. 225.