Dans le sillage de Maurice Gariel...

Maurice Gariel et l'étude des coups de bélier

Maurice Gariel and water hammer research

PAR G. REMENIERAS

CHEF DU SERVICE DES ÉTUDES HYDRAULIQUES D'ÉLECTRICITÉ DE FRANCE, PARIS-CHATOU

Les principales étapes de l'étude des coups de bélier jusqu'en 1914. Les travaux théoriques de C. Camichel, D. Eydoux, Maurice Gariel et du comte de Sparre. Les essais de contrôle au Laboratoire de l'Institut Electrotechnique de Toulouse et à l'usine de Soulom. La remarquable synthèse des travaux précédents établie par Maurice Gariel en vue de codifier les règles pratiques pour le calcul du coup de bélier maximal au distributeur et le long d'une conduite forcée alimentant une turbine. Le problème de la loi de fermeture optimale du distributeur en vue de réduire les coups de bélier. Les prolongements de l'œuvre de Maurice Gariel dans ce domaine.

The main steps in water hammer research prior to 1914. Theoretical work done by C. Camichel, D. Eydoux, Maurice Gariel and Comte de Sparre. Check tests carried out in the Laboratory of the Institut Electrotechnique de Toulouse and at the Soulom power station. Maurice Gariel's remarkable synthesis at previous work, the purpose of which was to enable practical rules to be codified for the calculation of maximum pressure surges at the guide vanes and along a penstock feeding a turbine. The problem of determining the optimum guide vane closing relationship in order to reduce water hammer. Extensions of Maurice Gariel's work in this field.

A. — LES PRINCIPALES ÉTAPES DE L'ÉTUDE DES COUPS DE BÉLIER

Afin de mieux situer, dans l'ensemble fort complexe des recherches sur ce sujet, la remarquable contribution de Maurice Gariel à l'étude des coups de bélier, je brosserai d'abord à grands traits les principales étapes qui avaient abouti aux connaissances acquises dans ce domaine vers la fin de la première guerre mondiale, au moment où le jeune Directeur des Ateliers Neyret-Beylier et Piccard-Pictet aborda ce sujet essentiel pour les constructeurs de turbines hydrauliques.

I) Les précurseurs :

Au déclin du XIX^e^ siècle, divers ingénieurs, aux prises avec les effets destructeurs des coups de bélier engendrés par les fermetures et ouvertures des vannes placées sur de longues conduites industrielles, ont tenté une analyse du phénomène dans l'hypothèse couramment admise dans la plupart des problèmes d'hydraulique, de l'incompressibilité de l'eau et de la rigidité absolue du tuyau (1). Le travail de ce genre le plus complet est peut-être celui qui figure dans le mémoire de Rateau intitulé « Théorie des coups de bélier et régularisation des turbines précédées d'une lon-

(1) Signalons toutefois que dès 1858 le général Menabrea analysa les relations qui existent entre l'énergie de force vive contenue dans une colonne liquide en mouvement et le travail de déformation élastique des parois et de la colonne liquide résultant de l'absorption de cette force vive.

gue conduite » paru en 1900 dans la *Revue de Mécanique.* Ces calculs de première approximation ne pouvaient rendre compte, ni de la valeur des surpressions réellement constatées, ni de leur répartition périodique à la fois dans le temps et dans l'espace; toutefois, Rateau examinant, par le calcul, l'influence d'un réservoir d'air placé au bas de la conduite en vue d'atténuer les coups de bélier, montre que cet artifice conduit à des « festonnements oscillatoires » autour de la valeur moyenne de la surpression.

Entre-temps, le caractère oscillatoire du coup de bélier était nettement mis en évidence par des expériences exécutées sur des conduites *sans réservoir d'air* comme celles de Le Praz et d'Ouchy : on fut alors tout naturellement amené à penser qu'au cours du phénomène, le tuyau ne restait pas rigide et l'eau ne pouvait plus être considérée comme incompressible.

Dans un mémoire paru en 1878, dans le *Bulletin de la Société Vaudoise des Ingénieurs et des Architectes,* un ingénieur suisse, M. Michaud, tient compte sommairement de ces circonstances en assimilant à celle d'un réservoir d'air de capacité convenable inséré en un point déterminé de la conduite, l'élasticité de la paroi de celle-ci et celle de l'eau : il aboutit ainsi à la célèbre formule qui porte son nom et sur laquelle nous reviendrons plus loin.

Mais la véritable nature du phénomène ne fut mise en évidence qu'en 1898 dans un mémoire publié en langue russe par Joukowski; indépendamment, Allievi, dans ses mémoires de 1903 et surtout de 1913, montra clairement que le coup de bélier est un phénomène de propagation d'ondes élastiques dans un fluide enfermé dans un tuyau dont *les parois ont une élasticité comparable ou supérieure à celle du fluide.* L'élasticité des parois et la compressibilité du liquide étant réparties tout le long de la conduite, la pression et la vitesse dans une section quelconque de celle-ci doivent dépendre en régime non permanent, non seulement du temps, mais aussi de l'abscisse de ladite section.

