

Ainsi le module du canal de la Bourne devrait être 180 litres, il est de 28 ; celui du canal de Saint-Martory fixé expérimentalement à 15 litres atteint, en réalité, 42. Les résultats fâcheux de leur emploi sont expliqués d'une manière frappante par la valeur complètement fautive du module adopté. De pareils errements sont très graves, ils rendent d'une part, totalement inutiles les frais d'établissement souvent très élevés du canal et discréditent ensuite l'irrigation aux yeux des agriculteurs, alors que convenablement conduite, celle-ci assure toujours un rendement des récoltes beaucoup plus élevé que lorsqu'elle n'est point pratiquée.

L'intérêt des études de MM. Müntz et Lainé est donc considérable ; au moment où, grâce à l'activité de nos commerçants, industriels et législateurs, l'aménagement du Rhône va entrer dans la voie des réalisations, ou des capitaux considérables puisque se chiffrant par milliards, vont être engagés, il n'était pas inutile, croyons-nous, de les rappeler, de les résumer.

Il faudrait aussi pouvoir, par des conférences au village, des publications dans les journaux régionaux et agricoles, des indications spéciales dans les cours d'adultes également, attirer vigoureusement l'attention des agriculteurs sur l'importance de l'irrigation. Le développement de celle-ci dans une région détermine une transformation totale des méthodes de culture ; cette transformation est très difficile à provoquer dans notre pays : le grand morcelage de la propriété détermine, en effet, un nombre considérable de propriétaires, la difficulté pour les convaincre de leur routine est évidemment beaucoup plus forte que dans les régions de vastes domaines. En outre, les entreprises d'irrigation sont coûteuses, leur rapport longtemps faible, et souvent les sociétés privées ont été acculées dans des travaux de cette espèce à la faillite.

Le concours de l'Etat, dans la propagande à faire, dans la partie financière des travaux d'arrosage est indispensable. MM. Müntz et Lainé insistent justement sur ce point de vue, montrant d'ailleurs les bénéfices que l'Etat retirera, soit directement par les impôts, soit indirectement par l'accroissement général de la richesse publique ; à l'appui de leur opinion, ils citent l'avis des principaux hydrauliciens qui, à l'étranger, ont eu à diriger de telles entreprises, à en évaluer les conséquences financières. Tous arrivent à cette conclusion que l'intervention de l'Etat est une nécessité. M. de Lhaurado en Espagne, M. Barrois en Egypte, les ingénieurs ayant créé le riche réseau d'arrosage de l'Italie sont des adeptes de cette thèse.

C'est d'ailleurs, à elle que s'est rallié le récent Congrès de Grenoble pour l'Aménagement du Rhône ; l'Etat devra soutenir par son crédit, en assurant l'intérêt des obligations de la Société créée, l'entreprise en général, l'irrigation en particulier.

Les travaux de MM. Müntz et Lainé arrivent donc à leur heure, leur valeur est indéniable : *L'étude des propriétés physiques des terres doit faire partie de l'établissement des avants-projets des canaux d'arrosage, ce n'est qu'à cette condition que l'irrigation pourra être établie sur des bases précises et conduire à un bon résultat.*

Or, les méthodes indiquées dans ces pages aboutissent à un résultat pratique : « A mesure que nous avançons dans nos recherches, écrivent leurs auteurs, se fortifiait en nous la conviction que la voie que nous suivions était féconde ».

Cela est exact, l'étude de ces savants est un travail de longue haleine, patient, laborieux, permettant une réalisation : indiquer ce résultat est le plus bel éloge que l'on puisse faire de leur œuvre.

J. LEMARCHANDS,
Agrégé de l'Université

L'ÉTUDE DES COUPS DE BELIER

DANS LES
CANALISATIONS MÉTALLIQUES SOUS PRESSION

RÉSULTATS OBTENUS PENDANT LA GUERRE
(SUITE)

NOTES DE M. C. CAMICHEL

ACADÉMIE DES SCIENCES (Séances du 20 septembre et du 4 octobre 1915)

Sur les coups de bélier ; oscillations en masse.

