

rapports mensuels qui sont faits de manière à comparer les résultats obtenus par les machines différencés et les opérateurs individuels.

Un système de graduations comparatives est utilisé pour montrer l'état de chaque opérateur pour le mois. Ces degrés sont basés sur le coût, et l'excavation par équipe ; ils sont comparés aussi avec les résultats moyens produits par l'ensemble des opérateurs travaillant dans des conditions comparables. Les degrés indiquent si les exécutants sont au-dessus ou au-dessous de la moyenne du fait qu'ils sont au-dessus ou au-dessous de 100 %. Ces rapports très efficaces sont placés mensuellement sur chaque machine et dans chaque camp de travail ; un essai est fait pour reconnaître soigneusement tout record méritoire. De cette façon, une amicale rivalité est obtenue et le travail journalier devient une sorte de jeu dont l'intérêt le plus vif est concentré sur les résultats mensuels. Les bénéfices directs sont augmentés à la fois pour le travail individuel et le travail à la tâche, car des opérateurs médiocres souvent se perfectionnent sous l'aiguillon de l'amour-propre, tandis que les ouvriers non perfectibles, sont facilement remarqués et enlevés de leur travail.

Le travail effectué jusqu'au 1^{er} juin 1919 consiste dans l'excavation de 3.620.000 m³ pour 185 km de drains. Les 8 dragues avec tracteurs à chenilles obtiennent les meilleurs records ; le record mensuel le plus élevé a été de 56.000 m³ environ pour 76 équipes, et la moyenne mensuelle la plus élevée pour les 8 excavatrices a été de 38.000 m³ avec en moyenne 72 équipes. Le prix total est résumé ainsi :

Projet du Rio Grande

Prix de revient des travaux de drainage jusqu'au 1^{er} juin 1919

Drains construits par l'Etat.....	180 km
— — — les entrepreneurs.....	5 km
TOTAL.....	185 km

DÉTAIL	PRIX PAR UNITÉ			
	Prix total	Par km	Par m ³	Pourcentage
Excavation (Etat... 3.605.000m ³)	11.320.400f	63.171f8	2f38	51,2
(Entrepreneurs 115 000m ³)	482.500f	90.104f2	2f87	1,8
Constructions	5 014.320f	27.952f	1f04	23,3
Contrôle, Services.....	1.585.000f	862f	0f30	7,2
Aménagement des chemins (1)...	857.800f	4.661f	0f16	3,9
Dépenses supplémentaires (2)...	2.771.250f	15.061f	0f8)	12,6
	22.031.270f			100.0

Des changements dans les plans primitifs furent introduits. Aussi il fut trouvé impossible de construire des drains de 1^m80 de base, étant donné la nature sableuse des parois, 3 mètres furent nécessaires au minimum. Fréquemment aussi, il faut recréuser le drain pour maintenir une profondeur suffisante ; cela après qu'une période de 10 jours à 2 semaines s'est écoulée, pendant laquelle l'eau courant dans les drains a constitué une surface plus nette.

Le prix des travaux de soutien forment 25 % du coût total ; ce prix est naturellement accru par les conditions

(1) La construction des canaux latéraux est aussi comprise dans ce chiffre.

(2) Entretien des machines, des camps, etc., charge de 0f15 par m³ pour l'usure du matériel.

sableuses nécessitant un fort pilonnement pour toutes les constructions avec fondation.

Le béton est employé pour les plus importantes constructions, le bois pour les petites. Des quantités de tuiles de 90 cm. renforcées avec le béton sont utilisées pour les caniveaux sous les canaux et les routes. Les tuiles ont une longueur de 1^m80, elles sont faites près du chantier où l'on travaille, et y sont transportées sur des trucs ; les dragues les placent. On les encastre dans du béton en quantité suffisante pour assurer l'alignement et rendre les joints solides, on les pose à 1, 2 ou 3 en forme de tonneau suivant les besoins.

Ce type de caniveau est le meilleur marché et a l'avantage sur le type monolithique d'être plus rapidement posé. Cette vitesse d'installation est importante dans le cas de canaux transversaux car les récoltes dépendent surtout d'une irrigation ininterrompue. Les petits canaux latéraux et les rigoles des champs sont faites en métal porté sur une sous-structure de bois, les ponts les moins importants sont construits de bois, ils ont de 1 à 3 arches.

Tels sont quelques-uns des détails techniques de la vaste opération de drainage effectuée par les Américains afin de remédier au désastre véritable qu'un projet d'irrigation mal étudié, avait provoqué. La manière dont ces opérations de drainage ont été conduites, la détermination des bases qui ont servi à établir le plan de travail nous montrent avec quelle précision les ingénieurs américains opèrent et l'usage qu'ils font des données scientifiques. Mais il n'en est pas moins vrai que la dépense de tant d'efforts et de tant d'argent (une centaine de millions) eût pu être évitée si le projet d'irrigation lui-même avait été soumis à la recherche scientifique. L'exemple du Rio Grande est typique, il nous amène encore à formuler cette conclusion d'une importance pratique si grande qu'aucun projet d'irrigation ne peut être établi avant que les conditions physiques des terres auquel il doit s'appliquer n'aient été soigneusement étudiées.

