

30 novembre, 15.300.000 m³ environ furent utilisés. La surface totale du district est 6,230 hectares, dont 3.161 étaient, en culture en 1918, 2.908 en vergers : orangers, citronniers, vigne, etc., 253 en champs de céréales et légumes. Chaque hectare recut ainsi 2.450 litres d'eau environ. Le prix de l'eau, pendant cette saison fut de 77.662 dollars, soit 4 dollars 91 pour 1.000 m³ ; cette eau est, d'ailleurs utilisable pour les usages domestiques.

Tels sont quelques-uns des travaux d'irrigation entrepris récemment par les services des Etats-Unis ; nous ne pouvons que souhaiter de voir notre pays s'engager dans une voie qui, tracée d'avance avec beaucoup de précaution, peut décupler la valeur des terrains de la Provence et du Languedoc. Nous savons que le projet d'aménagement du Rhône com-

porte un vaste programme de travaux d'arrosage : usines élévatoires d'eau, canaux principaux d'irrigation, conduites, etc., seront certainement établis, puissent nos ingénieurs s'inspirer des travaux antérieurs et ne pas se perdre dans les errements, les erreurs que des gens aussi pratiques et aussi méthodiques que les Américains ont parfois commises par manque d'expérience et de données scientifiques. Nous donnons enfin, plus haut (p. 165), un tableau assez complet des *facteurs déterminant la quantité d'eau d'arrosage à employer*, établi par H.-F. Robinson, Ingénieur en chef des Services d'irrigation et que nous avons, d'ailleurs très légèrement, modifié.

J. LEMARCHANDS,
Agrégé de l'Université.

L'ÉTUDE DES COUPS DE BÉLIER

DANS LES

CANALISATIONS MÉTALLIQUES SOUS PRESSION

RÉSULTATS OBTENUS PENDANT LA GUERRE

(SUITE)

7. *Résonances.* — Pour faire l'analyse d'une conduite, nous employons la méthode consistant à disposer à l'extrémité aval un robinet entraîné par un moteur dont on fait varier lentement la vitesse. Le manomètre placé à côté de ce robinet met en évidence les diverses résonances. Nous avons pu mettre ainsi en évidence le fondamental et les divers harmoniques d'une conduite, dont les périodes sont $T = 2\theta$, $T/2$, $T/3$, $T/4$...

Envisageons des périodes égales à θ et supposons que la fermeture brusque du distributeur donne un coup de bélier $\frac{av_0}{g}$

inférieur à la hauteur de chute y_0 ; dans ces conditions, on ferme le distributeur au début de la première période et on le tient fermé pendant toute cette période, on ouvre ensuite brusquement le distributeur au début de la deuxième période, et on le tient ouvert pendant toute la durée de cette période ; on le ferme de nouveau au début de la troisième période et on le laisse fermé pendant toute cette période, etc.

M. de Sparre a démontré que, dans ces conditions, le coup de bélier devient, par suite des résonances, toujours au moins égal à la hauteur de chute.

Nous avons pu vérifier expérimentalement ce résultat et en même temps l'étendre en indiquant, non seulement la valeur maximum, mais encore la valeur minimum de la pression et envisager aussi les harmoniques impairs.

Supposons que le régime permanent de résonance soit établi. Cette hypothèse seule étant admise, l'un de nous a démontré que la pression à l'extrémité de la conduite au moment de la résonance varie de la pression atmosphérique H au double de la pression statique, plus la pression atmosphérique, en d'autres termes varie de H , distributeur ouvert, à $H + 2 y_0$,

distributeur fermé, H étant la pression atmosphérique l'hypothèse du régime permanent se traduit par

$$y^{2n+1} = \text{constante} = \alpha \quad y^{2n} = \text{constante} = \beta$$

y^{2n+1} étant la pression pendant la $(2n+1)^{\text{e}}$ période, y^{2n} étant la pression pendant la $(2n)^{\text{e}}$ période à l'extrémité de la conduite.

