L'ÉTUDE DES COUPS DE BÉLIER

DANS LES

CANALISATIONS MÉTALLIQUES SOUS PRESSION

RÉSULTATS OBTENUS PENDANT LA GUERRE

(SUITE)

NOTE DE M. LE COMTE DE SPARRE

Au sujet des coups de bélier dans une conduite forcée, formée de deux sections de diamètres différents (Académie des Sciences, Séance du 26 novembre 1916).

J'ai précédemment [1], pour le cas d'une fermeture brusque, examiné le cas d'une conduite formée de trois ou de deux sections de diamètres différents, dans le cas où la durée de propagation est la même pour les différentes sections. Je me propose, dans ce qui va suivre, d'examiner le cas d'une conduite formée de deux sections de longueur quelconque et pour une loi de fermeture également quelconque.

Soient : l, d et a la longueur, le diamètre et la vitesse de propagation, pour la section voisine du distributeur ; l', d', a' les mêmes quantités pour la section voisine de la prise d'eau ; λ le rapport de la surface ouverte du distributeur, à un instant quelconque, à celle correspondant à l'ouverture complète : v_1 la vitesse de régime dans la première section voisine du distributeur, lorsqu'il est complètement ouvert : v cette vitesse à un instant quelconque.

Si y est la pression en hauteur d'eau, on a, comme on sait [2], en un point situé à une distance x du distributeur,

$$(1) \qquad y = y_0 + F\left(t - \frac{x}{a}\right) - f\left(t + \frac{x}{a}\right),$$

$$(2) \qquad v = \lambda_0 v_1 - \frac{g}{a}\left[F\left(t - \frac{x}{a}\right) + f\left(t + \frac{x}{a}\right)\right].$$

Si $\xi(t)$ désigne le coup de bélier au distributeur, qui est égal à $y - y_0$, on aura en ce point

$$v = \lambda v_1 \sqrt{1 + \frac{\xi(t)}{y_0}},$$

ou, avec une approximation suffisante, si le coup de bélier ne dépasse pas environ la moitié de la pression statique,

$$(3) \qquad v = \lambda v^1 - \left(1 + \frac{\xi(t)}{2y_0}\right).$$

En faisant alors $x = 0$ dans les équations (1) et (2), tenant compte de la relation (3) et posant de plus

$$(4) \qquad \rho = \frac{a v_1}{2 y_0},$$

on aura

$$(5) \qquad F(t) = \rho y_0 [\lambda_0 - \lambda(t)] + \frac{1}{2}\xi(t)[1 - \rho\lambda(t)],$$

$$(6) \qquad f(t) = \rho y_0 [\lambda_0 - \lambda(t)] - \frac{1}{2}\xi(t)[1 + \rho\lambda(t)].$$

D'une façon semblable, si y et v désignent la pression en hauteur d'eau et la vitesse, en un point de la seconde section, voisine de la prise d'eau, on aura

$$(7) \qquad y' = y_0 + F'\left(t - \frac{x'}{a'}\right) - f'\left(t + \frac{x'}{a'}\right),$$

$$(8) \qquad v' = \lambda_0 v_1' - \frac{g}{a'}\left[F'\left(t - \frac{x'}{a'}\right) + f'\left(t + \frac{x'}{a'}\right)\right].$$

[1] Comptes rendus t. 156, 1913, p. 1521 et Rapport au Deuxième Congrès de la Houille Blanche ».

[2] En vertu de la théorie de M. Alliévi.

D'ailleurs, la pression doit être la même à la jonction [1], qu'elle soit exprimée par la formule (1) pour $x = t$, ou par la formule (7) pour $x' = 0$. Si, par suite, on pose

$$(9) \qquad \theta + \frac{2l}{a},$$

on aura

$$(10) \qquad F\left(t - \frac{\theta}{2}\right) - f\left(t + \frac{\theta}{2}\right) = F'(t) - f'(t).$$

On aura, de plus, par l'équation de continuité, pour deux points des deux sections, voisins de la jonction,

$$(11) \qquad vs = v's', \qquad v_1 s = v_1' s'.$$

Ces équations, si l'on pose de plus

$$(12) \qquad \alpha = \frac{a's}{as'},$$

donneront, en tenant compte de l'équation (8) ou l'on fait $x' = 0$ et de l'équation (2) où l'on fait $x = l$,

$$(13) \qquad \alpha\left[F\left(t - \frac{\theta}{2}\right) + f\left(t + \frac{\theta}{2}\right)\right] = F'(t) + f'(t).$$