J. LEMARCHANDS,
Agrégé de l'Université.

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 (1).

I. — VÉRIFICATION DE L'ÉTAT D'UNE CONDUITE — MÉTHODE DE LA DÉPRESSION BRUSQUE.

Dans les recherches d'hydraulique, il est nécessaire d'avoir affaire à une conduite bien définie, complètement purgée d'air ou contenant des poches d'air de volume connu, en des points déterminés.

Pour m'assurer qu'une conduite est complètement purgée d'air, et en même temps pour déterminer la vitesse *a* de propagation de l'onde dans la conduite, j'emploie la *méthode de la dépression brusque*, que j'ai décrite dans les *Comptes*

(1) Cette étude a paru dans la *Lumière électrique* en 1917.

rendus de l'Académie des Sciences (tome CLXI, p. 412, 1915).

Soit l la longueur de la conduite depuis la chambre de mise en charge jusqu'à l'extrémité aval, où se trouve un petit robinet ; on ouvre celui-ci pendant une durée très faible vis-à-vis du temps $\frac{2l}{a} = \tau$, que l'onde met pour aller et revenir de l'extrémité aval à la chambre de mise en charge. La diminution de pression est inscrite par un manomètre, qui enregistre ensuite cette variation de pression, réfléchiée par l'extrémité amont (chambre de mise en charge), 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 a . Le temps est mesuré par un diapason ayant comme période un centième de seconde, ou par une horloge qui permet d'actionner un signal. La période de l'horloge est 1 seconde et le signal est mis en mouvement deux fois par période.

Pendant cette détermination, la conduite étudiée reste fermée et les vannes compensatrices n'interviennent pas. Nous avons appliqué cette méthode avec M. Eydoux à des conduites de 1^m20 de diamètre et de plusieurs centaines de mètres de longueur.

La figure 1 indique l'enregistrement des variations de pression. On voit à la partie supérieure du cliché l'inscription du diapason, au-dessous se trouvent les dépressions et surpressions que nous venons de signaler.

Soit y_0 la pression statique : 17^m3 d'eau, soit ε la vitesse de l'eau et y_1 la pression à l'extrémité de la conduite, au moment du maximum de la dépression ; on a, en adoptant la méthode de M. Allievi

$$y_1 = y_0 + F_1 \quad \varepsilon = -\frac{g}{a} F_1$$

d'où :

$$F_1 = -\frac{a\varepsilon}{g} y_1 = y_0 - \frac{a\varepsilon}{g}$$

À l'époque $\frac{2l}{a}$, la dépression revient à l'extrémité aval, mais elle est changée de signe ; on a, à cette extrémité de la conduite, une vitesse nulle, puisque le robinet est fermé et une pression y_2 donnée par les équations :

$$y_2 = y_0 + F_2 - F_1, \quad 0 = -\frac{a}{g} (F_2 + F_1)$$

d'où

$$F_2 = \frac{a\varepsilon}{g}, \quad y_2 = y_0 + 2\frac{a\varepsilon}{g}$$

On voit que la dépression brusque change de signe et que sa valeur absolue est doublée ; c'est ce que l'expérience vérifie complètement comme il est facile de s'en rendre compte sur la figure 1.

En considérant de même les valeurs $y_3, y_4 \dots$ de la pression aux époques $2 \times \frac{2l}{a}, 3 \times \frac{2l}{a}$, etc., on a de même :

$$y_3 = y_0 + F_3 - F_2, \quad F_3 + F_2 = 0,$$

d'où :

$$F_3 = -\frac{a\varepsilon}{g}, \quad y_3 = y_0 - 2\frac{a\varepsilon}{g}$$

$$y_4 = y_0 + F_4 - F_3, \quad F_4 + F_3 = 0,$$

d'où :

$$F_4 = \frac{a\varepsilon}{g}, \quad y_4 = y_0 + 2\frac{a\varepsilon}{g}$$

La deuxième encoche a une hauteur double de la première ; à partir de la deuxième, toutes les encoches sont pareilles ; c'est bien ce qu'indique la figure 1.

Fig 1 — Méthode de la dépression brusque

Les valeurs trouvées par cette méthode concordent bien avec la formule de M. Allievi :

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

dans laquelle $K = 0,5$ pour le fer, d est le diamètre et e l'épaisseur de la conduite.

Des expériences ont été faites à l'usine à gaz de Toulouse (1). La conduite de l'usine à gaz de Toulouse avait 154^m50 de longueur, 80 millimètres de diamètre, 5 millimètres d'épaisseur ; la pression statique y_0 était égale à 4 mètres d'eau. La méthode de la dépression brusque a donné une vitesse de 1.280 mètres par seconde. La vitesse tirée de la formule d'Allievi était 1.315 mètres.