La fermeture du distributeur a lieu aux époques impaires

On trouve :

$$\begin{cases} y^{2n-1} = 2 y_0 \\ y^{2n} = 0 \end{cases} \quad (15)$$

La figure 5 représente le résultat de l'expérience qui a été faite à l'Institut Electrotechnique de Toulouse, sur une conduite en fer ayant la même épaisseur et le même diamètre que celle de l'usine à gaz déjà signalée, mais ayant comme longueur 186 m. 8 et comme pression statique 17 m. 3 d'eau.

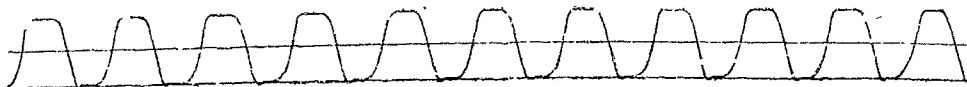


Fig. 5. — Réglage par minimum de débit. Résonance du fondamental

La ligne horizontale inférieure du cliché représente la pression atmosphérique; la ligne médiane représente la pression statique $y_0 = 17$ m. 3 ; on voit que cette pression est exactement doublée par la résonance.

L'expérience a été faite au moyen d'un robinet tournant ; l'ouverture de ce robinet était telle que sa fermeture brusque donnait un coup de bélier inférieur à la pression statique, c'est-à-dire inférieur à $y_0 = 17$ m. 3.

La vitesse du robinet était réglée par l'observation d'un tachymètre. Un tour complet du robinet correspondait à une durée de 1,14 seconde, il y avait deux ouvertures par tour ; la période des ouvertures et fermetures était donc 0,57 seconde, ce qui correspond à la vitesse a théorique de 1.310 mètres.

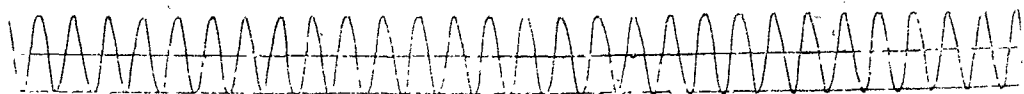


Fig. 6. — Résonance de l'harmonique 3.

En triplant la vitesse du robinet, on a fait apparaître la résonance correspondant à l'harmonique 3 (fig. 6) ; en quin-

tuplant la vitesse du robinet, on a produit la résonance correspondant à l'harmonique 5.

Il faut remarquer que le calcul, qui nous a permis de démontrer le doublement de la pression statique par la résonance du fondamental, s'applique également aux harmoniques impairs.

Les résonances peuvent également être mises en évidence au moyen d'une propriété très intéressante mise en évidence par l'un de nous; au moyen de la résonance d'un harmonique impair, le débit devient minimum (fig. 7).

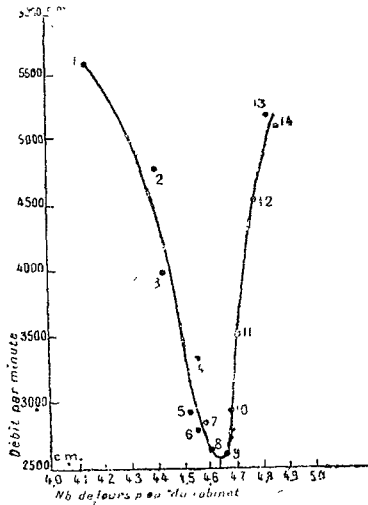


Fig. 7. — Minimum de débit; résonance de l'harmonique 3.

8. Influence de la perte de charge. — Une étude très complète de l'influence de la perte de charge a montré à l'un de nous que, pour les fermetures et ouvertures lentes ou de courte durée, les formules ordinaires donnent des résultats très concordants avec l'expérience, à condition de prendre comme pression initiale la pression statique y_0 diminuée de la perte de charge. Sur une conduite de 220 mètres de longueur, de 80 mm. de diamètre, l'accord entre le calcul et l'observation a été satisfaisant pendant $\frac{8L}{a}$, c'est-à-dire quatre parcours aller et retour de l'onde. Pour des parcours plus longs, la divergence devient notable et s'accroît de plus en plus.