On peut remarquer avec E. Jouguet que cet aspect du problème avait attiré l'attention de certains physiciens. Des spécialistes de l'acoustique, tels que Savart en 1925, avaient expérimenté sur des tuyaux d'orgue rectangulaires, dont une des faces était constituée par une membrane élastique : en 1848, Wertheim (suivi plus tard par Kundt, Lehman et Dvorak) avait mesuré la vitesse du son dans des tuyaux remplis d'eau et l'avait trouvée plus faible que celle qui devait résulter de la compressibilité de l'eau (1 170 mètres au lieu de 1,450); Helmholtz avait attribué cette divergence à l'élasticité et au frottement de la paroi.

Le cas où *les parois du tuyau sont beaucoup plus élastiques que le fluide qu'il contient* avait été étudié à propos de recherches physiologiques sur les veines et les artères. Abordé sans succès par Euler dès 1775, le problème de la propagation d'un ébranlement dans un fluide incompressible enclos dans une paroi élastique fut résolu par Thomas Young en 1808 en se fondant sur une formule donnée par Newton pour calculer la vitesse de propagation d'un ébranlement dans un milieu élastique.

En 1878, Korteweg, synthétisant toutes ces recherches avait donné une formule générale de la vitesse de propagation applicable aux deux cas extrêmes visés plus haut; en 1898, Gromeka et Lamb analysaient plus rigoureusement le phénomène en considérant non seulement le mouvement du fluide mais aussi celui de la paroi.

II) La théorie du coup de bélier selon Allievi :

Lorenzo Allievi, ingénieur italien, publie en 1903 dans les *Annali della Società degli Ingegneri ed Architetti,* un travail intitulé « Teoria generale del moto perturbato dell'acqua nei tubi in pressione » et en donne une traduction française dès l'année suivante dans la *Revue de Mécanique.*

Allievi reprend le problème sans se soucier des chemins frayés par ses devanciers; sa présensation analytique, chef-d'œuvre d'élégance et de clarté et expression fidèle de la réalité physique, conduit à la création d'un arsenal mathématique original bien adapté aux phénomènes à étudier; Allievi utilise en virtuose l'instrument qu'il a ainsi forgé et dans une série de cinq notes publiées dès 1913 dans les *Atti del Collegio degli Ingegneri ed Architetti (Milano)* présente une « Théorie générale du coup de bélier (2) » qui sera, pendant de longues années, la base de toutes les recherches entreprises dans ce domaine.

Rappelons brièvement les grandes lignes de la théorie d'Allievi dans le cas particulièrement simple d'une conduite sous pression de section et d'épaisseur constantes (conduite dite à caractéristique unique).

La conduite a son origine en C dans un bassin supposé infiniment grand et à niveau constant (fig. 1). On peut modifier, à volonté, le régime de l'écoulement dans la conduite au moyen d'une vanne V placée son extrémité aval.

Lorsqu'on manœuvre la vanne, l'expérience montre que le passage d'un régime d'écoulement à un autre ne s'établit ni instantanément, ni

(2) C'est sous ce titre que Daniel Gaden a donné en 1921 une traduction française des cinq notes visées (Dunod, Paris).

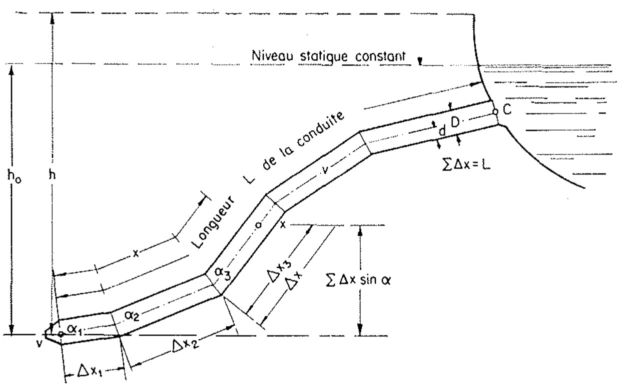

FIG. 1
Schémas de principe et rotations.

d'une manière continue. Entre deux états successifs de régime permanent, on enregistre de fortes oscillations de la pression et de la vitesse de l'eau qui constituent le phénomène du coup de bélier. L'étude théorique du problème revient donc à l'analyse des relations *liant* les pressions, les vitesses de l'eau et les déformations élastiques du système « eau-conduite ».

Moyennant quelques hypothèses simplificatrices, Allievi montre que les deux premières grandeurs ci-dessus sont données par les deux équations différentielles simultanées suivantes :

$$\text{I}\quad\begin{cases}\dfrac{\partial V}{\partial t}+g\dfrac{\partial h}{\partial x}=0 & \text{(équation dynamique)}\\[2ex] \dfrac{\partial V}{\partial x}+\dfrac{g}{a^2}\dfrac{\partial h}{dt}=0 & \text{(équation de continuité)}\end{cases}$$

Ce système se ramène, en éliminant successivement chaque inconnue par une dérivation, à l'équation dite de *d'Alembert* ou des « *cordes vibrantes* » et donne les solutions bien connues :

$$\text{II}\quad\begin{cases}h_{tx}=h_{ox}+F\left(t-\dfrac{x}{a}\right)+f\left(t+\dfrac{x}{a}\right)\\[2ex] V_{tx}=V_{ox}-\dfrac{g}{a}\ F\left(t-\dfrac{x}{a}\right)-f\left(t+\dfrac{x}{a}\right)\end{cases}$$

