elle ne supporte que 900. La propagation de magnésie contenue dans le mélange influe aussi, la magnésie ayant une grande vitesse de dilatation suivant sa teneur en eau ; ainsi pour résumer : la haute teneur en magnésie, la longueur de la conduite, une longue période d'emmagasinement, un climat aride, interviennent activement dans la rupture, si l'une de ces conditions avait été absente, l'accident sans doute n'eût pas eu lieu. Les remèdes à appliquer : faire des joints d'expansion, immerger la conduite totalement pendant une heure et demie à deux heures avant de la poser ; si elle est petite cette précaution est inutile, mais il faut alors amener l'eau dès la pose et noyer la tranchée.

Des recherches faites en Californie, à climat plus humide, n'ont pas fourni de pareils exemples ; dans la vallée de Saint-Joaquin ils sont nombreux, c'est l'influence du climat sec. L'exemple est donc tout à fait intéressant pour nous, nous ne manquons pas, en effet, de régions sèches ; sans parler du Midi de la France, les projets d'irrigation actuellement à l'étude dans nos colonies africaines, Tunisie-Algérie particulièrement, devront tenir compte de ce facteur.

(A suivre.)

J. LEMARCHANDS,
Agrégé de l'Université.

L'ÉTUDE DES COUPS DE BÉLIER

DANS LES

CANALISATIONS MÉTALLIQUES SOUS PRESSION

RÉSULTATS OBTENUS PENDANT LA GUERRE

(SUITE)

Les coups de bélier dans les conduites forcées.

On appelle « coups de bélier » les variations de pression qui prennent naissance dans les conduites sous l'influence du changement de vitesse de l'eau, provenant par exemple du fonctionnement du régulateur de la turbine alimentée. Ces phénomènes ont actuellement un grand intérêt en raison du développement des installations hydroélectriques qui comprennent, sauf de très rares exceptions, des canalisations de grande importance (1) dont la rupture entraîne toujours des conséquences très graves : arrêt prolongé de l'usine, dégâts causés parfois à la partie intacte de la conduite, au bâtiment de l'usine, à sa machinerie, aux terrains riverains, etc...

Il est nécessaire, pour l'économie, de réduire le plus possible l'épaisseur de ces conduites ; il faut pour cela connaître exactement les pressions produites par les divers fonctionnements possibles du régulateur, et donner à la paroi de la conduite l'épaisseur juste suffisante pour que le métal, sous l'influence de la pression statique augmentée des surpressions, travaille au taux habituel de 8 à 10 kgm. par mm^2. La tendance actuelle de l'industrie est d'augmenter la vitesse de l'eau dans les conduites : celle-ci ne dépassait pas récemment encore 2 à 3 mètres par seconde, on atteint aujourd'hui, dans certains pays, 5 et 6 mètres par seconde ; ce qui rend encore plus importante la question des coups de bélier. Néanmoins, cette augmentation de vitesse est limitée par la perte de charge.

Les appareils de protection employés : réservoirs d'air, cheminées d'équilibre, viennent encore compliquer cette étude.

En outre, les usines métallurgiques tendent de plus en plus à l'emploi des presses hydrauliques, alimentées soit par des chutes d'eau, soit par des pompes avec interposition d'accumulateurs ; on sait combien les coups de bélier sont violents dans ces installations.

Nous allons résumer l'état actuel de cette question et indiquer les méthodes employées dans l'industrie pour le calcul de ces phénomènes, dans les projets de conduites forcées.

Nous diviserons les coups de bélier en deux classes distinctes : *ondes se propageant avec une vitesse finie, oscillations en masse.* A la première catégorie appartiennent les phénomènes qui se produisent dans les conduites entièrement purgées ; à la seconde les conduites munies de réservoirs d'air, de cheminées d'équilibre, de parechocs, lorsque la dilatation de l'enveloppe et la compressibilité du liquide peuvent être négligées vis-à-vis des autres phénomènes. Cette division des coups de bélier est commode, mais artificielle, car souvent les deux catégories de phénomènes coexistent.