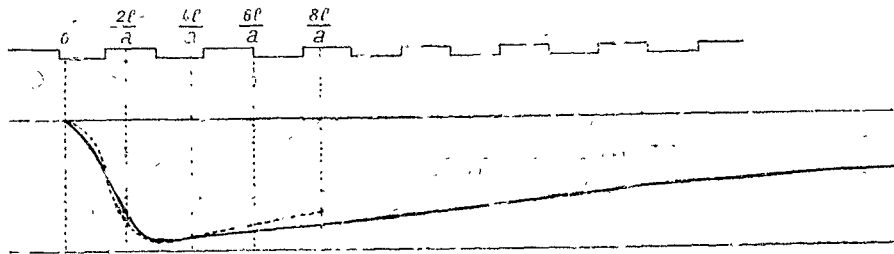


Fig. 8. — Coup de bélier d'ouverture avec perte de charge.

La figure 8 donne le graphique d'un coup de bélier d'ouverture; la perte de charge atteint 40 % de la pression statique. La courbe des pressions calculées est indiquée en pointillé.

9. Conduite inclinée d'un angle α sur l'horizon. — M. Allievi a montré que, dans ce cas, toutes les formules obtenues pour une conduite horizontale, sont applicables à la conduite inclinée, sous la réserve que les ordonnées de la ligne de charge le long de la conduite doivent être diminuées de $x \sin \alpha$ en un point d'abscisse x .

§ 2. — Conduites à caractéristiques variables.

1. Définition; remarques diverses. — Les conduites industrielles sont le plus souvent formées de tronçons pour lesquels l'épaisseur et parfois le diamètre varient.

Par exemple, la conduite C_4 de Soulom, sur laquelle nous avons longtemps travaillé, est formée de 15 tronçons, ayant tous le même diamètre inférieur de 810 mm, mais des épaisseurs différentes, qui sont indiquées dans le tableau suivant :

e	a	$\frac{l_i}{a_i}$	e	a	$\frac{l_i}{a_i}$
20 m/m	1198 m/s	0,0805	13 m/m	1105 m/s	0,0214
22	1245	0,0112	12	1090	0,0229
19	1188	0,0100	11	1070	0,0229
18	1178	0,0176	10	1055	0,0293
17	1165	0,0159	9	1030	0,0255
16	1155	0,0177	8	1000	0,0185
15	1140	0,0162	7	962	0,1760
14	1120	0,0165			0,5021

La durée totale du parcours de la conduite est

$$\sum \frac{l_i}{a_i} = 0,502.$$

Comme sa longueur est $L = 536^m,36$, la vitesse moyenne est

$$\frac{L}{\sum \frac{l_i}{a_i}} = 1068^m/s.$$

2. Formules de M. de Sparre. — M. de Sparre a étudié les conduites de cette nature; il a envisagé celles qui sont formées de deux ou de trois tronçons pour lesquels la durée de propagation est la même et a montré que les résultats obtenus s'appliquent aux conduites plus complexes qu'on rencontre dans l'industrie.

Désignons par v_1 la vitesse du régime pour le distributeur complètement ouvert, a la vitesse de propagation dans le tronçon voisin du distributeur, a' cette même vitesse dans la section voisine de la prise d'eau, l et l' les longueurs de ces deux tronçons, d, d' leurs diamètres. On suppose que :

$$\frac{2l}{a} = \frac{2l'}{a'} = 0.$$

λ désigne la fraction dont le distributeur est ouvert.

On a pour le premier tronçon :

$$y = y_0 + F\left(t - \frac{x}{a}\right) - f\left(t + \frac{x}{a}\right); \quad (16)$$

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

En désignant par ξ le coup de bélier au distributeur, on a :

$$F(t) = \rho y_0 (\lambda_0 - \lambda) + \frac{1}{2} \xi (1 - \rho \lambda) \quad (17)$$

$$f(t) = \rho y_0 (\lambda_0 - \lambda) - \frac{1}{2} \xi (1 + \rho \lambda),$$

ξ étant supposé inférieur à la moitié de la pression statique.