Dans ces formules :

- x : est l'abscisse du point considéré, mesurée à partir de l'extrémité aval de la conduite, c'est-à-dire en sens inverse de l'écoulement normal;
- h_{tx} : est la pression exprimée en hauteur d'eau à l'abscisse x et au temps t, compté à partir du commencement de la perturbation créant le coup de bélier;
- h_{ox} : la pression exprimée en hauteur d'eau à l'abscisse x et à l'instant $t=0$, c'est-à-dire en régime permanent;
- V_{tx} et V_{ox} : les vitesses dans la section d'abscisse x respectivement au temps t et à l'instant initial;
- a : est la célérité avec laquelle les ondes parcourent la conduite; la célérité est positive lorsqu'elle est dirigée en sens inverse de la vitesse V. Ce terme, qui tient compte des déformations élastiques de l'eau et de la paroi de la conduite, est donné pour une conduite de diamètre D, d'épaisseur e, constituée par un matériau dont le module d'élasticité est E, par l'expression .

$$\frac{1}{a^2}=\frac{\varpi}{g}\left(\frac{1}{\varepsilon}+\frac{D}{Ee}\right)$$

$1/\varepsilon$ est le coefficient de compressibilité de l'eau (1/200 par kg/mm²).

En remarquant que $h_{tx}-h_{ox}$ représente la surpression due au coup de bélier en un point d'abscisse x et à l'instant t, l'équation (1) montre que cette surpression est la somme de deux systèmes de pressions variables (fonction du temps t) coexistantes F et f qui se propagent le long de la conduite en sens inverse l'une de l'autre et avec la même vitesse « a »; en effet, selon que nous poserons $x=at+C^{te}$ ou $x=-at+C^{te}$, nous rendrons constante la fonction F ou la fonction f, ce qui caractérise bien un mouvement par ondes.

Les fonctions F (onde de coup de bélier *direct*) et f (onde de *contre-coup*) sont *a priori* inconnues : leur connaissance résoudrait complètement le problème du coup de bélier. En fait, on arrive à les éliminer des calculs dans les cas simples, par divers artifices (séries enchaînées d'Allievi, loi de proportionnalité des surpressions aux survitesses de M. Bergeron), *compte tenu des conditions aux limites*; il importe, néanmoins, pour bien saisir le mécanisme physique des phénomènes, de garder en mémoire leur existence et leur mode d'action tel qu'il résulte du schéma suivant : dès qu'il est en mouvement, le vannage placé au bas de la conduite émet vers l'amont une série d'ondes de pression élémentaires (onde F) :

$$dh=-\frac{a}{g}\ dv$$

qui se propagent à une vitesse « a » et viennent se réfléchir avec changement de signe sur le bassin (2 *bis*); l'onde réfléchie (onde f) revient vers l'aval et se réfléchit à nouveau sans change-

(2 *bis*) Suivant l'habitude, dh est ici mesurée « en hauteur d'eau », ce qui introduit l'accélération g dans son expression algébrique.

ment de signe sur l'obturateur alors partiellement ou totalement fermé... et ainsi de suite.

Le temps total en secondes que met une onde partie d'une extrémité de la conduite pour parcourir la longueur L de celle-ci, se réfléchir à l'autre extrémité et revenir à son point de départ, est donc un paramètre important que l'on appelle, depuis Allievi, : la « *durée de phase* » μ de la conduite :

$$\mu = \frac{2\,\mathrm{L}}{a}$$

a) INTRODUCTION DES « VALEURS RELATIVES » :

Allievi a montré la possibilité de généraliser les résultats obtenus à partir de la théorie ci-dessus en utilisant des « grandeurs sans dimensions » telles que les suivantes :

— pression relative en régime perturbé :

$$y = \frac{h_t}{h_0}$$

— surpression relative :

$$y - 1 = \frac{h_t - h_0}{h_0}$$

— caractéristique d'Allievi de la conduite :

$$\rho = \frac{a\mathrm{V}_0}{2\,gh_0}$$

(V_0 et h_0 sont les valeurs de la vitesse et de la pression à l'obturateur à l'instant 0).

b) EXEMPLE DU CALCUL DE LA VARIATION DE PRESSION A L'OBTURATEUR DANS LE CAS SIMPLE D'UNE FERMETURE LINÉAIRE COMPLÈTE :

Supposons que nous fermions l'obturateur de la conduite représentée par la figure 1 suivant une loi linéaire en une durée de τ secondes, soit dans un temps relatif :

$$\theta = \frac{\tau}{\mu}$$

Cherchons la loi de variation de la pression relative $y = f(t)$ *au droit de l'obturateur.* Le phénomène prend deux aspects nettement différents suivant que le temps de fermeture τ est inférieur ou supérieur à la durée de phase $\mu = 2\,\mathrm{L}/a$, ainsi que l'on peut s'en rendre compte en schématisant grossièrement comme suit le mécanisme physique du phénomène.