Quant aux conduites, certaines ont sur toute leur longueur la même épaisseur, le même diamètre et la même nature : nous les appellerons conduites à *caractéristique unique.* Le plus souvent, les conduites sont plus épaisses à leur extrémité aval et plus minces à leur extrémité amont ;

(1) On peut dire que les conduites représentent une dépense comprise environ entre 1/12 et 1/5 de la dépense à engager Pour des installations importantes, cette dépense varie de 500.000 francs à 3 ou 4 000.000 de francs et même plus.

Les conduites sont installées de plusieurs façons distinctes, que nous allons résumer rapidement :

1° *Dans les usines utilisant de très fortes chutes,* on rencontre après la prise d'eau un canal d'amenée à écoulement libre dont la longueur varie couramment entre 1 et 10 kilomètres. Ce canal se termine à son extrémité aval par une chambre de mise en charge d'où partent des conduites sous pression à très forte pente, amenant l'eau aux moteurs hydrauliques. On peut trouver de très nombreux exemples de cette disposition, depuis l'usine de Vouvry (Valais) avec sa chute de 1.650 m., jusqu'à, pour prendre des exemples dans la région pyrénéennne qui nous est plus familière, l'usine d'Orlu de 20.000 chevaux avec une chute de 940 m., l'usine de Soulom appartenant à la Cie du Midi où des canaux de 6 kilomètres et 4 kilomètres de longueur permettent de réaliser des chutes de 120 et 210 m., l'usine de Sarrancolin où un canal d'amenée de 5.500 m. amène l'eau à une conduite où se réalise une chute de 50 m. Les diamètres de ces conduites varient entre 0 m. 60 pour Orlu et 2 m. 80 pour Sarrancolin.

2° *Dans des usines utilisant de faibles chutes avec de gros débits* (jusqu'à 6 et 7 m. de chute), il n'y a pas de conduite sous pression, la différence de niveau étant créée par un barrage et les turbines prenant directement l'eau dans le bief amont. Mais au-dessus de cette hauteur de chute, on rencontre fréquemment une conduite forcée partant de la prise d'eau même et aboutissant directement par une faible pente aux turbines. Nous citerons comme exemple l'usine de Champ dans l'Isère, où une conduite en charge de 4.500 m. de longueur totale et de 3 m. 20 de diamètre intérieur, exécutée partie en béton armé, partie en acier doux, permet de réaliser une chute de 35 m. environ avec un débit de 20 à 25 $m.^3$ emprunté aux eaux du Drac.

3° Enfin dans certaines usines du 1er type, qui ont à fournir de l'énergie en quantité variable, à chaque instant, ou, comme on dit, à faire face à des pointes, *la tendance actuelle est de mettre le canal d'amenée en charge.* On évite ainsi les réglages à la prise d'eau en mettant en communication directe, par l'ensemble du système en charge, la prise d'eau en rivière et la turbine, qui prend ainsi constamment et automatiquement dans le cours d'eau la quantité d'eau dont elle a besoin. On peut ainsi créer à peu de frais des réservoirs de pointe dans le lit même de la rivière ou aux abords immédiats.

Le système en charge se décompose ainsi en deux parties : une conduite longue et à faible pente pouvant atteindre 6 à 8 kilom. de longueur et où la pression statique peut varier de 3 à 6 m. de hauteur d'eau à la prise jusqu'à 9 à 25 m. à l'extrémité aval ; une conduite à forte pente, aussi courte que possible, dans laquelle se réalise la partie la plus importante de la chute. Pour faire les conduites dans les parties à faible charge, on remplace le métal par le béton armé, plus économique et plus commode pour l'exécution. Parfois une âme très mince en métal, destinée uniquement à assurer l'étanchéité, est enrobée dans une chemise en béton armé assurant la résistance.

elles sont constituées par des tronçons d'épaisseurs différentes et parfois même de diamètres différents ; nous dirons que de pareilles conduites sont à *caractéristiques variables*.