Si on considère le second tronçon, on aura :

$$y' = y_0 + F'\left(t - \frac{x'}{a'}\right) - f'\left(t + \frac{x'}{a'}\right), \quad (18)$$

$$v' = v'_0 - \frac{g}{a'} \left[F'\left(t - \frac{x'}{a'}\right) + f'\left(t + \frac{x'}{a'}\right) \right].$$

En écrivant que $y' = y_0$ pour $x = l'$, que la pression est la même dans les deux tronçons à leur jonction, et que : $sv = s'v'$, équation de continuité, on a : $f'(l) = F'(t - 0)$ et :

$$F'(t) = \frac{1 + \alpha}{2} F\left(t - \frac{0}{2}\right) - \frac{1 - \alpha}{2} f\left(t + \frac{0}{2}\right), \quad (19)$$

$$F'(t - 0) = \frac{1 + \alpha}{2} f\left(t + \frac{0}{2}\right) - \frac{1 - \alpha}{2} F\left(t - \frac{0}{2}\right),$$

et le coup de bélier au voisinage du distributeur au temps t est donné par la formule :

$$\xi(t) = 2 \rho y_0 \frac{\lambda(t-2\theta) - \lambda(t)}{1 + \rho\lambda(t)} - 2 \frac{1-x}{1+x} \frac{\xi(t-\theta)}{1 + \rho\lambda(t)} - \frac{1 - \rho\lambda(t-2\theta)}{1 + \rho\lambda(t)} \xi(t-2\theta); \dot{\xi} = \frac{av_1}{2gy_0}; x = \frac{a'd^2}{ad'^2} \quad (20)$$

3. *Vitesse de propagation de l'onde dans les conduites à caractéristiques variables.* — Les formules de M. de Sparre, que nous venons d'indiquer, ont permis à l'un d'entre nous d'expliquer une anomalie qui a longtemps arrêté les hydrauliciens. Toutes les déterminations de la vitesse a dans les conduites industrielles donnaient des valeurs supérieures à la vitesse théorique. L'explication universellement admise était une augmentation de la vitesse de propagation avec la pression.

Les expériences de l'Ackersand avaient donné une vitesse de 4,7 % supérieure à la vitesse théorique (hauteur de chute 720 mètres). Il en était de même pour la chute du lac de Fully de 1.650 m., pour nos expériences de Soulom, etc.

L'explication de cette différence se trouve dans la constitution des conduites étudiées. En appliquant les formules

de cette méthode, on peut observer sur un diagramme de fermeture le va-et-vient, tout le long de la conduite, d'une dentelure provenant d'une variation de pression, qui se réfléchit à la fin de chaque parcours, sans changement de signe au distributeur et avec changement de signe sur la chambre de mise en charge. C'est ainsi qu'on a déterminé la valeur de $4 \sum \frac{l_i}{a_i}$ sur la chute de 250 mètres.

4. *Coups de bélier au distributeur.* — La formule (20) permet de déterminer les pressions produites au distributeur dans tous les cas.

La figure 9 permet de constater que l'accord entre le calcul et l'observation est très satisfaisant. On peut dire que les formules de M. de Sparre sont complètement vérifiées.

Remarque. — On peut, dans une première approximation, faire le calcul d'une conduite à caractéristiques variables en appliquant la formule (11) de M. Allievi, en choisissant comme valeur de la vitesse la vitesse moyenne, soit 1.068 mètres. La concordance entre le calcul et l'observation est bonne au début, mais la période des variations de pression calculée est nettement supérieure à la période observée dans la figure 9.