Si la fermeture se fait en un temps inférieur à μ — la fermeture est dans ce cas dite rapide — l'onde négative qui résulte de la réflexion avec changement de signe de l'onde directe sur le réservoir *n'a pas le temps d'atteindre l'obturateur avant que celui-ci soit fermé;* on aura donc :

$$\int_0^\tau dp = \frac{a}{g}\int_0^\tau dv$$

$$h - h_0 = \frac{a\mathrm{V}_0}{g}$$

soit, en utilisant les grandeurs relatives :

$$y - 1 = 2\,\rho.$$

C'est la valeur du « *coup direct* » qui représente la plus grande valeur que la surpression puisse prendre au cours d'une fermeture linéaire quelconque pour une vitesse initiale V_0 dans la conduite.

En effet, si, au contraire, la durée de fermeture de l'obturateur est supérieure à $2\,\mathrm{L}/a$ — la fermeture est alors dite *lente* — l'onde négative issue par réflexion du réservoir viendra, à partir de l'instant $2\,\mathrm{L}/a$ et pendant une durée à préciser, en déduction de l'onde de coup direct et au total la surpression observée sera inférieure à cette dernière. Nous allons maintenant rappeler l'allure générale de la courbe $y = f(t)$ dans ces deux cas :

1° FERMETURES RAPIDES :

$\tau < (2\,\mathrm{L}/a)$, c'est-à-dire $\theta < 1$.

La surpression atteint au temps τ son maximum égal à :

$$h - h_0 = \frac{av_0}{g}$$

soit en « grandeurs relatives » : $y = 1 + 2\,\rho$; elle se maintient à cette valeur jusquà la fin de la phase, c'est-à-dire jusqu'au temps $\mu = 2\,\mathrm{L}/a$. A cet instant, une brusque discontinuité se produit du fait de l'arrivée d'onde négative venant du réservoir et produit une dépression à peu près symétrique à la surpression. La courbe $y = f(t)$ présente l'allure indiquée par la figure 2.

Le calcul négligeant toutes les pertes d'énergie conduit à une oscillation d'amplitude constante et de durée indéfinie; mais, en fait, les pertes de charge et par hystérésis mécanique assureront son amortissement plus ou moins rapide.

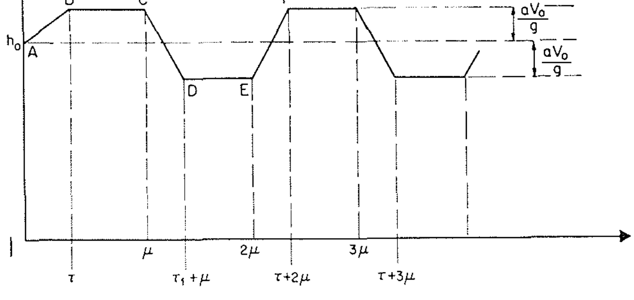

FIG. 2
Courbe $h = f(t)$ dans le cas d'une fermeture rapide ($\tau \leqslant \mu$).

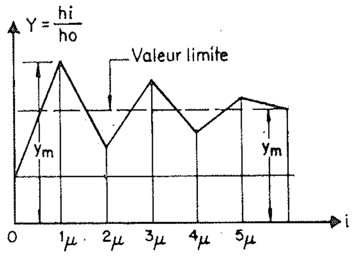

FIG. 3

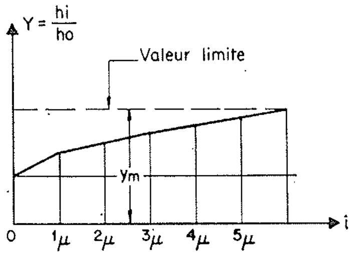

FIG. 4

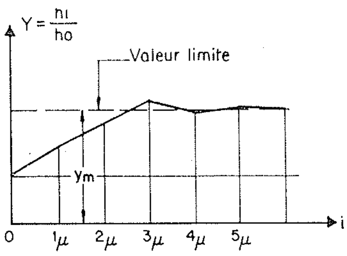

FIG. 5

Quelques types « d'ondes de tête » dans le cas d'une fermeture lente ($\tau > \mu$).
N.B. — La figure 3 correspond aux cas où $\rho < 1$ et $\theta > 3{,}5$; les figures 4 et 5 correspondent à $\rho > 1{,}1$.

2° FERMETURES LENTES :

$\tau > (2\,L/a)$, c'est-à-dire $\theta > 1$.

La méthode d'Allievi permet de calculer analytiquement, tout d'abord les pressions relatives $y_1, y_2 \ldots y_i$ aux instants μ, $2\mu \ldots i\mu$ dits « instants de rythmes entiers » et par divers artifices aux « instants de rythmes intercalaires ». On peut donc tracer par points la courbe $y = f(t)$.

En outre, Allievi a montré que les valeurs des surpressions $y_1, y_2 \ldots y_i$ *tendent toujours vers une limite* y_m soit par valeurs croissantes, soit par valeurs alternativement plus grandes ou plus petites que y_m; cette limite est donnée par l'équation :

$$y_m = \frac{\rho}{2\theta} + \sqrt{\left(\frac{\rho}{2\theta}\right)^2 + 1}$$

qui montre que y_m n'est fonction que du rapport ρ/θ.