D'autres expériences faites à l'Institut Electrotechnique de Toulouse sur une conduite ayant la même épaisseur et le même diamètre que la précédente et 186^m8 de longueur, la pression statique y_0 étant 17^m30, a donné :

$$\frac{4l}{a} = 0^s,57$$

d'où :

$$a = 1.312 \text{ mètres par seconde.}$$

II. — MÊME MÉTHODE. — OBSERVATION AU MILIEU DE LA CONDUITE.

On peut appliquer la même méthode en plaçant le manomètre au milieu de la conduite et provoquant, comme dans le premier cas, la dépression brusque par la manœuvre d'un robinet situé à l'extrémité aval.

Fig 2 — Dépression brusque observation au milieu de la conduite.

On obtient alors le graphique (cliché n° 2), qui comprend d'abord une dépression ; celle-ci, après réflexion sur la chambre de mise en charge, change de signe et devient compression ; après réflexion sur l'extrémité aval, elle conserve son signe et reste compression. La réflexion sur la chambre de mise en charge change ensuite son signe, etc., on explique ainsi le graphique 2, qui sert comme le précédent à la détermination de la vitesse.

III. — APPLICATION, DÉTERMINATION DE LA POSITION D'UNE POCHÉ D'AIR DANS UNE CONDUITE.

L'expérience a porté sur une conduite de 115^m7 de longueur ; le graphique de la dépression brusque a donné (fig. 3) :

$$\frac{4l}{a} = \frac{24}{67,5}$$

(1) M. Versepuy, directeur de cette usine a bien voulu mettre à ma disposition avec une extrême obligeance, plusieurs conduites de fer, de vastes emplacements et un matériel très précieux ; je tiens à le remercier tout particulièrement. M. Versepuy est en même temps qu'un ingénieur tout particulièrement un savant remarquable ; il considère avec raison qu'il est indispensable de réserver dans l'usine moderne une certaine place aux laboratoires de recherches. Il faut souhaiter de voir de pareilles idées se généraliser dans le monde industriel.

d'où, en adoptant comme vitesse 1.300 mètres,

$$l = \frac{1\,300 \times 24}{4 \times 67,5} = 115^m,6;$$

on provoque en un point de la conduite une poche d'air et on répète l'expérience de la dépression brusque, en désignant par l' la distance de cette poche d'air à l'extrémité aval de la conduite on a :

$$\frac{4\,l'}{a} = \frac{14}{52}$$

d'où :

$$l' = \frac{1\,300 \times 14}{4 \times 52} = 87^m,5;$$

la distance réelle est 86^m5.

Fig 3. — Conduite sans poche d'air

M. Joukowski dans son important travail sur les coups de bélier avait indiqué une méthode analogue.

IV. — FERMETURE BRUSQUE ET COMPLÈTE

Indépendamment de la méthode précédente, on peut aussi se rendre compte de l'état de la conduite, en provoquant des coups de bélier de fermeture brusque, c'est-à-dire ayant une durée inférieure à $\frac{2\,l}{a}$, telle que la fermeture soit terminée quand l'onde revient à l'extrémité aval.

Les formules de la fermeture brusque sont les suivantes : en désignant par γ_0 la pression statique, on a à la fin de la fermeture (époque 0) une pression γ_1 dans la conduite satisfaisant aux relations :

$$\gamma_1 = \gamma_0 + F_1, \quad 0 = v_0 - \frac{g}{a} F_1,$$

v_0 désignant la vitesse initiale de l'eau dans la conduite, d'où :

$$F_1 = \frac{av_0}{g}, \quad \gamma_1 = \gamma_0 + \frac{av_0}{g}.$$

Le coup de bélier est donc : $h = \frac{av_0}{g}$.

En désignant par γ_2 la pression dans la conduite à l'époque $\frac{2\,l}{a}$

$$\gamma_2 = \gamma_0 + F_2 - F_1, \quad 0 = v_0 - \frac{g}{a} (F_2 + F_1),$$

d'où :

$$F_2 = 0, \quad \gamma_2 = \gamma_0 - \frac{av_0}{g}.$$

On aura de même :

$$F_3 = \frac{av_0}{g}, \quad \gamma_3 = \gamma_0 + \frac{av_0}{g},$$

$$F_4 = 0, \quad \gamma_4 = \gamma_0 - \frac{av_0}{g}, \text{ etc.}$$

Fig 4 — Conduite avec poche d'air

Le cliché 5 donne le graphique correspondant aux formules précédentes.

Les expériences faites à l'usine à gaz et à l'Institut Electro-

technique ont montré que le coup de bélier était bien représenté par la formule :

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

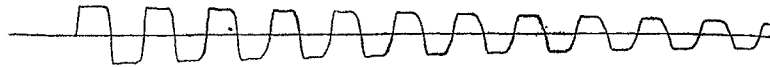


Fig 5. — Fermeture brusque et complète.

Je citerai les expériences suivantes :

Expérience I E 112-6.

Jaugeage : 50 secondes ; masse d'eau écoulée : 26 250 grammes.

Tare : 12.050 grammes.

