Coup de béliér dû à une fermeture instantanée dans une conduite à caractéristiques multiples

Water hammer caused by instantaneous closure in a multiple characteristic pipe

PAR L. ESCANDE

MEMBRE DE L'INSTITUT,
DIRECTEUR DE L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ÉLECTROTECHNIQUE ET D'HYDRAULIQUE DE TOULOUSE

Cette étude du maximum d'amplitude des surpressions et dépressions consécutives à une fermeture complète instantanée, dans le cas d'une conduite à caractéristiques multiples, met en évidence des valeurs supérieures à celles que conduirait à envisager, suivant un raisonnement pourtant séduisant a priori, la considération du seul tronçon, mettant en jeu la vitesse et la célérité les plus élevées.

This investigation of the maximum amplitude of overpressures and depressions resulting from complete instantaneous closure in a multiple characteristic pipe, produces higher values than those we would expect to get by considering a single section of pipe and introducing maximum flow speed and wave speed, which would however seem to be the most attractive procedure on first sight.

I

Considérons une conduite horizontale de section S , de diamètre D , d'épaisseur e , constants sur toute sa longueur L , parcourue par un débit de régime permanent q_0 à la vitesse V_0 telle que :

$$q_0 = V_0 S$$

On sait qu'une fermeture instantanée complète de l'extrémité aval de cette conduite provoque, en l'absence de poches d'air ou de phénomènes de cavitations, un régime de surpressions et de dépressions alternées d'amplitudes égales à :

$$\xi' = \frac{aV_0}{g}, \quad \xi'' = -\frac{aV_0}{g} \quad (1)$$

a désignant la vitesse de propagation des ondes dans la conduite, de période :

$$T = \frac{4L}{a} = 2\theta$$

θ représentant la durée d'un aller et retour d'onde d'un bout à l'autre de la conduite.

Pour qu'il ne se produise pas de cavitations, il faut évidemment que l'on ait :

$$\frac{aV_0}{g} < y_0 + y_{at}$$

y_0 désignant la pression statique sur l'axe de la

conduite et y_{at} la pression atmosphérique, toutes deux exprimées en hauteur d'eau.

Le problème se présente de façon moins simple pour les conduites à caractéristiques multiples des usines de hautes chutes dont l'épaisseur augmente constamment de l'amont vers l'aval et dont la section elle-même peut correspondre à plusieurs diamètres différents, allant en diminuant de l'amont vers l'aval dans le cas des conduites télescopiques.

Dans tous les cas pratiques, la pente :

$$\frac{a}{gS}$$

des droites caractéristiques de la méthode graphique de Schnyder-Bergeron augmente de l'amont vers l'aval, du fait de la croissance de a avec e ou de la décroissance de S .

On sait, d'autre part, qu'une fermeture instantanée de l'extrémité aval d'une conduite à caractéristiques multiples engendre une surpres-

sion supérieure à celle que donne l'expression :

$$\frac{a_m V_{0m}}{g}$$

a_m étant la vitesse moyenne de propagation des ondes le long de la conduite et V_{0m} la vitesse pondérée équivalente à l'ensemble des vitesses mises en jeu dans les divers tronçons de la conduite, compte tenu des masses liquides correspondantes; pour une conduite à diamètre constant, on a évidemment : $V_{0m} = V_0$.

Dans le présent travail, nous exposons les résultats que nous avons obtenus en étudiant le maximum d'amplitude des surpressions et dépressions consécutives à une fermeture complète instantanée dans le cas d'une conduite à caractéristiques multiples.

Cette étude met en évidence des valeurs supérieures à celles que conduirait à envisager, suivant un raisonnement pourtant séduisant *a priori*, la considération du seul tronçon aval, mettant en jeu la vitesse et la célérité les plus élevées.

II

Considérons, en effet, une conduite télescopique dans laquelle le tronçon aval de longueur L_1 correspond à la plus petite section S_1 et à la plus forte vitesse de propagation des ondes a_1 , la vitesse de régime permanent V_{01} étant donc supérieure à la valeur qu'elle possède dans les tronçons placés plus en amont.

