

# L'ÉTUDE DES COUPS DE BÉLIER

DANS LES  
CANALISATIONS MÉTALLIQUES SOUS PRESSION

RÉSULTATS OBTENUS PENDANT LA GUERRE  
(SUITE)

*Sur l'amplitude des harmoniques impairs dans les conduites forcées.*

## IX. — BATTEMENTS.

Le réglage du robinet tournant se fait en modifiant convenablement la vitesse du moteur électrique qui l'entraîne ; malgré le nombre considérable de plots du rhéostat employé, il est difficile de régler la vitesse exactement ; il en résulte qu'on a dans la conduite, au voisinage de la résonance, deux oscillations de périodes voisines : l'harmonique pour lequel on fait le réglage, et la perturbation rythmique provoquée par la rotation du robinet.

Il en résulte des battements qui sont très gênants et qui pourraient, si l'on n'y prenait garde, masquer complètement le phénomène du doublement de la pression statique au moment de la résonance des harmoniques impairs ou bien donner des valeurs légèrement erronées de la vitesse  $a$ .

Les clichés 18 et 19 représentent le battement du troisième harmonique,

$$\text{période } 0^{\text{e}}, 19 = \frac{0^{\text{e}}, 57}{3} = \frac{4 \times 186,8}{3 \times 1\ 310}$$

et de la période 0,21 seconde.

La période résultante est : 1,9 seconde.

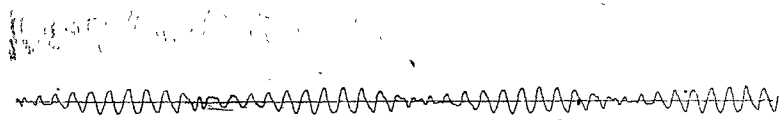


Fig. 18 — Battements entre le 3<sup>e</sup> harmonique 0,19 seconde et la période 0,21 seconde; inscription au premier tiers amont

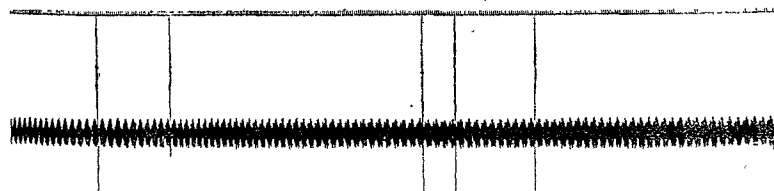


Fig. 19 — Le même battement, extrémité aval

Les clichés 19 et 18 ont été pris simultanément : l'extrémité aval et au premier tiers amont de la conduite, les demi-secondes sont marquées en regard.

L'inscription de la figure 19 a été faite plus lentement que celle de la figure 18.

## X. — ONDES ENTRETENUES. CLAPET AUTOMATIQUE.

Les coups de bélier de fermeture ou d'ouverture s'amortissent, ceux-ci plus rapidement que les premiers. Il peut y avoir intérêt à produire, dans une conduite, des oscillations entretenues : on y arrive facilement au moyen d'un clapet ou robinet automatique.

La figure 20 représente un robinet automatique ; il est constitué par une soupape entièrement métallique (1) fixée à un levier horizontal. Celui-ci peut être plus ou moins

(1) L'interposition d'un cuir ou d'un caoutchouc suffit pour augmenter notablement la période, comme si un réservoir d'air avait été placé à l'extrémité de la conduite.

chargé et sa course est limitée vers le bas par un arrêt réglage. Tous ces détails sont visibles sur la figure 20.

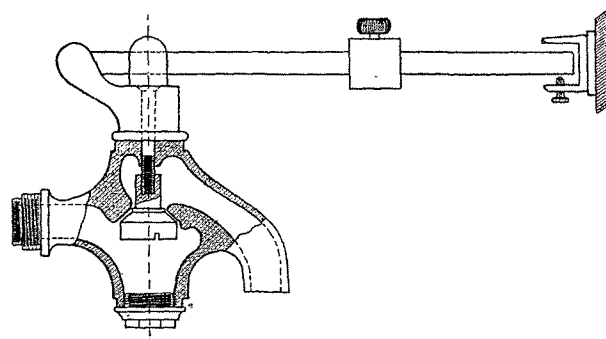


Fig. 20 — Robinet automatique

En appuyant le levier sur l'arrêt et le ramenant brusquement vers le haut on produit un coup de bélier brusque dont la valeur  $\frac{av_0}{g}$  doit être inférieure à  $y_0$ . Au moyen d'une vis de réglage visible sur le schéma, on limite la course de la soupape et par conséquent son ouverture.