D'ailleurs, pour $x' = l'$, l'équation (7) donne $y' = y_0$. On doit donc, si l'on pose

$$(14) \qquad \frac{\theta' = 2l'}{a'},$$

avoir

$$F'\left(t - \frac{\theta}{2}\right) - f\left(t + \frac{\theta'}{2}\right) = 0.$$

ou, en changeant t en $t - \frac{\theta'}{2}$,

$$(15) \qquad f'(t) = F'(t - \theta').$$

Nous déduirons alors des équations (10), (13) et (15)

$$(16) \qquad F'(t) = \frac{1+\alpha}{2}F\left(t - \frac{\theta}{2}\right) - \frac{1-\alpha}{2}f\left(t + \frac{\theta}{2}\right),$$

$$(17) \qquad F'(t - \theta') = \frac{1+\alpha}{2}f\left(t + \frac{\theta}{2}\right) - \frac{1-\alpha}{2}F\left(t - \frac{\theta}{2}\right).$$

Nous remarquerons d'abord que, du moment qu'on suppose que l'oscillation qui se produit est l'oscillation fondamentale, on a

$$f(t) = 0 \qquad \text{pour } t \leqq 0.$$

On a donc pour la première période de durée θ, en vertu de (6),

$$(18) \qquad \xi(t) = 2\rho y_0 \frac{\lambda_0 - \lambda(t)}{1 + \rho\lambda(t)}.$$

Pour la même raison, pour $\frac{\theta}{2} < t \leqq \theta' + \frac{\theta}{2}$, on a

$$F'(t - \theta') = 0.$$

et l'équation (17) donne par suite

$$(1+\alpha)f\left[\left(t + \frac{\theta}{2}\right) - \left(1 - \alpha\right)\right]F\left(t - \frac{\theta}{2}\right) = 0.$$

Si, par suite, on pose

$$(19) \qquad \mu = \frac{1-\alpha}{1+\alpha},$$

et si, dans l'équation précédente on change t en $t - \frac{\theta}{2}$, on aura, pour $\theta \leqq t < \theta + \theta'$,

$$f(t) - \mu F(t - \theta) = 0.$$

Remplaçons dans cette équation $f(t)$ et $F(t - \theta)$ par leurs valeurs tirées de (5) et (6) : nous aurons, pour $0 < t \leqq \theta + \theta'$,

[1] Ceci n'est qu'approché, car toute variation de vitesse, s'il n'y a pas de perte de charge, entraîne une variation de pression ; mais, pour le cas actuel, cette variation est complètement négligeable.

$$\xi(t) = 2\rho y_0 \frac{\lambda_0 - \lambda(t) - \mu[\lambda_0 - \lambda(t-\theta)]}{1+\rho\lambda(t)} \tag{20}$$
$$- \mu\xi(t-\theta)\frac{1-\rho\lambda(t-\theta)}{1+\rho\lambda(t)}.$$

Les formules (18) et (20) permettent de calculer de proche en proche le coup de bélier pour $t \leqq \theta + \theta'$.

Supposons maintenant $t > \theta + \theta'$. Si, dans la formule (16), nous changeons t en $(t - \theta')$ et si nous égalons la valeur de F $(t - \theta')$ ainsi obtenue à sa valeur (17), nous aurons, en tenant compte de (19),

$$F\left(t - \theta' - \frac{\theta}{2}\right) - \mu f\left(t - \theta' + \frac{\theta}{2}\right) = f\left(t + \frac{\theta}{2}\right) - \mu F\left(t - \frac{\theta}{2}\right).$$

Si, dans cette formule, nous changeons t en $t - \frac{\theta}{2}$, nous aurons, pour $t > \theta + \theta'$,

$$f(t) - F(t - \theta' - \theta) + \mu f(t - \theta') - \mu F(t - \theta) = 0.$$

Si, dans cette formule, nous remplaçons f et F par leurs valeurs (5) et (6), nous aurons

$$\left\{\begin{aligned} \xi(t) &= 2\rho y_0 \frac{\lambda(t-\theta-\theta') - \lambda(t) + \mu\lambda(t-\theta) - \mu\lambda(t-\theta')}{1+\rho\lambda(t)}, \\ &- \frac{1-\rho\lambda(t-\theta-\theta')}{1+\rho\lambda(t)}\xi(t-\theta-\theta') \\ &- \mu\frac{1+\rho\lambda(t-\theta')}{1+\rho\lambda(t)}\xi(t-\theta') - \mu\frac{1-\rho\lambda(t-\theta)}{1+\rho\lambda(t)}\xi(t-\theta), \end{aligned}\right. \tag{21}$$

formule absolument générale qui, quelle que soit la loi d'ouverture ou de fermeture, permet de calculer le coup de bélier à un instant quelconque, pour $t > \theta + \theta'$.