On a pris :

$$a = 1.305 \text{ mètres.}$$

La vitesse est :

$$v_0 = 0^m0568.$$

le coup de bélier calculé est :

$$h = \frac{1\,305 \times 0,0568}{9,8} = 7^m,56;$$

sur le graphique 24^{mm}8 correspondent à 16^{mm}85 de pression, le coup de bélier observé correspond à 11^{mm}2.

D'où :

$$h = \frac{11,2 \times 16,85}{24,8} = 7^m,59.$$

Expérience I E 112-7.

La fermeture de la conduite a été faite par un petit robinet latéral.

Jaugeage : 100 secondes ; masse d'eau écoulée : 29.200 grammes.

Tare : 12.050 grammes.

La vitesse :

$$v_0 = 0^m0344.$$

Le coup de bélier calculé est :

$$h = \frac{0,0344 \times 1\,305}{9,8} = 4^m,5$$

$$h \text{ observé} = 4^m7.$$

Expérience I E 112-9.

Jaugeage : 100 secondes ; masse de l'eau écoulée : 31.250 grammes.

Tare : 12.000 grammes.

La vitesse de l'eau est :

$$v_0 = 0^m0385.$$

Le coup de bélier calculé est :

$$h = \frac{0,0385 \times 1\,305}{9,8} = 5^m,127$$

$$h \text{ observé} = 5^m28.$$

Remarque. — On peut remarquer que, dans chaque série d'expériences, on prend comme valeur a celle qui est donnée par la méthode de la dépression brusque ; cette valeur convient suffisamment pour la représentation des phénomènes étudiés : nous laissons systématiquement de côté, dans le travail actuel, les modifications de l'onde du fait de sa propagation ; les valeurs de a diffèrent légèrement, elles sont tantôt 1.300, 1.305, 1.310. L'étendue considérable de la conduite (186 mètres de longueur) ne permet pas de

réaliser des conditions tout à fait comparables d'une série à l'autre, les diverses séries étant faites à des époques différentes de plusieurs mois.

Dans ces expériences et dans celles qu'on va expliquer, il est essentiel d'éviter de provoquer des coups de bélier supérieurs à y_0 ; il faut donc ouvrir la conduite ou la fermer avec lenteur. Si, par exemple, on réalise une fermeture brusque telle que

$$h = \frac{av_0}{g} > y_0,$$

la pression devient *negative* dans la conduite, voir figure 5, il se produit donc des rentrées d'air et des dégagements d'air dissous, la conduite ne peut plus être utilisée, elle donne pour a des valeurs erronées et beaucoup trop faibles. Il faut arrêter l'expérience et purger la conduite ; à mesure que l'air disparaît les valeurs de a augmentent et se rapprochent de la valeur théorique. Pour éviter les coups de bélier trop forts, c'est surtout à la fin de la fermeture qu'il faut ralentir le mouvement du robinet ; ceci est conforme à la formule de M. de Sparre qui a montré qu'une fermeture brusque réduisant la vitesse de v_0 et v_1 donne un coup de bélier h :

$$h = \frac{a}{g} \frac{v_0 - v_1}{1 + \frac{av_1}{2gy_0}}$$

Nous aurons l'occasion de revenir sur ce point ultérieurement, à propos des fermetures brusques partielles.

Indépendamment des procédés que nous venons de décrire, le clapet automatique que nous signalerons plus loin indique par sa période si la conduite est complètement purgée.

V. — ANALYSE D'UNE CONDUITE. — RÉSONANCE DES DIVERS HARMONIQUES.

Quand une conduite est bien purgée d'air et qu'elle donne une vitesse a bien constante, il est nécessaire d'en faire l'analyse et de déterminer la période fondamentale et les divers harmoniques qu'elle donne de préférence.

J'ai indiqué (*Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, loc. cit.) la méthode qu'on peut utiliser dans ce but et qui m'a permis de mettre en évidence les divers harmoniques d'une conduite. On munit celle-ci, à son extrémité aval, d'un petit robinet entraîné par un moteur dont on fait varier lentement la vitesse. Le manomètre branché à côté de ce robinet met en évidence les diverses résonances.

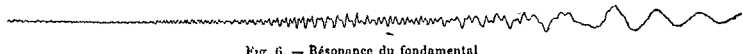


Fig 6. — Résonance du fondamental

Les expériences ont été faites d'abord à l'usine à gaz de Toulouse ; la figure 6 représente la résonance du fondamental, les sinusoides qui apparaissent à la fin du cliché ont une période correspondant à 14^{mm}5. La seconde représentée en regard occupe 30^{mm}5 ; on a, θ_1 désignant la période du fondamental :

$$\frac{4 \times l}{a \theta_1} = \frac{4 \times 154,5 \times 30,5}{1\ 280 \times 14,5} = 1,016 \text{ au lieu de } 1 ;$$

on prend pour a 1.280 mètres comme l'indique pour la conduite de l'usine à gaz la méthode de la dépression brusque.

Le tuyau présente alors un nœud à l'extrémité aval et un ventre à l'extrémité amont.

Au moment de la résonance, l'oscillation s'épure et la courbe devient sinusoidale ; la même remarque s'applique aux harmoniques.