La figure 21 représente un clapet automatique ; la soupape également entièrement métallique et exactement rodée sur son siège est guidée verticalement comme le montre le dessin ; elle est chargée à sa partie supérieure au moyen de rondelles de plomb serrées entre deux plateaux. La position du plateau inférieur permet de faire varier la course du clapet et, par conséquent, le débit. On réalise avec cet

appareil comme avec le précédent la condition  $\frac{av_0}{g} < y_0$ .

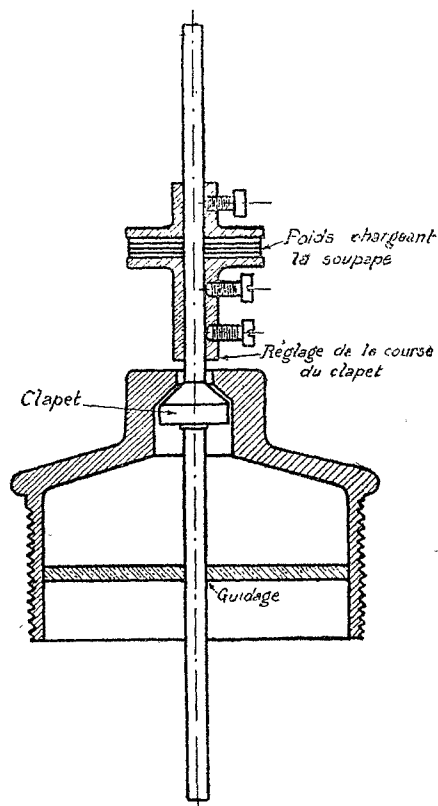


Fig. 21. — Clapet automatique.

Les figures 22 et 23 permettent de se rendre compte du fonctionnement du robinet automatique.

Les deux clichés de la figure 22 représentent l'expérience suivante :

On abaisse à la main le levier du robinet automatique et on l'amène contre son arrêt ; on attend que les variations de pression, provenant du coup de bélier d'ouverture, soient complètement amorties ; on laisse aller le levier, le robinet

se ferme, revient sur lui-même et prend un mouvement alternatif. Les suppressions et dépressions augmentent comme l'indique le cliché et, quand le régime permanent est établi, la pression varie de 0 à  $2\gamma_0$ .

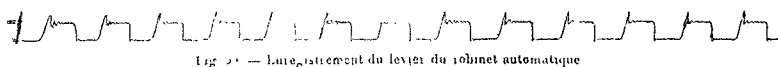


Fig 21 - Lutte, rétroaction du levier du robinet automatique

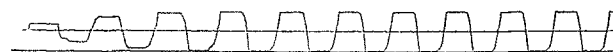


Fig 22 - Fonctionnement du clapet ou du robinet automatique, à partir du début

Le diagramme obtenu donne exactement le même graphique que la résonance du fondamental obtenue au moyen du robinet tournant (fig. 9 et fig. 10).

La période du clapet est  $\frac{4l}{a}$ . J'emploie la mesure de cette période pour suivre la purge de la conduite : à mesure que l'air est chassé le mouvement du clapet s'accélère et, quand le clapet donne la période 0,57 seconde, on peut considérer que la conduite est complètement purgée. Toutefois, il est nécessaire de limiter la course du clapet ; quand le coup de bélier  $\frac{av_0}{g}$  dépasse  $\gamma_0$ , des pressions négatives se produisent au début, il en résulte des rentrées d'air qui paraissent expliquer la variation de périodes que l'on constate.

En voici un exemple :

La course du robinet était, dans cette expérience, réglée par une cale qu'on éloignait pour augmenter l'ouverture du robinet.