I. — Coups de bélier de la première catégorie

On trouvera dans l'*Hydraulique* de M. Boulanger, tome II, dans un mémoire de M. Goupil paru en 1907 dans les *Annales des Ponts et Chaussées* et dans le Rapport présenté par M. Jouguet au Congrès de la Houille Blanche de 1914, des bibliographies très complètes des travaux parus avant 1914 sur cette question. Parmi les auteurs, on peut citer : MM. Korteveg, Boussinesq, Resal, Joukowski, Rateau et surtout MM. Allievi et de Sparre [1]. Ce dernier a, en particulier, étudié d'une façon complète le cas des conduites à caractéristiques variables, qui n'avait jamais été abordé avant lui malgré sa grande importance pratique.

Nous avons, nous-mêmes, dans des études poursuivies pendant plusieurs années dans des usines de la région des Pyrénées, en collaboration avec M. Gariel, Directeur des Etablissements Neyret, Beylier, Piccard, Pictet, et à l'Institut Electrotechnique [2] de Toulouse, résolu plusieurs questions relatives aux coups de bélier que nous indiquerons dans cet article.

Le problème des coups de bélier fait intervenir deux éléments : la compressibilité du liquide et la dilatation de l'enveloppe. On néglige, en général, le frottement intérieur ou l'imparfaite fluidité de l'eau ; on suppose que les composantes transversales de la vitesse par rapport à l'axe de la conduite pris pour axe des x sont nulles et que la vitesse n'est fonction que de x et de t, c'est-à-dire la même, à chaque instant, en tous les points d'une même section droite de la conduite. On peut résumer en un mot le résultat fondamental auquel on arrive : l'étude des coups de bélier se ramène à l'équation de d'Alembert des cordes vibrantes.

§ 1. — Conduites à une seule caractéristique.

1. *Equations générales.* — Nous allons indiquer comment MM. Joukowski et Alliévi ont traité ce problème.

Considérons d'abord une conduite horizontale (fig. 1) ;

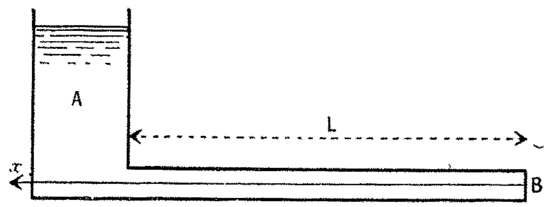

Fig. 1.

en A se trouve la chambre de mise en charge, en B le distributeur.

D désigne le diamètre de la conduite, supposé constant d'un bout à l'autre ;

e son épaisseur supposée constante d'un bout à l'autre ;

E le module d'élasticité de la paroi ;

ε le coefficient de compressibilité de l'eau ;

v_0 et p_0 la vitesse et la pression initiales ;

v et p la vitesse et la pression au temps t ;

ω le poids spécifique du liquide.

L'axe de la conduite est horizontal ; le sens positif de l'axe des x est dirigé d'aval en amont, et par conséquent opposé au sens positif de la vitesse ; les distances x sont comptées à partir du distributeur.

L'équation des forces vives donne :

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\omega}{g}\left(\frac{\partial v}{\partial t} - v\frac{\partial v}{\partial x}\right) \tag{1}$$

dans laquelle le terme $v\dfrac{\partial v}{\partial x}$ est tout à fait négligeable vis-à-vis de $\dfrac{\partial v}{\partial t}$.

Pour écrire l'équation de continuité, on exprime que la différence des volumes d'eau qui passent à travers deux sections distantes de dx est égal au volume d'eau emmagasinée par suite de la compressibilité de l'eau et de la dilatation de l'enveloppe ; on obtient ainsi :

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \left(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{D}{e}\frac{1}{E}\right)\frac{\partial p}{\partial t} \tag{2}$$

En posant :

$$\frac{1}{a^2} = \frac{\omega}{g}\left(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{D}{e}\frac{1}{E}\right) \quad (3) \qquad \text{et} \quad p = \omega y,$$

on a :

$$\frac{\partial v}{\partial t} = g\frac{\partial y}{\partial x} \qquad\qquad \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{g}{a^2}\frac{\partial y}{\partial t},$$

dont les intégrales sont bien connues.