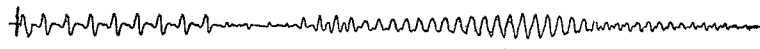


Fig 7. — Résonance du 2°, 3° et 4° harmonique.

La figure 7 représente diverses résonances enregistrées toujours à l'extrémité de la conduite. La ligne d'inscription des secondes étant en haut et la figure étant parcourue de gauche à droite, on trouve d'abord un premier minimum très net. Pour déterminer la période correspondant à ce minimum, on ne peut faire usage du graphique pris à l'extrémité de la conduite ; on a enregistré en même temps la pression en un poste situé à 28^m18 de l'extrémité aval de la conduite (ce graphique n'est pas représenté). Un contact, qu'on établit au début de l'inscription et qui correspond à un signal visible au début des divers graphiques sur la ligne des secondes, permet de faire correspondre entre elles les secondes marquées au premier poste et au deuxième poste. On a, en se servant du deuxième graphique :

$$\theta_2 = \frac{8,5}{36} = \frac{4 \times 154,5}{x \times 1\ 280} ;$$

on a : $x = 2.045$ au lieu de 2 ; θ_2 désignant la période trouvée au deuxième poste.

Donc :

$$\theta_2 = \frac{2l}{a}$$

Le tuyau comprend alors un ventre à chaque extrémité et un nœud au milieu.

Le maximum qu'on trouve ensuite dans la figure 7 correspond au troisième harmonique ; on trouve en effet que cinq sinusoides au voisinage du maximum occupent 21^{mm}7, la seconde occupe 27^{mm}5. On a :

$$\frac{4 \times l}{a \times \theta_3} = \frac{4 \times 154,5 \times 5 \times 27,5}{1\ 280 \times 21,7} = 3,06 \text{ au lieu de } 3,$$

θ_3 étant la période cherchée.

En prenant pour a la vitesse 1.310 mètres qui est la vitesse théorique on aurait, au lieu de 3.06, 2.98.

On voit donc que le maximum situé à droite sur le graphique n° 7 correspond bien à l'harmonique 3 ; on a alors un ventre à la chambre de mise en charge, un nœud au premier tiers amont, un ventre au deuxième tiers aval, et un nœud à l'extrémité aval de la conduite.

On verra plus loin, à propos de l'amplitude des harmoniques, la répartition des pressions produites dans la conduite par l'harmonique 3.

Le minimum qui est situé tout à fait à l'extrémité du cliché 7 correspond au quatrième harmonique ; on a trouvé, en effet, qu'au voisinage de ce minimum 6 sinusoides correspondent à 20^{mm}5, une seconde correspondant à la même région à 28^{mm}0, on trouve :

$$\frac{l}{a \theta_4} = \frac{154,5 \times 6 \times 28}{1\ 280 \times 20,5} = 0,989 \text{ au lieu de } 1.$$

C'est bien le quatrième harmonique. La conduite présente alors trois ventres situés aux deux extrémités et au milieu et deux nœuds intermédiaires.

La figure 8 montre la résonance du cinquième harmo-

nique : 10 périodes au voisinage du maximum correspondent à 25^{mm}3, une seconde correspond à 26^{mm}. On a :

$$\frac{4l}{a\theta_5} = \frac{4 \times 154,5 \times 26}{1\ 280 \times 2,53} = 4,96 \text{ au lieu de } 5,$$

0₅ étant la période du cinquième harmonique.

La conduite, quand l'harmonique 5 résonne, présente trois ventres dont un à la chambre de mise en charge et trois nœuds dont un à l'extrémité amont.

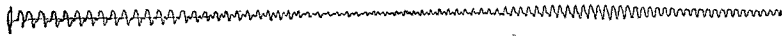


Fig 8 — Résonance du 5^e harmonique.

Remarque. — La conduite dont nous venons de parler avait la forme d'une équerre rectangulaire ; le petit côté amont ayant 20^m0, la longueur totale étant 154^m5. C'est à cette forme simple et au fait que l'épaisseur de la conduite est constante d'un bout à l'autre qu'on doit attribuer la facilité avec laquelle se produisent les divers harmoniques pairs et impairs.

Les divers harmoniques impairs peuvent être mis en évidence, non seulement par la méthode précédente, c'est-à-dire *artificiellement*, mais encore *naturellement*, c'est-à-dire, par exemple, par la simple fermeture d'une vanne ; nous reviendrons ailleurs sur ce point.

VI. — AMPLITUDE DES HARMONIQUES IMPAIRS.

On doit à MM. de Sparre et Allievi de remarquables travaux sur les phénomènes de résonance ; M. de Sparre (*Houille blanche*, 9 septembre 1907) a étudié, en particulier, le cas suivant :

Il envisage des périodes successives de longueur $\frac{2l}{a}$ et suppose 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.

J'ai 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, je dis 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 $(2n+1)^{\circ}$ période, y_{2n} étant

la pression pendant la $(2n)^{\circ}$ période à l'extrémité de la conduite.