LE CANAL DE LA BELGIQUE AU RHIN

COMPLÉMENT DE LA BARRIÈRE DU RHIN

LES GRANDES VOIES DE NAVIGATION INTÉRIEURE DE L'EUROPE APRÈS LA GUERRE

Au cours d'une longue série de siècles, les hommes ont fait tous leurs transports par voie d'eau à l'intérieur des continents. Les premières civilisations se sont développées le long du Nil et des fleuves d'Asie. En Europe, à l'aube de l'histoire, les hommes du néolithique et les Celtes suivaient les rivières avec leurs barques, sauf à les porter en passant d'un bassin à un autre. L'empire romain étendait et maintenait sa domination en employant au mieux les chemins qui marchent Pendant tout le moyen âge et au début des temps modernes, c'était encore sur l'eau que se faisaient les transports les plus importants. Au XVII[e] et au XVIII[e] siècle, le gouvernement de la monarchie française comprenait que la prospérité nationale était liée à l'exécution de voies de navigation artificielles ; il commençait avec lenteur l'exécution d'un programme qui se poursuivait encore au XIX[e] siècle, sous la Restauration, lorsque les chemins de fer ont fait leur apparition.

Pendant un temps qui est très court, si on le rapporte à la durée d'une nation, et qui est tout proche du nôtre, presque tous les économistes et les ingénieurs ont paru penser que la voie ferrée devait faire disparaître tout mouvement sur la voie d'eau. On ne semblait pas croire à une simple crise de l'histoire des voies navigables, due seulement à la nécessité de consacrer, pendant quelques décades, toutes les ressources financières disponibles à l'établissement de voies ferrées indispensables. L'opinion se répandait que le transport d'une tonne de marchandise par péniche coûtait au public à peu près aussi cher que le transport d'un même poids pouvait coûter à une Compagnie de chemins de fer, pour le même parcours et en faisant abstraction de la rémunération du capital engagé.

Cette opinion provenait de ce que la comparaison se faisait entre la voie ferrée perfectionnée, puissamment outillée, et la voie navigable de petite section du XVIII[e] siècle ou de la première moitié du XIX[e] siècle parcourue par de petites péniches. Les transports de la navigation intérieure, pour être économiques, doivent être faits par chalands de fort tonnage, sur voies navigables de forte section et faible pente : en ce cas, le coût de la tonne kilométrique par voie d'eau peut tomber à moitié de ce qu'il est sur le chemin de fer [1] de même parcours. La navigation intérieure est faite pour desservir les courants de fort trafic, là où le tonnage suffit pour payer les frais élevés de construction qu'exigent des canaux ou des rivières canalisées à grande section

Elle ne convient donc plus qu'à un nombre relativement petit de voies de transport ; mais parallèlement aux grands courants d'échanges, elle permet des transports de tonnages qu'on n'aurait jamais envisagés il y a cinquante ans et crée un développement industriel intense qui réagit sur l'activité des voies ferrées. Les voies ferrées et voies fluviales, loin de se nuire les unes aux autres, s'apportent un mutuel appui. L'Allemagne, convaincue de cette vérité, s'est décidée la première à exécuter de grands travaux de fleuves et de canaux ; et l'Europe presque entière est intéressée aujourd'hui à développer un réseau à très grandes mailles de voies navigables qui relieront entre elles ses grandes plaines.

L'eau a un autre avantage que de permettre le déplacement des marchandises avec un minime travail. Elle ne fait que passer là où elle tombe et où elle coule ; elle n'est gardée par aucune nation ; dans les canaux et les rivières, elle unit et sépare à la fois les provinces qui l'utilisent ; elle coule dans des voies qu'on peut faire très larges, où les croisements et stationnements sont partout possibles. Ces voies peuvent, là où l'intérêt de l'humanité l'exige, être des voies du domaine public international, accessibles aux bateaux de tous pays. On peut souhaiter qu'au prochain Congrès de la paix rien ne soit oublié de ce qui peut asseoir les bases d'établissement de ce domaine international

La Grande Guerre ayant ouvert à ce sujet des points de vue entièrement nouveaux, on a l'espoir que la plus modeste contribution apportée à cette étude aura quelque utilité.

I. — LES VOIES NAVIGABLES DU FUTUR ÉTAT TCHÉCO-SLOVAQUE

Pour voir l'ensemble des voies navigables de l'Europe, il faut se placer en Bohême, où une vieille nation a fait des efforts surhumains afin de retrouver son indépendance. Le futur Etat tchéco-slovaque sera au centre de l'Europe, il ne pourra pas, comme la Pologne, avoir un port sur la Baltique : comment pourra-t-il librement communiquer avec le monde entier, avec le monde slave en particulier ?

Il sera en contact direct avec la Pologne , mais il sera séparé de la Yougo-Slavie avec laquelle ses rapports de commerce devraient être très actifs, en raison de la sympathie de race et aussi des différences de productions des deux

(1) Aux prix d'avant-guerre six à sept millimes par tonne kilométrique au lieu de treize