On a donc les équations.

$$y = y_0 + F_1\left(t = \frac{x}{a}\right) + F_2\left(t + \frac{x}{a}\right)$$

$$v = v_0 - \frac{g}{a}\left\{F_1\left(t - \frac{x}{a}\right) - F_2\left(t + \frac{x}{a}\right)\right\} \tag{4}$$

Ces équations montrent que les pressions y et les vitesses v résultent de la composition de deux ondes, l'une se déplaçant avec la vitesse $+a$, l'autre avec la vitesse $-a$ [1].

Il est facile de voir que le paramètre a défini par (3) a les dimensions d'une vitesse : LT^{-1}.

Quand le tuyau est indéformable, $E = \infty$; on a alors $a = \sqrt{\dfrac{\omega}{g}\varepsilon}$; la valeur de a est de 1.425^m à la température de 15°. de 15°.

M. Allievi a donné à la formule (3) l'expression :

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48{,}3 + K\dfrac{D}{e}}} \tag{5}$$

où K = 0,5 pour le fer,
K = 1 pour la fonte,
K = 5 pour le plomb.

Prenons par exemple un tuyau en tôle d'acier :

D = 1 mètre, $e = 10^{mm}$;

on a : $a = 998^m6$.

La valeur de a pour les tuyaux métalliques est en général voisine de 1.000 mètres par seconde.

Néanmoins, elle peut être très inférieure à cette valeur ; par exemple, la conduite de la Praz, dont le diamètre est 2 mètres et dont l'épaisseur est 4^{mm} dans le haut de la conduite, a une vitesse a de 329 mètres par seconde.

---

[1] A la fin de cet article, on trouvera une courte bibliographie des travaux cités.

[2] Nous avons conduit simultanément des expériences de laboratoire sur une chute artificielle de 17,3 m. et de quelques chevaux et de grandes expériences industrielles dans une usine d'une puissance totale de 21.000 chevaux répartie entre deux chutes distinctes de 120 m. et 250 m. de hauteur.

[1] La vitesse d'écoulement de l'eau est négligeable vis-à-vis de a.

Pour les tuyaux de caoutchouc du commerce, M. Allievi trouve E compris entre 2.10^5 et 6.10^5, ce qui donne des vitesses comprises entre 17 mètres et 29 mètres. Ce doit être l'ordre de grandeur de la vitesse avec laquelle les pulsations du cœur se propagent dans les artères.

Revenons au système (4) ; au temps $t=0$, la vitesse dans la conduite est v_0 au distributeur et la pression est y_0 ; à ce moment-là, il n'y a pas de surpression, on a donc :

$$F_1(0) = F_2(0) = 0\,;$$

y_0 est la pression statique au distributeur.

La pression à l'extrémité amont de la conduite, c'est-à-dire à la chambre de mise en charge, est également y_0 ; en désignant par L la longueur de la conduite, on doit donc avoir, quel que soit t :

$$F_1\left(t-\frac{L}{a}\right) + F_2\left(t+\frac{L}{a}\right) = 0, \qquad (6)$$

ou :

$$F_2(t) = -F_1\left(t-\frac{2L}{a}\right).$$

On pose $\Theta = \frac{2L}{a}$; c'est la durée d'aller et retour de l'onde du distributeur à la chambre de mise en charge et de cette chambre au distributeur.

On peut alors écrire, pour la pression y et la vitesse v au distributeur, en supprimant les indices de F :

$$y = y_0 + F(t) - F(t-\Theta),$$

$$v = v_0 - \frac{g}{a}\left\{ F(t) + F(t-\Theta) \right\},$$

qui sont applicables à partir de l'époque Θ.

On peut interpréter ces équations en disant que la perturbation F se propage avec la vitesse a du distributeur à la chambre de mise en charge, se réfléchit sur celle-ci avec changement de signe et revient au distributeur.

Prenons maintenant un point d'abscisse x et considérons les équations (4) et (6) ; en posant :

$$t + \frac{x}{a} = t' + \frac{L}{a},$$

on a : $$F_2\left(t+\frac{x}{a}\right) = -F\left(t+\frac{x}{a}-\frac{2L}{a}\right).$$

Les équations (4) deviennent donc, en supprimant les indices de F :

$$y = y_0 + F\left(t-\frac{x}{a}\right) - F\left(t-\frac{2L-x}{a}\right),$$

$$v = v_0 - \frac{g}{a}\left\{ F\left(t-\frac{x}{a}\right) + F\left(t-\frac{2L-x}{a}\right) \right\},$$

dont l'interprétation est évidente.