La fermeture du distributeur a lieu aux époques impaires :

$$y_0 + F_{2n+1} - F_{2n} = y_0 + F_{2n-1} - F_{2n-2} = y_{2n+1} = \alpha$$

$$v_0 - \frac{g}{a}(F_{2n+1} + F_{2n}) = v_0 - \frac{g}{a}(F_{2n-1} + F_{2n-2}) = 0 \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} F_{2n+1} - F_{2n} &= F_{2n-1} - F_{2n-2} \\ F_{2n-1} + F_{2n} &= F_{2n-1} + F_{2n-2} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} F_{2n+1} &= F_{2n-1} = \dots \\ F_{2n} &= F_{2n-2} = \dots \end{aligned} \quad (2)$$

Ecrivons qu'aux époques paires le distributeur est complètement ouvert, il vient :

$$v_0 - \frac{g}{a}(F_{2n} + F_{2n-1}) = v_0 \sqrt{1 + \frac{F_{2n} - F_{2n-1}}{y_0}}$$

en appliquant le théorème de Bernoulli (1).

Or, le premier membre est nul en vertu des équations (1) et (2), donc :

$$F_{2n} - F_{2n-1} = -y_0, \quad F_{2n} + F_{2n-1} = \frac{av_0}{g}$$

ce qui donne :

$$\left\{ \begin{aligned} F_{2n} &= \frac{av_0}{2g} - \frac{y_0}{2} \\ F_{2n-1} &= \frac{av_0}{2} + \frac{y_0}{2} \end{aligned} \right\}$$

et enfin en remplaçant dans :

$$\left\{ \begin{aligned} y_{2n+1} &= y_0 + F_{2n+1} - F_{2n} \\ y_{2n} &= y_0 + F_{2n} - F_{2n-1} \end{aligned} \right.$$

F_{2n+1} et F_{2n} par leurs valeurs, on a :

$$\left\{ \begin{aligned} y_{2n-1} &= 2 y_0 \\ y_{2n} &= 0 \end{aligned} \right.$$

donc pourvu que la relation $y_0 > \frac{av_0}{g}$ soit satisfaite, la résonance du fondamental a pour effet de faire varier la charge à l'extrémité de la conduite de 0 à 2 y_0 ; la pression statique est doublée quelle que soit l'ouverture du distributeur ; nous en verrons plus loin une démonstration directe par le clapet automatique.

La figure 9 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^m8 et comme pression statique 17^m3

La ligne horizontale inférieure du cliché 9 représente la pression atmosphérique ; la ligne médiane représente la d'eau (2).

(1) On remarque que l'évaluation des longueurs correspondant à la période cherchée et à la seconde se fait dans la même région du graphique ; cette précaution est indispensable en raison des variations de vitesse de l'appareil enregistreur ; ces variations sont mises en évidence par les sinusoides du diapason, exemple : figure n° 1.

(2) Dans tous les clichés qui suivent la ligne horizontale inférieure correspond à la pression atmosphérique ; la deuxième ligne horizontale correspond à la pression statique dans la conduite 17 m. 3 d'eau ; la troisième ligne horizontale, qui n'est pas tracée dans tous les clichés, correspond au double de la pression statique. On trouve également sur certains clichés, par exemple figure 1, les centièmes de seconde indiqués par un diapason et les demisecondes indiquées par un signal actionné par une horloge dont la période était exactement pendant les expériences 1,01 seconde. Enfin quand on prend simultanément deux clichés en des points différents ou correspondant à des phénomènes différents, exemple : figures 22, 23, figures 6, 7, 8, on établit une correspondance entre les secondes des deux clichés au moyen d'un courant très faible qui est envoyé au début de l'expérience dans les signaux placés aux deux postes.

pression statique $y_0 = 17^m3$; 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 $y_0 = 17^m3$.

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 secondes, ce qui correspond à la vitesse a théorique de 1.310 mètres.

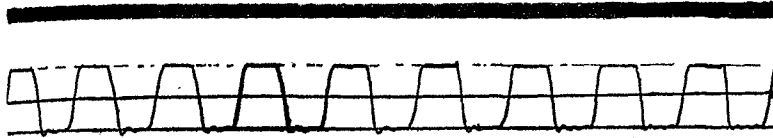


Fig 9 — Résonance du fondamental par robinet tournant, réglage du tachymètre.

En triplant la vitesse du robinet, on a fait apparaître la résonance correspondant à l'harmonique 3 ; en quintuplant 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.



Fig 10. — Résonance du fondamental par robinet tournant, réglage par minimum de débit.

Considérons, en effet, l'harmonique de rang $2n+1$; le robinet tournant qui met en évidence cet harmonique fonctionne de la façon suivante : la période de ses ouvertures et fermetures est $\frac{T}{2n+1}$; soit $T = \frac{4l}{a} = 2\tau$, la période fondamentale de la conduite :

Au temps θ le robinet est complètement ouvert ;

Au temps $\frac{T}{2(2n+1)}$ le robinet est complètement fermé ;

Au temps $2 \frac{T}{2(2n+1)}$ le robinet est complètement ouvert ;

Au temps $(2n+1) \frac{T}{2(2n+1)} = \frac{T}{2}$ le robinet est complètement fermé ;

Au temps $2(2n+1) \frac{T}{2(2n+1)} = T$ le robinet est complètement ouvert.