$l$  désignant la distance de l'axe de la soupape à cette cale, on a le tableau suivant :

- $l = 97^{mm},5$  période :  $0^s,564$  ;
- $l = 101^{mm},5$  période :  $0^s,565$  (1) ;
- $l = 105^{mm},5$  période :  $0^s,584$ .

Le clapet automatique est en somme un bélier ordinaire, avec cette différence essentielle qu'il fonctionne, la conduite étant entièrement purgée.

Nous laisserons entièrement de côté, dans ce travail, le fonctionnement du clapet automatique sur une conduite renfermant des réservoirs d'air. C'est une question sur laquelle nous reviendrons.

L'enregistrement des mouvements de levier permet de se rendre compte du fonctionnement du robinet automatique.

Le robinet et le clapet s'ouvrent et se ferment sous l'influence des variations de pression dans la conduite, on peut dire qu'ils sont synchrones avec la conduite, c'est-à-dire que leur période est égale à celle du fondamental de la conduite.

La comparaison des deux figures 22, où les secondes sont distinguées par un signal qu'on voit à gauche, c'est-à-dire au début du cliché, montre que c'est pendant la fermeture que la pression devient  $2\gamma_0$  ; elle est égale à la pression atmosphérique quand le clapet est ouvert. L'écoulement de

(1) Le coup de bélier initial est alors égal à  $\gamma_0$

l'eau qui entretient le mouvement se produit au moment où le clapet s'ouvre.

Le doublement de la pression se produit quel que soit le débit, pourvu que la relation  $\gamma_0 > \frac{av_0}{g}$  soit réalisée.

On l'a vérifié de la façon suivante :

On a mesuré le débit en maintenant le clapet ouvert d'une façon permanente et jaugeant l'eau écoulée ; on a recommencé le même jaugeage en augmentant plus ou moins la course du clapet. Voilà quelques chiffres, les débits ont été :

Durée	Eau écoulée
En 100 secondes	16 <sup>h</sup> ,480
» »	38 <sup>h</sup> ,600
» »	57 <sup>h</sup> ,000

Dans ces trois expériences, la pression a toujours été exactement doublée, c'est-à-dire qu'elle a varié de la pression atmosphérique (ouverture du clapet) à la pression atmosphérique +  $2\gamma_0$  (fermeture du clapet).

La vitesse :

$$v_0 = \frac{y_0}{a} = 0^m,132$$

la section de la conduite étant 50 centimètres carrés, on a comme débit limite :

$$13,2 \times 50 \times 100^s = 66^{kg} \text{ pour 100 secondes.}$$

Le débit qu'il ne faut pas dépasser est donc 66 kilogrammes en 100 secondes.

Les deux clichés 23 montrent le fonctionnement du clapet automatique, quand le régime permanent est établi. Les mêmes remarques sont applicables aux figures 22.



Fig 23 - Fonctionnement du robinet automatique, le régime permanent étant établi ondes entretenues.

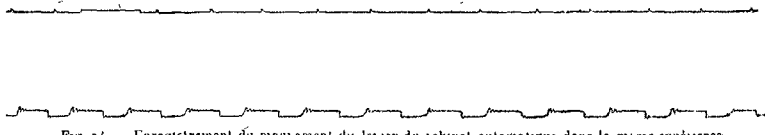


Fig 25 - Enregistrement du mouvement du levier du robinet automatique dans la même expérience

Enfin, le cliché 24 donne une démonstration très nette des propriétés précédemment indiquées

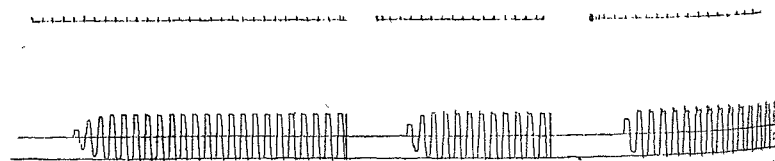


Fig 24 - Démonstration expérimentale des propriétés du clapet automatique, constance de la période, doublement de la pression quel que soit le débit pourvu que  $\frac{av_0}{g} < \gamma_0$

Dans la première expérience, à gauche du cliché 24, on a une course du clapet donnant un coup de bélier initial de 5<sup>m</sup>86 ; dans la seconde, on a augmenté la course de façon à rendre le coup de bélier initial égal à 9<sup>m</sup>34 ; dans la troisième le coup de bélier initial est 11<sup>m</sup>98 ; le doublement de la pression se produit dans chaque cas d'une façon tout à fait rigoureuse et la période est constante.