2. *Détermination de la vitesse a. — Méthode de la dépression brusque. Vérification de l'état d'une conduite.* — 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 savoir si une conduite est complètement purgée d'air, et en même temps pour déterminer la vitesse a de propagation de l'onde dans la conduite, nous employons la *méthode de la dépression brusque*, imaginée et étudiée par l'un de nous. A l'extrémité aval, se trouve un petit robinet ; on ouvre celui-ci pendant une durée très faible vis-à-vis du temps $\frac{2L}{a} = \Theta$ que l'onde met pour aller de l'extrémité aval à la chambre de mise en charge et revenir. La diminution de pression est inscrite par un manomètre, qui enregistre ensuite cette variation de pression, réfléchie 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. Pendant cette détermination, la conduite étudiée reste fermée et les vannes compensatrices n'interviennent pas.

La figure 2 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.

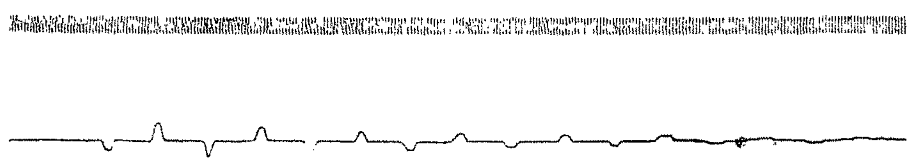

Fig 2. — Détermination de la vitesse a.

Soit y_0 la pression statique = 17 m. 3 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 :

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

d'où :

$$y_1 = y_0 - \frac{a\varepsilon}{g}. \qquad (7)$$

A 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 :

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

d'où

$$F_2 = \frac{a\varepsilon}{g}, \quad y_2 = y_0 + 2\frac{a\varepsilon}{g}. \qquad (8)$$

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 2.

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

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

d'où :

$$F_3 = -\frac{a\varepsilon}{g}, \quad y_3 = y_0 - 2\frac{a\varepsilon}{g} \qquad (9)$$

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

d'où :

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

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 2.

Les valeurs trouvées par cette méthode concordent bien avec la formule de M. Allievi (5).

3. *Fermeture brusque et complète.* — Nous dirons qu'une fermeture est brusque quand sa durée est inférieure à $\frac{2L}{a}$; cette fermeture est terminée quand l'onde revient à l'extrémité aval.

Les formules de la fermeture brusque sont les suivantes : en désignant par y_0 la pression statique, on a à la fin de la fermeture (époque o) une pression y_1 dans la conduite satisfaisant aux relations :

$$y_1 = y_0 + F_1; \qquad 0 = v_0 - \frac{g}{a} F_1,$$

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

$$F_1 = \frac{av_0}{g}, \qquad y_1 = y_0 + \frac{av_0}{g}. \tag{10}$$

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

En désignant par y_2 la pression à l'extrémité aval de la conduite à l'époque $\frac{2\,L}{a}$, on a :

$$y_2 = y_0 + F_2 - F_1, \qquad 0 = v_0 - \frac{g}{a}(F_2 + F_1),$$

d'où :

$$F_2 = 0, \qquad y_2 = y_0 - \frac{av_0}{g}.$$

On aura de même :

$$F_3 + \frac{av_0}{g}, \qquad y_3 = y_0 + \frac{av_0}{g},$$

$$F_3 = 0, \qquad y_4 = y_0 - \frac{av_0}{g}, \text{ etc.}$$

4. *Fermeture lente.* — Soit s la surface ouverte au temps t du distributeur. Nous appellerons $\psi\,(t)$ la fonction représentant $\frac{s}{S}$, S désignant la section de la conduite.

Pendant le premier intervalle de temps Θ :

$$y = y_0 + F_1 \qquad vS = us;$$

$$v = v_0 - \frac{g}{a}(y - y_0) = u\,\psi = \psi\sqrt{2\,g\,(y_0 + F_1)},$$

La pression est donnée par l'équation :

$$y^2 - 2\,y\left(y_0 + \frac{av_0}{g} + \frac{a^2}{g}\psi^2\right) + \left(y_0 + \frac{av_0}{g}\right)^2 = 0$$

$$0 < t < \frac{2\,L}{a} = \Theta.$$

On choisit pour y la racine inférieure à $y_0 + \frac{av_0}{g}$.