Une fermeture instantanée de l'extrémité aval A engendre immédiatement en ce point une surpression :

$$\xi'_1 = \frac{a_1 V_{01}}{g} = \frac{a_1 q_0}{gS} \quad (3)$$

qui subsiste intégralement jusqu'à l'instant :

$$\theta_1 = \frac{2 L_1}{a_1}$$

où le retour en A de l'onde réfléchie au changement de caractéristique réduit quelque peu la surpression initiale. On a évidemment :

$$\xi'_1 > \frac{a_m V_{0m}}{g}$$

du fait que, par hypothèse, on vérifie les inégalités :

$$a_1 > a_m \quad \text{et} \quad V_{01} > V_{0m}$$

Le raisonnement auquel nous avons fait précédemment allusion serait alors le suivant :

Si la portion amont de longueur $(L - L_1)$ de la conduite avait les mêmes caractéristiques que le tronçon aval L_1 , ξ'_1 donné par l'expression (3) représenterait l'amplitude maximum des surpressions et dépressions consécutives.

Le fait, qu'en réalité, dans cette portion amont de la conduite de longueur $(L - L_1)$ les vitesses V_0 et les célérités a sont respectivement inférieures aux valeurs V_{01} et a_1 , semblerait devoir inciter à penser que les surpressions et dépressions engendrées dans la conduite considérée ne pourraient avoir que des amplitudes inférieures ou au plus égales à celle de ξ'_1 .

Il n'en est rien et, par le jeu des réflexions successives, les amplitudes de la surpression et de la dépression maxima peuvent dépasser ξ'_1 , comme nous allons le montrer.

FIG. 2

III

Considérons le cas particulièrement simple d'une conduite à caractéristiques multiples constituée (fig. 1) de deux tronçons correspondant à

FIG. 1

une égale durée de parcours des ondes :

$$\frac{\theta_1}{2} = \frac{L_1}{a_1} = \frac{\theta_2}{2} = \frac{L_2}{a_2}$$

l'indice 1 concernant le tronçon aval Aa, l'indice 2 le tronçon amont aB.

Les données numériques sont les suivantes :

$$q_0 = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\xi'_1 = \frac{a_1 V_{01}}{g} = 50 \text{ m} = 2 \frac{a_2 V_{02}}{g}$$

$$\theta_1 = \theta_2 = 1 \text{ s}$$

FIG. 3

Cette valeur commune de θ_1 et θ_2 est prise comme unité de temps pour la construction graphique. La pression statique y_0 est supposée assez grande pour qu'il n'y ait pas de cavitations.

Les étapes successives de la construction graphique sont reproduites, pour plus de clarté, sur des figures différentes :

fig. 2... de 0 s à un peu plus de 13 s

fig. 3... de 12 s à un peu plus de 26 s

fig. 4... de 25 s à un peu plus de 38 s

fig. 5... de 35 s à un peu plus de 51 s

La construction montre que la surpression ob-

FIG. 4

FIG. 5

tenue est périodique, la période étant de 102 s; de plus, les symétries suivantes apparaissent, en posant $T'=102$ secondes :

$$f(t+T'/2) = -f(t), f(T'/4+t) = f(T'/4-t)$$

La figure 6 donne la surpression, en fonction du temps, en A. On voit que la surpression $\xi'_1=50$ m, qui règne en A pendant la première seconde, est dépassée, pour la première fois, pendant la 8^e seconde, où la surpression atteint 59 m, le maximum maximum de 61 m étant obtenu pendant la 54^e seconde.

FIG. 6

En ce qui concerne la dépression maximum maximum, elle est réalisée d'emblée pendant la 3^e seconde, avec la même amplitude de 61 m.

La surpression et la dépression maxima ont donc une amplitude commune de 61 m supérieure de 22 % à $\zeta'_1 = 50$ m, ce qui démontre bien le résultat que nous avons énoncé.

En pratique, la dépression maximum intervenant à la 3^e seconde, l'onde n'aura guère subi d'amortissement appréciable et la valeur théorique de 61 m sera bien effectivement atteinte : il n'en sera probablement pas de même de la surpression maximum théorique qui ne se produit

FIG. 7

FIG. 8

qu'à la 54^e seconde, mais, par contre, la valeur de 59 m, relative à la 8^e seconde, aura toutes chances d'être sensiblement réalisée.

Les figures 7 et 8 reproduisent les courbes donnant respectivement en fonction du temps, les débits, d'une part, et les surpressions, d'autre part, au point a.

Enfin, la figure 9 est relative au débit en B : on observe l'amplitude des variations qui atteint 0,84 m³/s, valeur très supérieure à celle de 0,5 m³/s qui interviendrait dans le cas d'une conduite à caractéristique unique sur toute sa longueur.