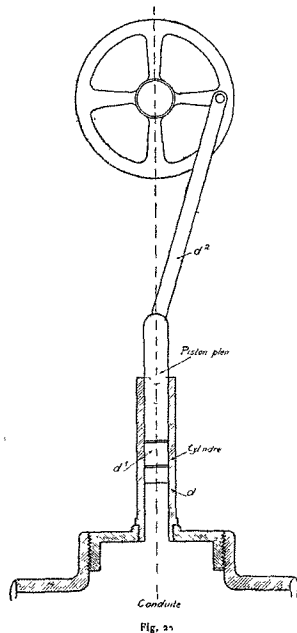
La pression statique  $\gamma_0 = 17^m3$  correspond à 6<sup>m</sup>5.

XI. — MOTEUR HYDRAULIQUE SYNCHRONE.

Le clapet automatique peut commander un moteur ; la figure 25 indique le croquis d'une pareille machine.

Elle est constituée par un simple piston plein actionnant une manivelle.

Ce moteur tourne exactement au synchronisme avec le clapet ; pour le mettre en marche il suffit de placer la manivelle en dehors du point mort. La vitesse du moteur est indépendante de la charge ; quand celle-ci est trop grande le moteur se décroche. J'ai réalisé un petit moteur de ce genre d'une puissance inférieure à 1 cheval ; je n'ai pas pu faire sur cet appareil des mesures de rendement, mais la propriété du minimum de débit que j'ai signalée plus haut (minimum qui accompagne la résonance du fondamental) permet de penser que le rendement de cette machine pourra être intéressant.



XII. — CONCLUSIONS,

Le travail que je viens de résumer contient :

TABLEAU I.

Expérience	Coup de bélier initial sur le graphique	Coup de bélier initial en mètres d'eau	Période	La pression varie
1	2mm, 2	$\frac{17,3 \times 2,2}{6,5} = 5m,86$	0s,57	de 0 à $2 \times 17m,3$
2	3mm, 5	$\frac{17,3 \times 3,5}{6,5} = 9m,34$	0s,575	de 0 à $2 \times 17m,3$
3	4mm, 5	$\frac{17,3 \times 4,5}{6,5} = 11m,98$	0s,57	de 0 à $2 \times 17m,3$

L'étude de l'état d'une conduite par la méthode de la dépression brusque, qui permet la détermination de la vitesse a.

L'application de cette méthode à la détermination de la position d'une poche d'air dans une conduite ;

La démonstration expérimentale de la formule  $h = \frac{av_0}{g}$  qui donne le coup de bélier produit par une fermeture brusque complète ;

L'analyse d'une conduite, la démonstration de l'existence des divers harmoniques pairs et impairs dans une conduite ;

L'étude de l'amplitude des harmoniques impairs, la démonstration du doublement, de la pression et du minimum de débit, au moment de la résonance ;

La répartition du fondamental et de l'harmonique 3 le long de la conduite, cette dernière particulièrement intéressante dans l'industrie ;

Un exemple de battement ;

La production d'ondes entretenues et l'étude des propriétés du clapet automatique ;

Enfin la réalisation d'un moteur hydraulique synchrone (1).

REMARQUES DIVERSES

I. — MINIMUM DE DÉBIT AU MOMENT DE LA RÉSONANCE.

J'ai indiqué précédemment que le débit devenait minimum au moment de la résonance d'un harmonique impair. Cette propriété a été utilisée pour obtenir cette résonance. Il paraît utile d'indiquer comment on peut vérifier expérimentalement ce minimum de débit.

La conduite étudiée était en fer, elle avait 105<sup>m</sup>24 de longueur, une épaisseur constante d'un bout à l'autre de 5 millim. et 80 millim. de diamètre sur toute sa longueur. On l'a munie à son extrémité d'un robinet entraîné par un moteur électrique dont la vitesse pouvait varier très lentement ; pour chaque vitesse déterminée au tachymètre sur le robinet lui-même, on a mesuré le débit par minute. Le tableau suivant résume une expérience relative à la résonance du fondamental.