Etudions maintenant ce qui se passe pendant le second intervalle Θ ; écrivons :

$$y = y_0 + F_2 - F_1;$$

$$v = v_0 - \frac{g}{a}(F_2 + F_1) = \psi\sqrt{2\,gy}.$$

La pression est donnée par l'équation :

$$y^2 - 2\,y\left(y_0 + \frac{av_0}{g} - 2\,F_1 + \frac{a^2}{g}\psi^2\right)$$

$$+ \left(y_0 + \frac{av_0}{g} - 2\,F_1\right)^2 = 0 \qquad \text{avec : } \Theta < t < 2\,\Theta.$$

D'une façon générale, on détermine la pression à une époque comprise dans le k^{me} intervalle Θ par l'équation :

$$y^2 - 2\,y\left(\frac{av_0}{g} + (2\,k - 1)\,y_0 - 2\,(y_{k-1} + y_{k-2}\right.$$

$$\left. + \ldots + y_1) + \frac{a^2}{g}\psi^2\right) + \left(\frac{av_0}{g} + (2\,k - 1)\,y_0\right.$$

$$\left. - 2\,(y_{k-1} + y_{k-2} + \ldots + y_1)\right)^2 = 0 \tag{11}$$

avec : $\qquad (k - 1)\,\Theta < t < k\,\Theta.$

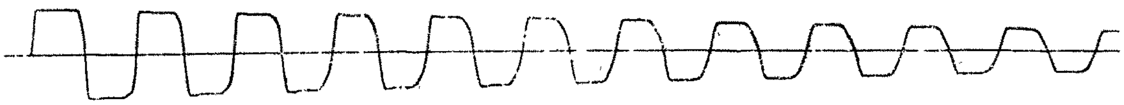

Fig 3 — Coup de bélier de fermeture dans un temps $< 2\,L/a$.

La figure 3 donne le graphique correspondant aux formules précédentes.

Les expériences faites à l'Usine à gaz et à l'Institut Electrotechnique ont montré que le coup de bélier était bien représenté par la formule :

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

L'expérience vérifie complètement ces formules.

Les mêmes méthodes de calcul s'appliquent aux ouvertures .

5. *Formules de M. de Sparre. Fermetures linéaires.* — Toutes les fois que le coup de bélier ne dépasse pas la charge, on peut employer pour calculer le maxima ξ_M du

coup de bélier les formules suivantes qui ont été données par M. de Sparre :

1° Dans le cas d'une fermeture brusque réduisant la vitesse de régime de v_0 à v_1 :

$$\xi_M = \frac{a}{g} \frac{v_0 - v_1}{1 + \frac{a v_1}{2 g y_0}} ; \qquad (12)$$

2° Dans le cas d'une fermeture brusque réduisant la durée T, si $\frac{a v_0}{2 g y_0} < 1$, on a :

$$\xi_M = \frac{2 l v_0}{g T} \frac{1}{1 + \frac{a v_0}{2 g y_0}\left(1 - \frac{2 L}{a T}\right)} \qquad (13)$$

Si $\frac{a v_0}{2 g y_0} > 1$, on a :

$$\xi_M = \frac{l v_0}{g T} \frac{1}{1 - \frac{v_0 L}{2 g T y_0}} \qquad (14)$$

Ces formules sont très utiles ; on les emploie constamment dans les projets de conduites.