On se trouve donc exactement dans les conditions du calcul précédent.

L'expérience a vérifié complètement qu'il en est ainsi, l'harmonique 3 et l'harmonique 5 ont donné le même résultat que le fondamental. Les photographies 11 et 12 le montrent sans qu'il soit nécessaire d'ajouter d'autres explications.

L'expérience ne présente pas de grandes difficultés ; néanmoins certains harmoniques sont plus difficiles à obtenir que d'autres probablement à cause des coudes que renferme la conduite de l'Institut Electrotechnique ; celle-ci

donne difficilement l'harmonique 3 et au contraire très facilement l'harmonique 5.

Les résonances des clichés 10, 11 et 12 ont été obtenues au moyen d'une propriété très intéressante à bien des points de vue, évidente *a priori* ; au moment de la résonance des harmoniques impairs le débit passe par un minimum.

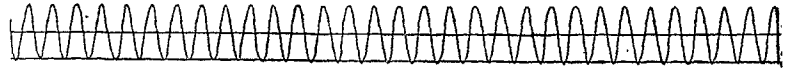


Fig 11 — Résonance du 3^e harmonique par robinet tournant, réglage par minimum de débit.



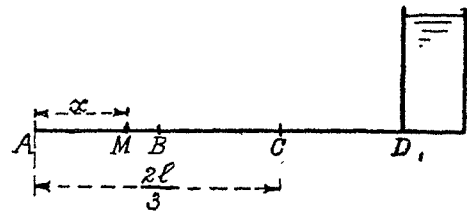
Fig 12 — Résonance du 5^e harmonique par robinet tournant, réglage par minimum de débit.

Les résonances des harmoniques impairs peuvent être réglées par quatre procédés : 1° le tachymètre ; 2° la lecture de la pression ; 3° le minimum de débit ; 4° la différence de phase des pressions en divers postes sur la conduite (voir plus loin). Le troisième procédé (minimum de débit) est de beaucoup le plus précis.

Nous aurons l'occasion de revenir sur cette question du minimum de débit.

VII. — RÉPARTITION DU FONDAMENTAL LE LONG DE LA CONDUITE.

La comparaison de la conduite à un tuyau sonore nous indique que, pendant la résonance du fondamental, la phase pour tous les points de la conduite sera la même. L'expérience est facile à réaliser, on dispose deux manomètres, l'un à l'extrémité aval, l'autre au premier tiers amont de la conduite ; on fait résoner le fondamental ; en visant à la fois les équipages mobiles des deux manomètres, on vérifie que leur différence de phase est nulle.



L'assimilation à un tuyau sonore nous permet également la répartition de la pression, au moment de la résonance du fondamental.

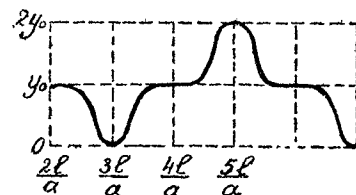


Fig. 14.

Figurons la conduite ABCD (fig. 13), D est l'extrémité amont. A l'extrémité aval. Nous avons pour la valeur de la pression en A :

$$y_{2n+1} = y_0 + F_{2n+1} - F_{2n}.$$

D'après ce que nous avons démontré la fonction F a les valeurs suivantes :

$$\begin{aligned} & \text{pour } t \text{ compris entre : } \begin{cases} 0 \text{ et } \frac{2l}{a}, \\ \frac{4l}{a} \text{ et } \frac{6l}{a}, \\ \frac{8l}{a} \text{ et } \frac{10l}{a}. \end{cases} & F(t) = \frac{av_0}{2g} + \frac{y_0}{2} \\ & \text{pour } t \text{ compris entre : } \begin{cases} \frac{2l}{a} \text{ et } \frac{4l}{a}, \\ \frac{6l}{a} \text{ et } \frac{8l}{a}. \end{cases} & F(t) = \frac{av_0}{2g} - \frac{y_0}{2} \end{aligned}$$

D'ailleurs, en un point quelconque M de la conduite situé à une distance x de l'extrémité aval, on a $AM = x$.

$$y = y_0 + F\left(t - \frac{x}{a}\right) - E\left(t - \frac{2l}{a} + \frac{x}{a}\right).$$

Etudions par exemple le graphique des pressions en C, premier tiers amont. Le manomètre est placé en C :

$$AC = \frac{2l}{3}$$

on a :

$$\begin{aligned} \text{époque } \frac{2l}{a}, y &= y_0 + F\left(\frac{2l}{a} - \frac{2l}{3a}\right) - F\left(\frac{2l}{a} - \frac{2l}{a} + \frac{2l}{3a}\right) = y_0 \\ \text{époque } \frac{3l}{a}, y &= y_0 + F\left(\frac{3l}{a} - \frac{2l}{3a}\right) - F\left(\frac{3l}{a} - \frac{2l}{a} + \frac{2l}{3a}\right) = 0 \\ \text{époque } \frac{4l}{a}, y &= y_0 + F\left(\frac{4l}{a} - \frac{2l}{3a}\right) - F\left(\frac{4l}{a} - \frac{2l}{a} + \frac{2l}{3a}\right) = y_0 \\ \text{époque } \frac{5l}{a}, y &= y_0 + F\left(\frac{5l}{a} - \frac{2l}{3a}\right) - F\left(\frac{5l}{a} - \frac{2l}{a} + \frac{2l}{3a}\right) = 2y_0 \end{aligned}$$