La courbe est représentée par la figure 26.

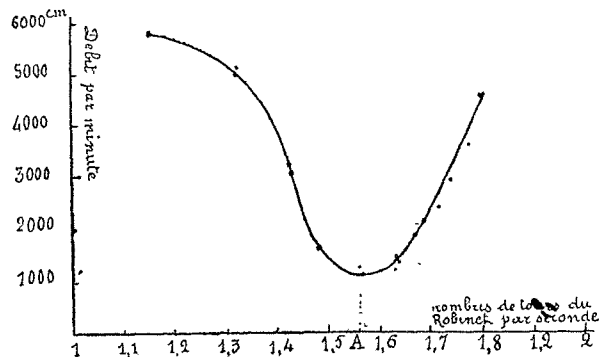


Fig 26 — Minimum de débit; résonance du fondamental.

En adoptant une vitesse dans la conduite de 1.300 mètres par seconde, la résonance doit correspondre à un nombre d'ouvertures par seconde égal à  $\frac{4 \times 105,24}{1\ 300} = 3,09$  par seconde, c'est-à-dire à un nombre de tours du robinet égal à 1,55 puisque le robinet s'ouvre deux fois par tour.

Minimum de débit.

Résonance du fondamental.

Nombre de tours du robinet par seconde	Débit par minute	Nombre de tours du robinet par seconde	Débit par minute
	centimètres cubes		centimètres cubes
1,153	5 755	1,630	1 410
1,320	5 150	1,640	1 330
1,320	5 055	1,670	1 870
1,425	3 105	1,690	2 130
1,425	3 255	1,720	2 437
1,480	1 550	1,740	2 987
1,560	1 240	1,750	3 950
1,630	1 180	1,800	4 500
1,570	1 050		

Le minimum de débit sur la courbe correspond à un nombre de tours du robinet par seconde égal à 1,57.

On voit donc que la concordance est très satisfaisante.

La même expérience a été répétée pour l'harmonique 3 sur la même conduite, elle a donné les chiffres suivants :

(1) Toutes les figures de ce travail sont les fac-similés des graphiques obtenus ; le lecteur pourra donc vérifier lui-même les résultats indiqués, Au cas où certaines expériences intéresseraient des ingénieurs, nous serions heureux de leur donner toutes facilités pour les répéter à l'Institut Electrotechnique.

Minimum de débit.  
Résonance de l'Harmonique 3.

Nombre de tours par seconde du robinet	Débit par minute		
	centimètres cubes		
4,150	5 600	4,600	2 620
4,400	4 777	4,650	2 585
4,430	3 985	4,680	2 930
4,550	3 337	4,700	3 500
4,530	2 912	4,780	4 530
4,550	2 790	4,830	5 280
4,570	2 837	4,850	5 127

La courbe est représentée par la figure 27.

Le minimum de débit est indiqué en A, il correspond à un nombre de tours par seconde du robinet de 4,63.

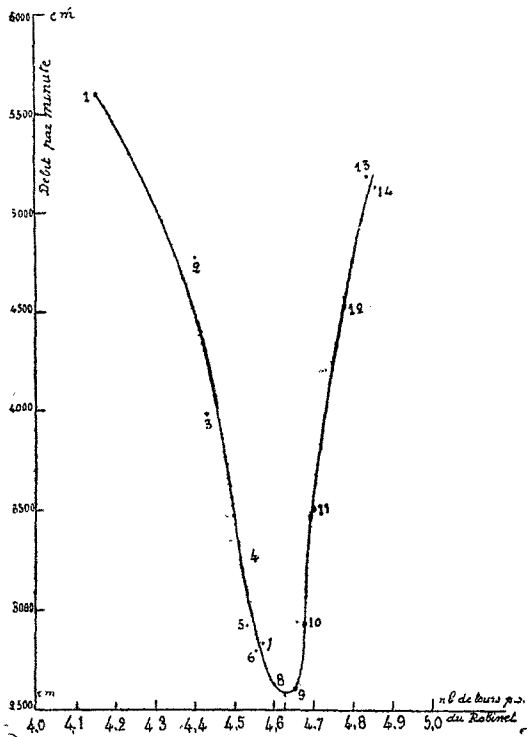


Fig. 27. — Minimum de débit; résonance de l'harmonique 3.