Des études systématiques remarquables du même auteur ont permis de classer les courbes de pression $y = f(t)$ en un certain nombre de types « d'onde de tête » dont les figures 3, 4 et 5 représentent les plus importants en pratique.

On voit que le maximum de la pression y_M peut se produire soit à la fin de la première phase (fig. 3), soit pendant ou à la fin de l'une des phases suivantes (fig. 4 et 5).

Dans le cas correspondant à la figure 5 (basses chutes) et à la rigueur dans celui de la figure 4,

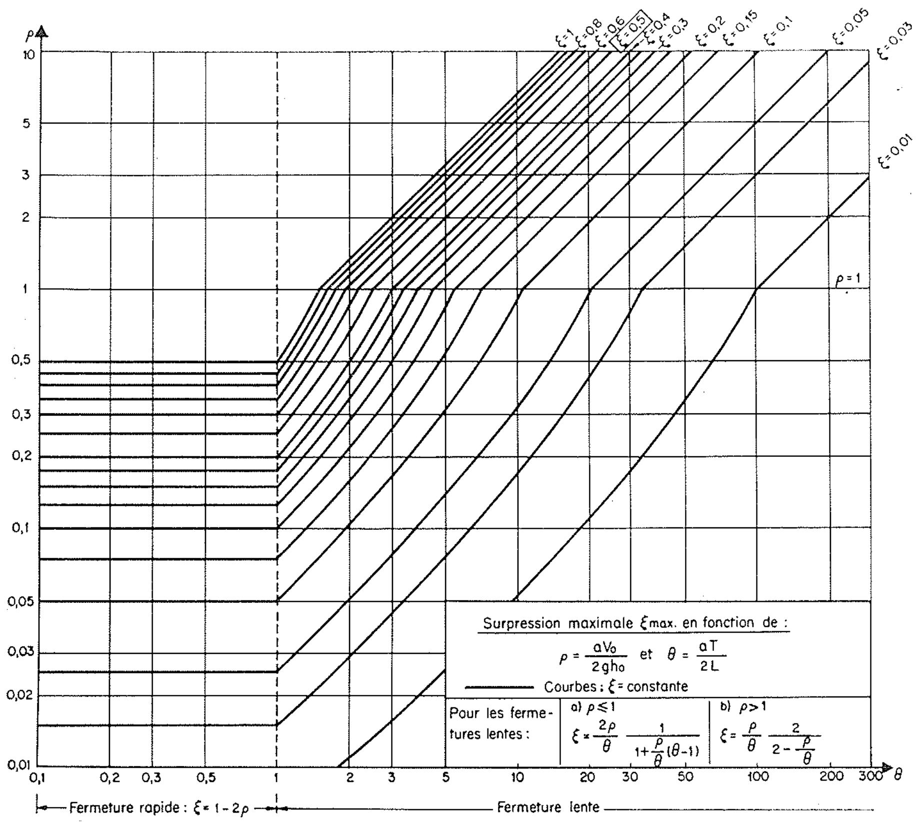

FIG. 6 Diagramme d'Allievi
modifié par l'application des formules approchées de M. DE SPARRE.

on peut admettre que le coup de bélier *limite* y_m est égal au coup de bélier maximal y_M pour lequel devra être prévue la résistance mécanique de la conduite; il n'en est plus de même dans le cas de la figure 3 (hautes chutes) où le coup de bélier *maximal* y_M est égal à la pression y_1 correspondant à la fin de la première phase, et doit être calculé séparément.

Comme tout le phénomène ne dépend en définitive que des grandeurs relatives ρ et θ, Allievi a pu construire toute une série d'abaques (synoptique cartésienne d'Allievi) donnant en fonction de ces deux seuls paramètres toutes les grandeurs intéressant l'ingénieur : valeur de y_m et de y_M, numéro d'ordre de la phase au cours de laquelle est atteinte la pression maximale y_M, etc. Malgré ce précieux outil, le calcul pratique du coup de bélier restait encore assez laborieux pour l'ingénieur non spécialisé dans ce domaine si particulier.

M. de Sparre a fait remarquer vers 1910 que si le coup de bélier est inférieur à la moitié de la charge (3), on peut simplifier notablement certains développements mathématiques d'Allievi; il a donné diverses formules explicites permettant, sans le secours d'aucun abaque, le calcul des coups de béliers maximaux dans les cas simples; nous reviendrons sur ces formules, très employées en France, à propos du diagramme de Gariel.

La figure 6 représente un abaque d'Allievi donnant en fonction de ρ et de θ le coup de bélier maximal au distributeur calculé suivant les formules de M. de Sparre (3 *bis*).

Il permet d'obtenir pour une installation donnée la valeur relative $y - 1 = \xi$ de la surpression *maximale* au distributeur résultant d'une fermeture complète de celui-ci à partir de tous les degrés d'ouverture possibles, chacun d'eux étant caractérisé par une valeur particulière des paramètres ρ (proportionnel au débit) et θ (proportionnel à la durée de la fermeture). Mais il n'indique pas directement :

1° quelle sera la fermeture la plus dangereuse,

2° la répartition du coup de bélier le long de la conduite.