Les coups de bélier dans les conduites ont donné lieu à des recherches théoriques de MM. Allievi, Boussinesq, Joukovsky, Rateau, de Sparre, etc., mais il existe encore peu d'études expérimentales de ce phénomène. Au cours d'un travail entrepris en collaboration avec M. Eydoux, ingénieur des Ponts et Chaussées, j'ai eu l'occasion de faire diverses expériences préliminaires dont j'indiquerai brièvement, dans cette Note, les résultats les plus importants.

Prenons d'abord une conduite possédant des poches d'air de volumes suffisants pour que la compressibilité du liquide et la dilatation de l'enveloppe soient négligeables. Les oscillations en masse qui se produisent dans ce cas, par exemple à l'ouverture ou à la fermeture, sont très importantes ; car on les observe fréquemment dans les canalisations d'eau des villes et dans les conduites des usines, où elles peuvent donner des phénomènes de résonance. M. Rateau a étudié ces oscillations dans le cas d'une poche d'air ; on peut étendre les résultats obtenus à n poches d'air. On suppose alors que la conduite se subdivise en tronçons limités par les poches d'air ; chaque tronçon ayant dans toute sa longueur une vitesse déterminée.

L_1, L_2, L_3, \dots désignant les distances du commencement de la conduite (côté amont) aux divers réservoirs d'air ;

H_1, H_2, H_3, \dots les pressions aux points où se trouvent ces divers réservoirs d'air ;

U_1, U_2, U_3, \dots les volumes de ces réservoirs ;

$$H_1(1 + z_1), \quad H_2(1 + z_2), \quad H_3(1 + z_3),$$

désignant les pressions provenant du coup de bélier, au temps t , aux points où se trouvent les divers réservoirs ;

H la section ambiante ;

S la section de conduite ;

v_1 la vitesse à l'instant t , dans la première portion de longueur L_1 ;

v_2 la vitesse dans la seconde portion de longueur $L_2 - L_1$;

v_3 la vitesse dans la troisième portion de longueur $L_3 - L_2$.

On a les formules suivantes :

$$(1) \quad v_1 - v_2 = a \frac{dz_1}{dt},$$

$$(2) \quad v_2 - v_3 = b \frac{dz_2}{dt}, \dots,$$

$$(3) \quad \frac{L_1}{g} \frac{dv_1}{dt} = -H_1 z_1,$$

$$(4) \quad \frac{L_2 - L_1}{g} \frac{dv_2}{dt} = -H_2 z_2 + H_1 z_1, \dots,$$

avec

$$a = \frac{U_1 H_1}{\gamma S(H + H_1)}, \quad b = \frac{U_2 H_2}{\gamma S(H + H_2)}, \quad \gamma = \frac{C}{c} = 1,41.$$

Ces formules supposent que les compressions et dilatations

de l'air se font adiabatiquement et que les coups de bélier étudiés sont très faibles.

Les expériences ont porté sur deux conduites : l'une, de 30^{cm} de diamètre et de 30^m de longueur ; l'autre, de 3^{cm} de diamètre et de 12^m,50 de longueur.

1° Dans le cas d'une seule poche d'air placée à l'extrémité inférieure de la conduite, on a la formule (3) qui a été donnée par M. Rateau. Cette formule montre que la répartition du coup de bélier est linéaire dans la conduite, puisque $\frac{dv_1}{dt}$ est constant d'un bout à l'autre de celle-ci. L'expérience vérifie complètement ce résultat.

On déduit de l'équation précédente la formule suivante qui donne la période T d'oscillation de l'eau :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L_1}{g} \frac{U_1}{S_1(H_1 + H)}}$$

L'expérience vérifie complètement cette formule. Voici quelques chiffres :

Période calculée en supposant le phénomène adiabatique.	Période observée.	Temperature ambiante.
0,669	0,662	2°C.
0,626	0,642	
0,551	0,537	
0,500	0,491	
0,418	0,404	
0,293	0,279	

On peut dire que la période d'oscillation est, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelle à la racine carrée du volume de la poche d'air.

2° En employant deux poches d'air, on obtient des graphiques mettant en évidence deux périodes, dont les valeurs concordent avec les formules tirées des équations indiquées plus haut.