Or, la résonance doit correspondre à

$$\frac{4 \times 105,24 \times 3}{1\ 300} = 9,27 \text{ t. p. s.,}$$

c'est-à-dire à un nombre de tours du robinet de 4,63 par seconde, exactement le même chiffre que donne la courbe de minimum de débit.

2. — TRANSMISSION DU COUP DE BÉLIER DANS UNE CONDUITE D'ÉPAISSEUR CONSTANTE ENTIÈREMENT PURGÉE D'AIR.

La transmission dans une conduite entièrement purgée d'air d'un coup de bélier provenant d'une fermeture brusque présente un intérêt considérable en raison des applications industrielles où de pareilles fermetures se produisent, par exemple dans certaines manufactures d'obus. On ne possède en pareille matière, du moins à ma connaissance, que les expériences de Joukowsky qui ont été faites avec un procédé assez rudimentaire.

En dehors même des fermetures brusques, la transmission intégrale du coup de bélier d'une extrémité de conduite à l'autre est une grave question pour la stabilité des conduites industrielles. Au cours des expériences que j'ai faites à l'usine de Soulom en collaboration avec M. Eydoux, nous

avons abordé cette question, mais nous n'avons pu arriver à un résultat positif, tant à cause des difficultés d'expérimentation en campagne que par suite de la présence de poches d'air dans les conduites qui ne fonctionnaient alors que de façon intermittente. Nous nous proposons de reprendre ces essais ultérieurement dans des circonstances plus favorables, mais M. Gariel, ingénieur de la maison Neyret-Brenier, m'ayant à nouveau signalé l'intérêt actuel qu'il y aurait à faire quelques essais de ce genre avec précision, j'ai étudié la transmission d'une fermeture brusque dans une conduite d'épaisseur constante d'un bout à l'autre, laissant de côté le cas plus complexe des conduites formées de tronçons d'épaisseur différente pour lesquelles je renverrai le lecteur aux travaux de M. de Sparre (1) et de M. Eydoux (2). Dans une conduite d'épaisseur et de diamètres variables, le coup de bélier doit subir des modifications qui se traduisent, dans les cas de la pratique courante, par un affaiblissement dans le haut de la colonne. C'est ainsi que, dans une conduite de 1.190 mètres de longueur, de 0<sup>m</sup>56 de diamètre et dont l'épaisseur varie de 30 à 5 millimètres, un coup de bélier *h* à la base n'est plus que 0,854 *h* au sommet.

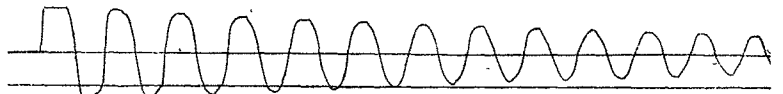


Fig. 28. — Conduite entièrement purgée d'air; conservation du coup de bélier; diagramme pris à l'extrémité aval.

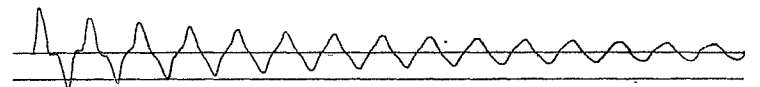


Fig. 28. — Diagramme pris au premier tiers amont.

Conformément à la théorie, le coup de bélier se transmet intégralement d'un bout à l'autre de la conduite de diamètre et d'épaisseur constante dans toute sa longueur; l'expérience a vérifié complètement cette prévision, les figures 28 montrent l'inscription d'un coup de bélier de fermeture brusque à l'extrémité aval et au premier tiers amont. Les pressions statiques en ces points étaient respectivement 16 mètres et 13<sup>m</sup>5. Le coup de bélier a été 21<sup>m</sup>6 en bas et 21<sup>m</sup>8 au premier tiers amont.