B. — LA CONTRIBUTION DE MAURICE GARIEL A L'ÉTUDE DES COUPS DE BÉLIER

Dès sa publication, la théorie d'Allievi suscita un intérêt considérable parmi tous les ingénieurs intéressés au développement des aménagements hydroélectriques, alors à leur début. Les 8 août et 9 décembre 1904, sur l'initiative de la « Commission des Turbines » de la Chambre Syndicale des Forces Hydrauliques, des expériences systématiques étaient exécutées sur la conduite en fonte de 604 m de long et 0,12 à 0,20 m de diamètre, desservant la Mine d'Allevard, en vue de « rechercher dans quelles limites la solution de M. Allievi... pouvait concorder avec les faits ». Des essais analogues furent exécutés en Suisse en 1906 et 1909 sur la conduite de l'Ackersand par MM. Piccard et Pictet.

Mais de 1910 à 1920, le plus bel ensemble d'études théoriques et expérimentales sur le sujet est l'œuvre d'un groupe de savants français travaillant en liaison étroite avec la Société Hydrotechnique de France et composée de :

MM. :

C. CAMICHEL, Directeur de l'Institut Electrotechnique de Toulouse;

D. EYDOUX, Ingénieur des Ponts et Chaussées, Ingénieur principal à la Compagnie du Midi;

M. GARIEL, Directeur général des Ateliers Neyret-Beylier-Piccard-Pictet;

et M. le comte de SPARRE, Doyen de la Faculté catholique des Sciences de Lyon.

La collaboration entre MM. Camichel, Eydoux et Gariel fut particulièrement étroite, ainsi qu'en témoignent les nombreuses publications faites en commun et notamment l'important ouvrage intitulé : *Etude théorique et expérimentale des coups de bélier,* publié en 1918 sous les auspices de la Société Hydrotechnique de France et dédié au président de cette dernière, M. Augustin Blanchet. Ce document de 400 pages, illustré de 200 figures, relate en détail les essais, au nombre de plus de trois mille, effectués à l'Institut Electrotechnique de Toulouse et à l'Usine hydroélectrique de Soulom sur les coups de bélier, tant dans les conduites à caractéristique unique que dans celles à caractéristiques multiples; l'influence de la perte de charge, la répartition du coup de bélier le long de la conduite, l'effet de résonances éventuelles entre des manœuvres périodiques de l'obturateur et la période propre de la conduite y sont minutieusement contrôlés à la

(3) Pour $y - 1 = (h_t - h_0)/h_0 = 0{,}5$, l'erreur sur la valeur du coup de bélier maximal ne dépasse pas 2,5 % pour les fermetures et 4,3 % pour les ouvertures.

(3 *bis*) Pour fixer les idées, voici quelques valeurs approximatives de ρ et de θ :

	ρ	θ
1. Conduites forcées de l'usine de Génissiat..	3,5	2,8
2. Conduite forcée de l'usine du Portillon....	0,15	6,2

lumière des théories d'Allievi, des formules du comte de Sparre et des travaux originaux des auteurs.

Plutôt que de tenter un résumé, forcément infidèle parce que trop rapide, de cette œuvre collective si importante et si féconde, j'ai préféré exposer ci-après l'essentiel des trois mémoires suivants publiés en 1918 et en 1919 dans la *Revue Générale de l'Electricité,* sous le titre général :

Etude sur les maxima de surpression dans les phénomènes de coup de bélier

1. M. GARIEL : Coup de bélier de fermeture au distributeur;
2. M. GARIEL : Coup de bélier d'ouverture au distributeur;
3. C. CAMICHEL, D. EYDOUX et M. GARIEL : Transmission du coup de bélier le long de la conduite.

On ne manquera pas d'être frappé par le réaliste esprit de synthèse qui a permis à Maurice Gariel de codifier aussi simplement, dans ces trois mémoires, les règles pratiques pour le calcul du coup de bélier maximal au distributeur et le long de la conduite forcée alimentant une turbine. Ces règles ont été et continuent d'être — malgré la généralisation de la méthode graphique de M. Bergeron — un guide essentiel pour le projeteur d'usines hydroélectriques qui peut parfois avoir quelque peine à retrouver, dans le dédale des nombreux travaux publiés sur les coups de bélier, les données nécessaires et suffisantes pour le dimensionnement d'une installation déterminée.

I) Coups de bélier de fermeture au distributeur :

Après avoir rappelé que les très nombreuses expériences qu'il a exécutées en collaboration avec MM. Camichel et Eydoux ont montré un remarquable accord entre l'observation et les théories d'Allievi et du comte de Sparre, M. Gariel souligne :

« Mais ce qui importe essentiellement en pratique, ce n'est pas tant de pouvoir tracer *a priori* la courbe des variations de pression correspondant à une manœuvre donnée que de déterminer aussi simplement que possible le maximum de surpression résultant de cette manœuvre. Aussi, historiquement parlant, les formules donnant d'une façon plus ou moins approchée le maximum en question ont-elles précédé les théories générales. »

Dès 1878, Michaud avait donné pour le calcul du coup de bélier maximal ξ consécutif à une fermeture linéaire du vannage, dans une conduite à caractéristique unique de longueur L, la formule bien connue :

$$\xi_M = \frac{2\,LV_0}{gT}$$

V_0 est la vitese initiale de l'eau dans la conduite en m/s et

T le temps de fermeture du vannage en secondes.