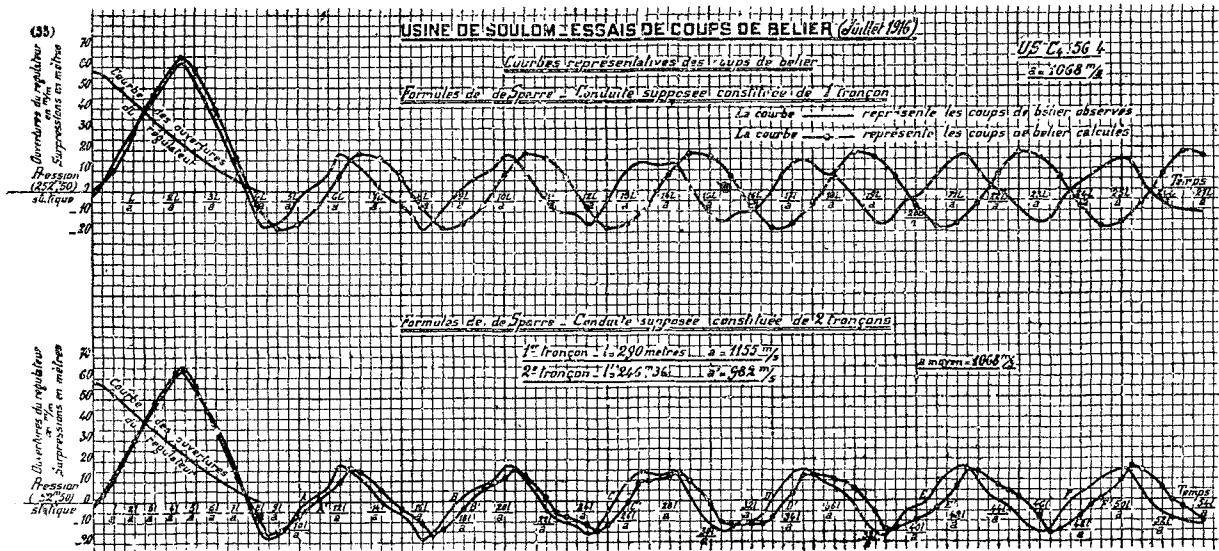


FIG. 9. — Application des formules de M. de Sparre aux conduites à caractéristiques variables.

de M. de Sparre, il est facile de montrer que la période des oscillations de la pression observée sur un manomètre placé près du distributeur (période apparente) est inférieure à la période théorique $4 \sum \frac{l_i}{a_i}$ de la conduite.

Voici quelques chiffres empruntés au travail que nous allons publier en collaboration avec M. Gariel :

	Période $4 \sum \frac{l_i}{a_i}$		Période apparente		
	calc.	obs.	calculée sur 2 tronçons	calculée sur 3 tronçons	observée
Institut électrotechnique.	0,93	0,92	»	0s,705	0s,69
Soulom { chute 120m. ...	1s,462	1s,464	1s,389	1s,36	1s,35
{ chute 250m. ...	2s,808	2s,009	1s,902	1s,894	1s,849

Dans ce tableau, la première colonne est déterminée par l'expérience de la dépression brusque.

Quand il n'y a pas de robinet installé pour l'application

5. *Répartition le long de la conduite.* — Il suffit pour la calculer dans le cas le plus général d'appliquer les formules de M. de Sparre. Supposons la conduite divisée en deux tronçons. Dans le tronçon aval, la pression est donnée à l'instant t et pour un point d'abscisse x par la formule (16), dans laquelle $F(t)$ et $f(t)$ sont déterminés par les formules (17) en fonction du coup de bélier au distributeur. Pour le tronçon amont, la pression est donnée à l'instant t et pour un point d'abscisse x par la formule (18), dans laquelle les fonctions F' et f' sont données par les formules (19). — L'expérience montre que ces formules sont vérifiées dans les conduites industrielles.

(A suivre.)

C CAMICHEL,

Professeur à la Faculté des Sciences,
Directeur de l'Institut électrotechnique de Toulouse.

D EYDOUX,

Ingénieur des Ponts et Chaussées,
Ingénieur principal à la C^e du Midi.