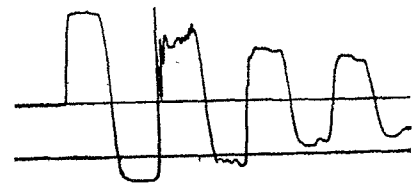


Fig. 29. — Conduite entièrement purgée d'air; conservation du coup de bélier; diagramme pris à l'extrémité aval.

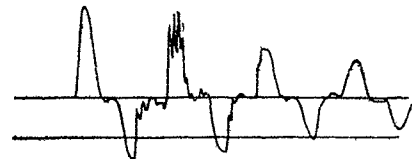


Fig. 29. — Diagramme pris au premier tiers amont.

Les deux figures 29 indiquent également le même résultat. On remarquera dans les graphiques de la figure 29 que la pression négative a eu pour effet de faire rentrer dans la conduite de l'air, ce qui a donné dans la suite du graphique des dentelures. Le coup de bélier était de 28<sup>m</sup>8 à l'extrémité aval et 29<sup>m</sup>1 au premier tiers.

(1) 2<sup>e</sup> Congrès de la Houille Blanche, numéro paru en août 1915.  
(2) Comptes Rendus de l'Académie des Sciences t. CLXIII.

3. — TRANSMISSION DU COUP DE BÉLIER DE FERMETURE BRUSQUE DANS UNE CONDUITE MUNIE A SON EXTRÉMITÉ INFÉRIEURE D'UN RÉSERVOIR D'AIR DE VOLUME SUFFISANT POUR QUE LA COMPRESSIBILITÉ DE L'EAU ET LA DILATATION DE L'ENVELOPPE SOIENT NÉGLIGEABLES.

Comme je l'ai montré (1) le coup de bélier, dans ce cas, est réparti linéairement sur la longueur de la conduite (2).

L'expérience a été faite sur une conduite de 10<sup>m</sup>24 de longueur en fer, 5 millimètres d'épaisseur d'un bout à l'autre, au premier tiers la pression statique était de 10<sup>m</sup>80 et à l'extrémité aval de 15<sup>m</sup>95.



Fig. 30 — Conduite munie d'une poche d'air à son extrémité aval; répartition linéaire du coup de bélier, diagramme pris à l'extrémité aval

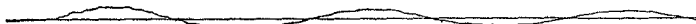


Fig. 30 — Diagramme pris au premier tiers amont

Les pressions sur les deux graphiques 5 sont exprimées par le tableau suivant :

Extrémité aval.....	+ 7,0	- 5,0	+ 5,5	- 4,1
Premier tiers amont...	+ 2,4	- 1,7	+ 1,8	- 1,35
Rapport.....	2,92	2,94	3,05	3,02

Le rapport des pressions a été pris égal au rapport des ordonnées correspondantes ; les deux manomètres employés dans cette expérience et toutes les autres donnaient très sensiblement les mêmes déviations, sous l'influence des mêmes pressions ; on a procédé dans chaque cas à une vérification de ces appareils ; par exemple sous l'influence de la pression de 15<sup>m</sup>95 d'eau la déviation du manomètre placé à l'extrémité de la conduite était 23<sup>mm</sup>7, le manomètre placé au premier tiers, sous l'influence de la pression de 10<sup>m</sup>80, donnait une déviation de 16<sup>mm</sup>0. On a :

$$\frac{23,7}{16,0} = 1,481, \quad \frac{15,95}{10,8} = 1,476.$$

4. — ENREGISTREMENT DU FONDAMENTAL AU PREMIER TIERS AMONT ET A L'EXTRÉMITÉ AVAL.

L'expérience a été faite comme précédemment. La pression statique au premier tiers amont était 10<sup>m</sup>60 et la pression statique à l'extrémité aval était 15<sup>m</sup>70. On a réglé la résonance du fondamental et on a obtenu les deux graphiques correspondant à la figure 31. On voit dans le graphique de

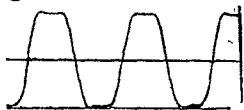


Fig. 31. — Conduite entièrement purgée d'air; résonance du fondamental, diagramme pris à l'extrémité aval.