L'expérience montra assez vite que la formule de Michaud donnait fréquemment des résultats trop forts et l'on tenta de la corriger en lui adjoignant un coefficient multiplicateur inférieur à 1; on observa, d'autre part, que la formule conduisant à un coup de bélier proportionnel à V_0/T (c'est-à-dire au débit coupé par unité de temps), le coup de bélier croîtrait indéfiniment lorsque le temps de fermeture tend vers zéro. Or, remarque M. Gariel :

« contrairement à ce que l'on aurait pu croire, dans la plupart des cas de la pratique, le coup de bélier le plus fort n'est pas celui qui se produit lorsque l'on ferme la turbine à partir de la *pleine ouverture,* mais bien celui qui se produit lorsqu'on ferme à partir d'une *ouverture partielle* qui peut être une fraction très faible de l'ouverture totale. »

Le développement systématique de cette observation conduit M. Gariel à réhabiliter l'ancienne formule de Michaud qui, bien qu'empirique dans son origine et inexacte dans une catégorie déterminée de cas, se rattache étroitement aux théories les plus modernes, les plus complètes et les mieux vérifiées.

Suivons Maurice Gariel dans les diverses étapes de ce « retour à la formule de Michaud », en étudiant sur une conduite donnée comment varie le coup de bélier maximal au droit du vannage, suivant que l'on ferme ce dernier « linéairement » à partir de l'ouverture complète ou à partir d'ouvertures partielles quelconques.

a) PREMIER CAS : LA DURÉE DE FERMETURE PARTIELLE CONSIDÉRÉE EST INFÉRIEURE A $2\,L/a$:

$$T < 2\,L/a$$

Les théories de Joukowski et d'Allievi assignent au coup de bélier correspondant à l'ouverture totale du distributeur la valeur suivante *indépendante de la durée de fermeture* T :

$$\xi_M = \frac{aV_0}{g} \quad \text{soit } y - 1 = 2\,\rho$$

Les débits (de régime permanent) au distributeur étant, par hypothèse, proportionnels aux courses du vannage, les vitesses v_0 correspondant à des ouvertures partielles de ce dernier seront proportionnelles à ces mêmes courses, donc $V_0/T = v_0/t = C^{te}$; par suite, si nous portons (fig. 7) en abscisses les ouvertures initiales a du distributeur (en mm par exemple) et en or-

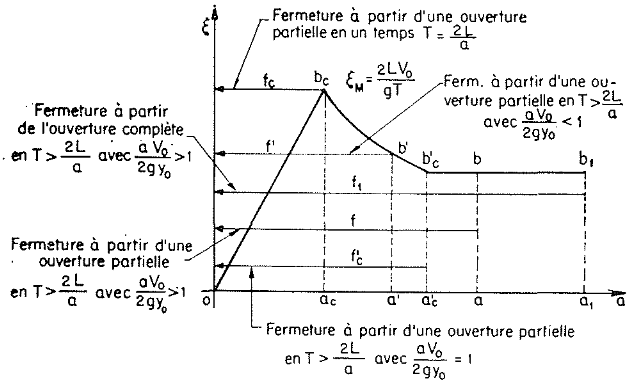

FIG. 7
Diagramme de Gariel.

données les coups de bélier ξ correspondant à une fermeture complète à partir de chacune de ces ouvertures, le graphique $\xi = f(a)$ sera une droite passant par l'origine. Donc :

Si le temps de fermeture totale du distributeur à partir de l'ouverture complète est inférieur ou au plus égal à $2\,L/a$:

1° *le coup de bélier maximal se produit lorsqu'on ferme à partir de l'ouverture complète;*

2° *lorsqu'on part d'ouvertures partielles, il décroît linéairement avec la valeur de l'ouverture dont on part.*

b) DEUXIÈME CAS : LA DURÉE DE FERMETURE PARTIELLE CONSIDÉRÉE EST SUPÉRIEURE A $2\,L/a$ ET $av_0/2\,gh_0$ EST INFÉRIEUR A 1 :

$$T > \frac{2\,L}{a} \quad \text{et} \quad \frac{av_0}{2\,gh_0} < 1$$

En pratique, dans les aménagements hydroélectriques, la durée T de fermeture à partir de l'ouverture totale est toujours supérieure à $2\,L/a$; de Sparre a montré que, dans ces conditions, si le coup de bélier est inférieur à la moitié de la pression statique (ce qui se trouve toujours réalisé dans les installations visées ci-dessus), sa valeur maximale pouvait être calculée par les formules suivantes :

1) Si : $\rho = \dfrac{av_0}{2\,gh_0} \leqslant 1$

(zone dite des hautes chutes)

le coup de bélier maximal est donné par la formule :

$$\xi_M = \frac{2\,Lv_0}{gT}\,\frac{1}{1 + (av_0/2\,gh_0)\,[1 - (2\,L/aT)]} \qquad (1)$$

qui s'écrit en utilisant les « grandeurs relatives » :

$$y_M - 1 = \frac{2\,\rho}{\theta}\,\frac{1}{1 + (\rho/\theta)\,(\theta - 1)} \qquad (1')$$