FIG. 9

IV

Nous venons d'étudier, sur un cas particulier de conduite à caractéristiques multiples constituée de deux tronçons, la surpression produite par une fermeture instantanée, en supposant la pression statique y_0 assez grande pour qu'il n'y ait pas de cavitations.

Nous reprenons l'étude du même problème, avec les mêmes données numériques, mais en supposant maintenant la pression statique y_0 égale à 40 m et la pression atmosphérique y_{at} égale à 10 m.

Dans ces conditions, on a toujours :

$$\zeta'_1 = \frac{a_1 V_{01}}{g} = 50 \text{ m}$$

de telle sorte que :

$$\zeta'_1 = y_0 + y_{at}$$

Dans le cas d'une conduite à caractéristique unique sur toute sa longueur correspondant aux valeurs a_1 et V_{01} , on se trouverait donc exactement placé à la limite voulue pour que n'apparaissent pas les cavitations.

Par contre, avec la conduite composée de deux tronçons, dès le premier retour d'onde, pendant la 3^e seconde, comme le montre la construction graphique de la figure 10, une cavité se forme à l'extrémité aval de la conduite, en A : de ce fait, dès la 5^e seconde, il existe en A une surpression égale à 72 m et donc très supérieure à la surpression maximum de 61 m constatée en l'absence de cavitations.

Nous avons poursuivi, comme le montrent les figures successives 11, 12 et 13, les diverses étapes de la construction graphique pour voir si le maximum de 72 m, constaté à la 3^e seconde, ne pouvait pas être dépassé dans la suite.

FIG. 12

FIG. 13

En fait, comme on le voit sur la figure 13, pendant une fraction de la 16^e seconde, la surpression atteint 92 m.

Etant donné la complication de la construction graphique résultant du fractionnement de chaque intervalle de temps, par le jeu des cavités intermittentes engendrées en A, nous n'avons pas poussé plus loin la construction graphique, de telle sorte que nous ne savons si cette valeur de 92 m ne serait pas elle-même dépassée par la suite.

Quoiqu'il en soit, il suffit de rapprocher les

chiffres de 72 m et de 92 m du maximum de 61 m, que nous avons obtenu dans l'étude relative au cas où il n'y a pas de cavitations, pour pouvoir conclure.

La constitution de la conduite en deux tronçons de caractéristiques différentes, du fait qu'elle entraîne un phénomène de cavitation, qui n'existerait pas si la conduite était à caractéristique unique, majeure dans des proportions beaucoup plus importantes qu'en l'absence de cavitations, la surpression maximum engendrée au distributeur.

DISCUSSION

Président : M. FERRY

M. le Président rend hommage à la clarté et à la rapidité coutumières de l'exposé de M. ESCANDE.

M. ESCANDE ajoute quelques mots à sa communication, sur le fait de la fermeture instantanée, qui n'intervient jamais en exploitation normale, mais que l'on rencontre malheureusement dans le cas d'expertise d'accident. Il rappelle un accident, survenu à Saint-Etienne-Cantalès, où une vanne de 2 m environ de diamètre s'était fermée, d'après le calcul, en 0,16 s. Ce n'est pas instantané, mais c'est tout de même très court.

M. le Président signale qu'il a eu occasion de voir le résumé d'une étude, datant de 1938, où l'on schématisait la conduite à caractéristiques multiples de manière plus complexe. D'une part, le diamètre de la conduite, d'autre part, la célérité des ondes, variaient linéairement entre l'extrémité de la conduite et le réservoir. Avec ces données, en cas de fermeture instantanée, on trouvait

des majorations de l'ordre de 150 % par rapport à la valeur de aV_0/g correspondant aux caractéristiques à l'extrémité aval, alors que M. ESCANDE arrive seulement à 22 % pour le cas qu'il a étudié. C'est dire qu'en cas de fermeture instantanée, les conduites réelles n'auraient sans doute pas beaucoup de chances de survivre; mais heureusement les phénomènes véritablement instantanés n'existent pas.

M. ESCANDE signale que, en dehors de la fermeture instantanée, ces résultats se maintiennent d'une façon à peu près intégrale dans ce qu'on appelle la fermeture brusque qui, dans le cas d'une conduite à caractéristique unique, est celle qui se fait en un temps inférieur à $2L/a$ (cas à Saint-Etienne-Cantalès).

M. ESCANDE signale encore un autre cas, l'usine du Lac Noir, où il y avait des phénomènes de surpression très élevés, bien que non rigoureusement instantanés.