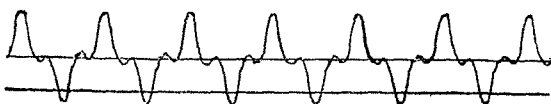


Fig. 31. — Diagramme pris au premiers tiers amont.

l'extrémité aval que la pression statique est doublée par le phénomène de résonance comme précédemment. Au premier

tiers amont la courbe de résonance correspond aux mêmes amplitudes qu'à l'extrémité inférieure, il en résulte que la pression devient négative comme l'indique la figure.

5. — ENREGISTREMENT DE L'HARMONIQUE 3

A L'EXTRÉMITÉ AVAL ET AU PREMIER TIERS AMONT.

Les figures 32 indiquent les résultats obtenus. La pression statique était à l'extrémité aval 15<sup>m</sup>70 et au premier tiers amont 10<sup>m</sup>60. On voit encore, comme dans le cas précédent, que la courbe de résonance au premier tiers donne les mêmes amplitudes qu'à l'extrémité inférieure. D'où pression négative au premier tiers amont ; les résultats que donne la théorie sont par conséquent complètement vérifiés.

Les pressions négatives qui apparaissent ainsi pendant la

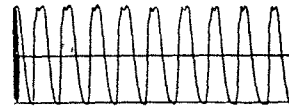


Fig. 32. — Conduite entièrement purgée, résonance de l'harmonique 3, diagramme pris à l'extrémité aval.

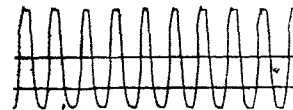


Fig. 32. — Diagramme pris au premier tiers amont.

résonance rendent l'expérience assez délicate, elles ont pour effet de produire des rentrées et des dégagements d'air et au bout de peu de temps la conduite doit de nouveau être purgée. Il faut donc faire l'expérience rapidement.

6. — MOTEUR HYDRAULIQUE SYNCHRONE.

Relativement à ce moteur, j'indiquerai seulement le dispositif adopté qui comprend, comme le montre la figure 33, une chambre de mise en charge *b*, une conduite *a*, le clapet automatique est placé en *c*, quant au moteur il est figuré en *d* *d*<sup>1</sup> *d*<sup>2</sup> ; pour le mettre en marche on fait tourner la manivelle *d*<sup>2</sup> de façon à synchroniser son mouvement avec celui du clapet, on arrive ainsi à l'accrocher de la même façon que les moteurs synchrones électriques.

On peut objecter, à l'emploi des coups de bélier dans les

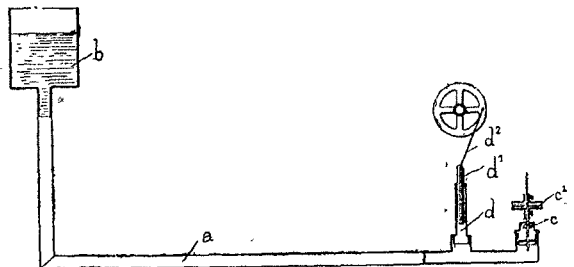


Fig. 33 — Schéma du montage d'un moteur hydraulique synchrone.

moteurs hydrauliques et turbines, la faible vitesse qui en résulte pour ces machines, en raison de la longueur *l* des conduites reliées à la période *T* des moteurs par la relation  $T = \frac{4l}{a}$  et dire que ces moteurs ne sont pas conformes à l'évolution actuelle des machines hydrauliques et autres dont on cherche à augmenter de plus en plus la vitesse. Il n'en est rien, car il est possible, au moyen d'une poche d'air de volume suffisant, de découper dans une conduite un tronçon de la longueur que l'on veut : les réflexions des ondes au lieu de se produire sur la chambre de mise en charge se font sur cette poche d'air.

Je reviendrai ultérieurement sur ces questions.

C. CAMICHEL,

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

(1) Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, t. CLXI, p. 343.

(2) Dans un numéro qui paraîtra prochainement, je traiterai en détail la question des réservoirs d'air. Sur le même sujet, voir les publications de :

M. RATEAU. Revue de mécanique, mai 1900 ;  
 ALLEVI. Revue de mécanique, mars 1904.  
 DE SPARRE. Houille Blanche, oct. et nov. 1911.