Le cliché 15 donne l'inscription de la pression, en c, au moyen du graphique 15 et du graphique correspondant pris à l'extrémité aval, on peut, en distinguant les secondes par un signal, vérifier la concordance des phases.

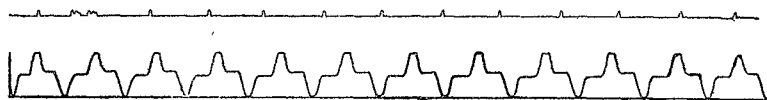


Fig. 15 - Résonance du fondamental; premier tiers amont.



Fig. 16 - Résonance de l'harmonique 3 au deuxième tiers aval.

VIII. — RÉPARTITION DE L'HARMONIQUE 3 LE LONG DE LA CONDUITE.

Dans certaines conduites industrielles, nous avons remarqué, avec M. Eydoux, l'existence de l'harmonique 3.

La répartition de cet harmonique est évidente, il présente un nœud en A et en C et un ventre en B et en D.

La pression au deuxième tiers aval B sera constante et égale à y_0 dans le cas d'une conduite horizontale.

Les formules l'indiquent également.

On a en B :

$$y = y_0 + F\left(-\frac{l}{3a}\right) - F\left(t - \frac{2l}{a} + \frac{l}{3a}\right) = y_0.$$

puisque la fonction F a $\frac{4l}{3a}$ comme période.

Le cliché 16 représente l'inscription de la pression au deuxième tiers aval au moment de la résonance de l'harmonique 3.

Prenons le premier tiers amont C. Les surpressions en A

et C seront décalées d'une demi-période, c'est-à-dire constamment égales et de signes contraires.

La pression en A est :

$$y_A = y_0 + F(t) - F\left(t - \frac{2l}{a}\right);$$

en C :

$$y_C = y_0 + F\left(t - \frac{2l}{3a}\right) - F\left(t - \frac{2l}{a} + \frac{2l}{3a}\right).$$

Or :

$$F(t) - F\left(t - \frac{2l}{a}\right) = -F\left(t - \frac{2l}{3a}\right) + F\left(t - \frac{2l}{a} + \frac{2l}{3a}\right),$$

toujours pour la même raison.

Donc :

$$\begin{cases} y_A = y_0 + \delta. \\ y_C = y_0 - \delta. \end{cases}$$

Pendant la résonance de l'harmonique 3, l'amplitude de la surpression est donc la même au premier tiers amont et à l'extrémité aval de la conduite.

Le décalage d'une demi-période des pressions en A et C se vérifie aisément en observant, au moment de la résonance de l'harmonique 3, les équipages mobiles des deux manomètres placés en A et C ; c'est même un procédé qui permet de régler avec précision la vitesse du robinet tournant, pour obtenir la résonance de cet harmonique.

Le cliché 17 représente l'inscription de la pression en C au premier tiers amont. La pression est sensiblement doublée par la résonance comme à l'extrémité aval.

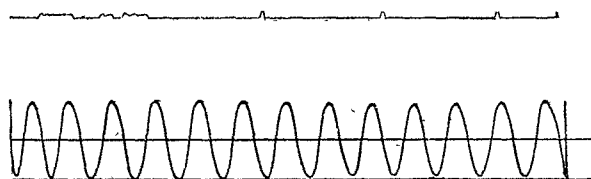


Fig. 17. — Harmonique 3; premier tiers amont.

J'attire l'attention des industriels sur le cliché 17 qui montre la nécessité du renforcement des conduites au premiers tiers amont, lorsque l'harmonique 3 a une tendance marquée à se produire. Il ne faudrait pas croire d'ailleurs que les harmoniques ne se produisent que sous l'influence des régulateurs des turbines, ils peuvent prendre naissance spontanément dans des fermetures ; quand celles-ci ne sont que partielles, le grand amortissement supprime tout danger, il n'en est pas de même à la fin de la fermeture. C'est là encore un point sur lequel je me propose de revenir ultérieurement.

(A suivre.)

G. CAMICHEL,

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

LES FOURS A INDUCTION

ET LEUR APPLICATION

dans l'industrie du fer et de l'acier

CHAPITRE PREMIER

APERÇU HISTORIQUE

Les fours à induction employés jusqu'à présent dans l'industrie sont des transformateurs dont le secondaire est formé d'une seule spire en court-circuit, dans laquelle la densité de courant est telle que le conducteur qui forme la spire est maintenu à l'état de fusion.