6. *Répartition du coup de bélier le long de la conduite.* — Cette question est très importante dans la pratique, les ruptures de conduites se produisant parfois dans les parties hautes. Pour calculer les pressions qui se produisent en un point quelconque de la conduite, on peut employer la méthode suivante :

On commence d'abord par déterminer une fonction F (t) définie de la façon suivante :

Soit $\tau < \Theta$; on a :

époque τ, $y_1 - y_0 = \xi_1 = F_1$
époque $\tau + \Theta$, $y_2 - y_0 = \xi_2 = F_2 - F_1$
époque $\tau + 2\Theta$, $y_3 - y_0 = \xi_3 = F_3 - F_2$
époque $\tau + (k-1)\Theta$, $y_k - y_0 = \xi_k = F_k - F_{k-1}$
d'où : $F_k = \xi_1 + \xi_2 + \ldots + \xi_k$

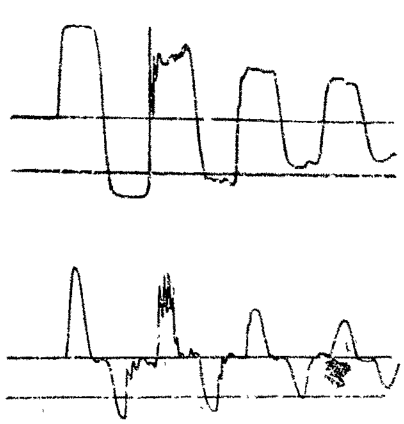

Fig. 4. — Transmission intégrale d'un coup de bélier
En haut, diagramme pris à l'extrémité aval ,
en bas, diagramme pris au premier tiers amont.

Pour avoir le coup de bélier ξ_x à une époque t et en un point de la conduite séparé du distributeur par une distance x, on applique la formule :

$$\xi_x = F\left(t - \frac{x}{a}\right) - F\left(t - \frac{2 L - x}{a}\right).$$

L'expérience vérifie bien les résultats ainsi obtenus.

Transmission intégrale. — Il est facile de voir que, dans une conduite à caractéristique constante que l'on ferme en un temps égal à $\frac{2 L}{n \Theta}$, le coup de bélier se transmet intégralement jusqu'à un point situé à une distance $\frac{L}{n}$ de la chambre de mise en charge. La figure 4 montre un exemple de transmission intégrale.

(*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 Cie du Midi.

AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES DIVERS SYSTÈMES DE TRANSFORMATION de courant alternatif à haute tension en courant continu

(SUITE)

CHAPITRE VIII

Mouvements pendulaires

Le moteur synchrone et la commutatrice ont une commune tendance aux mouvements pendulaires. Les commutatrices, à cause de leur faible réactance, y sont toutefois plus particulièrement exposées, surtout aux fréquences voisines de 50 périodes.

Le pompage a l'inconvénient, lorsqu'il est trop accentué, de compromettre gravement la stabilité de marche des deux machines ; mais il a de plus, en ce qui concerne la commutatrice, un autre effet particulièrement fâcheux. Par la variation qu'il fait subir au flux transversal qui va de l'induit aux pôles, en passant par les cornes polaires, il provoque un déplacement de la zone neutre d'où peuvent résulter des étincelles et parfois même des coups de feu.

Des quatre principales causes (1) capables de donner nais-

(1) La commutatrice est encore sujette à pomper pour deux autres causes qui lui sont particulières.

Si les enroulements des différentes phases de l'induit ne sont pas exactement égaux et ne sont pas placés sur l'armature dans des positions exactement semblables et symétriques les unes par rapport aux autres, la charge ne se répartit pas également sur les différentes phases et la machine a une tendance à balancer. Mais il s'agit là d'un vice qui ne se rencontre plus guère dans les commutatrices actuelles, les constructeurs faisant toujours en sorte, pour obtenir le parfait équilibre des phases, que le nombre de celles-ci divise exactement, non seulement le nombre de lames du collecteur par paire de pôles, mais aussi le nombre de rainures par double pas polaire.

D'autre part, la commutatrice produit du côté continu une tension pulsatoire (de fréquence sextuple de celle du courant d'alimentation pour les machines triphasées et hexaphasées), due à la superposition des chutes ohmiques relatives aux courants continu et alternatif. Quand le circuit d'utilisation est constitué par une batterie d'accumulateurs, la tension pulsatoire représentant une fraction notable de la tension résultante, produit pendant une période de l'armature, plusieurs alternances sensibles de la charge se traduisant par des impulsions positives et négatives qui peuvent occasionner des balancements. Cet effet, toutefois, n'a pas été observé dans les installations sur lesquelles nous avons été documentés