Voici quelques chiffres :

Les deux périodes observées étaient, dans une expérience

$$T_1 = 0^s,63,$$

$$T_2 = 0^s,228.$$

Le calcul donnait :

$$T_1 = 0^s,619,$$

$$T_2 = 0^s,210.$$

3° Pour déterminer expérimentalement les diverses périodes de la conduite, on peut munir celle-ci, à son extrémité, d'un petit robinet qui est entraîné par un moteur dont on fait varier lentement la vitesse ; les diverses résonances sont alors mises en évidence avec la plus grande netteté. Ce dispositif peut rendre des services dans les usines.

On donnera ailleurs des abaques permettant de déterminer les périodes d'oscillation de la conduite en fonction des volumes des poches d'air possibles et de leur position. Ces abaques font connaître immédiatement les périodes dangereuses d'une conduite.

Sur les coups de bélier : conduite entièrement purgée.

Considérons une conduite entièrement purgée d'air.

1° On détermine la vitesse de propagation de l'onde par une dépression brusque, qu'on produit en manœuvrant un petit robinet placé à l'extrémité de la conduite ; on réalise ainsi une ouverture de très courte durée, la diminution de

pression est inscrite par le manomètre, qui enregistre ensuite cette variation de pression, réfléchiée par l'extrémité amont (réservoir) et changée de signe ; et ainsi de suite. On obtient ainsi, dans le graphique de la pression, une série d'encoches, tantôt dans un sens, tantôt en sens inverse, qui permettent de déterminer très commodément la vitesse de propagation *a* de l'onde. Pendant cette détermination, la conduite étudiée reste fermée, et les vannes compensatrices n'interviennent pas.

Les expériences ont porté sur une conduite de 80^{mm} de diamètre de 5^{mm} d'épaisseur (en fer) et de 154^m,50 de longueur. Elles ont donné, par des séries très concordantes, une vitesse de 1280^m par seconde. La formule

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48,3 + K \frac{d}{e}}}$$

(*K* = 0,5, *e* épaisseur de la conduite, *d* diamètre de la conduite), donnée par MM. Joukovsky et Allievi, fournit une vitesse de 1315^m. La différence entre ces deux nombres peut être attribuée à l'épaisseur du tuyau (qui est assez mal définie), à l'influence des manchons de raccordement et surtout à ce que la formule de Joukovsky-Allievi n'est applicable, comme l'a démontré M. Boussinesq, qu'à des conduites minces.

2° En produisant des fermetures brusques et en mesurant, par des jaugeages, la vitesse initiale, *v*₀, de l'eau dans la conduite, on a vérifié la formule donnant le coup de bélier *h* :

$$h = \frac{av_0}{g}$$

Voici quelques chiffres

<i>h</i> calculé.	<i>h</i> observé.
8 ^m ,43	8 ^m ,00
6 ^m ,13	5 ^m ,88
4 ^m ,24	4 ^m ,06

Dans d'autres séries, la différence entre l'observation et le calcul était de signe contraire. La valeur de la vitesse *a* adoptée dans ces expériences était 1280^m, valeur trouvée ci-dessus.

3° Enfin, au moyen d'un robinet mû par un moteur, on a produit des résonances, comme dans le cas des poches d'air, et observé les ondes stationnaires ; en faisant varier la vitesse du robinet, on a mis en évidence le coup de bélier fondamental et les deuxième, troisième, quatrième et cinquième harmoniques.

En désignant par *T*₁, *T*₂, *T*₃, *T*₄, *T*₅ les périodes observées sur les graphiques du manomètre enregistreur, on a, pour le coup de bélier fondamental et les harmoniques :

$$\frac{4 \times 154.5}{1280 \times T_1} = 1.016 \text{ au lieu de } 1$$

$$\frac{4 \times 154.5}{1280 \times T_2} = 2.045 \text{ au lieu de } 2.$$

$$\frac{4 \times 154.5}{1280 \times T_3} = 3.05 \text{ au lieu de } 3$$

$$\frac{154.5}{1280 \times T_4} = 0.989 \text{ au lieu de } 1$$

$$\frac{4 \times 154.5}{1280 \times T_5} = 4.95 \text{ au lieu de } 5$$

Ces expériences nécessitent deux postes dont l'un est placé à l'extrémité aval de la conduite. Pour les harmoniques pairs, qui donnent un ventre à l'extrémité aval de la conduite, le deuxième manomètre indique la période observée au moment où un ventre se produit au distributeur.

Les méthodes précédemment indiquées sont applicables aux conduites industrielles.