2) Si : $\rho = \dfrac{av_0}{2\,gh_0} > 1$

(zone dite des basses chutes)

on a :

$$\xi_M = \frac{2\,LV_0}{gT}\,\frac{1}{2\,[1 - (Lv_0/2\,gT\,h_0)]} \qquad (2)$$

soit, en « valeurs relatives » :

$$y_M - 1 = y_m - 1 = \frac{\rho}{\theta}\,\frac{2}{2 - (\rho/\theta)} \qquad (2')$$

Considérons tout d'abord le cas correspondant à la formule (1); le second terme de ladite formule étant visiblement plus petit que l'unité, il en résulte que le coup de bélier maximal est toujours inférieur à celui donné par la formule de Michaud : $2\,Lv_0/gT$.

Par un calcul simple, M. Gariel montre que dans le graphique de la figure 7, la fonction $\xi = f(a)$ donnant le coup de bélier correspondant à la fermeture complète à partir d'une ouverture partielle a est représentée par une portion d'hyperbole équilatère (4) limitée par :

— Le point d'abscisse a_c correspondant à une ouverture initiale telle que la fermeture se fait en un temps exactement égal à $2\,L/a$; dans ce cas, l'expression $\xi = av_0/g$ est exactement égale à $2\,LV_0/gT$, ainsi que nous le montrons plus loin;

— Le point d'abscisse a'_c tel que $av_0/2\,gh_0 = 1$ qui correspond à une durée de fermeture supérieure à $2\,L/a$ et à un coup de bélier plus faible, mais qui ne peut jamais être inférieur à LV_0/gT, soit à la moitié de celui donné par la formule de Michaud.

On voit qu'à partir d'ouvertures initiales supérieures à l'ouverture critique a_c, plus l'ouverture dont on part sera grande, plus le coup de bélier sera faible.

c) TROISIÈME CAS : LA DURÉE DE FERMETURE PARTIELLE CONSIDÉRÉE EST SUPÉRIEURE A $2\,L/a$ ET $av_0/2\,gh_0$ EST SUPÉRIEUR A L'UNITÉ :

$$T > \frac{2\,L}{a} \quad \text{et} \quad \frac{av_0}{2\,gh_0} > 1$$

(4) Cela résulte immédiatement de la formule (1') en remarquant que pour des manœuvres linéaires $\rho/\theta = C^{te}$.

Le coup de bélier ξ_M est alors donné par la formule (2) de l'alinéa *b*) précédent; on voit que les quantités v_0 et T n'y figurent que par leur rapport v_0/T. Or, la fermeture étant linéaire, ce rapport est constant (5) et par suite *le coup de bélier de fermeture est constant de quelque ouverture que l'on parte.* On montre que la valeur de ce coup de bélier, toujours inférieure à celle du coup de bélier de Michaud, est comprise entre les 5/8es et la moitié de cette valeur.

Dans le diagramme de la figure 7, la courbe représentant la variation du coup de bélier de fermeture complète en fonction de l'ouverture initiale est donc le segment de droite $b_1\,b'_c$ parallèle à l'axe des abscisses.

d) CONCLUSION : VALEUR MAXIMALE POSSIBLE DU COUP DE BÉLIER AU DISTRIBUTEUR DANS UNE INSTALLATION DÉTERMINÉE :

Considérons maintenant une installation dans laquelle, pour la fermeture totale, on ait :

$$T > \frac{2\,L}{a} \quad \text{et} \quad \frac{aV_0}{2\,gh_0} > 1$$

Le diagramme de la figure 7 donne les valeurs du coup de bélier engendré par toutes les fermetures complètes exécutées à partir d'ouvertures *initiales* comprises entre l'ouverture complète f_1 et 0. Compte tenu des résultats exposés dans les alinéas *a*), *b*), *c*) ci-dessus, ce diagramme — universellement connu sous le nom de diagramme de Gariel — met clairement en évidence que le coup de bélier maximal sera réalisé, non pour la fermeture à partir de l'ouverture complète a_1, mais pour celle exécutée à partir d'une ouverture partielle a_c correspondant à une durée de fermeture exactement égale à $2\,L/a$. Dans ce cas, nous avons vu que le coup de bélier a pour expression :

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

ou, en « valeurs relatives » (6) : $y - 1 = \rho$.

La fermeture étant supposée linéaire, les vitesses V_0 et v_0 afférentes respectivement à l'ouverture *totale* et à l'ouverture partielle ci-dessus sont dans le rapport T/t des temps de fermeture correspondants, soit :

$$\frac{v_0}{t} = \frac{V_0}{T} = C^{te} \text{ d'où : } v_0 = \frac{V_0 t}{T}$$

Or, ici :

$$t = \frac{2\,L}{a} \text{ ; donc : } v_0 = V_0 \cdot \frac{2\,L}{aT}$$

En portant cette dernière valeur dans la formule (3) ci-dessus, on obtient :

$$\xi_M = \frac{2\,Lv_0}{gT}$$

ce qui est exactement l'expression de la formule classique de Michaud.

Après ce « retour à la formule de Michaud » et quelques remarques sur le cas des conduites à épaisseur variable, M. Gariel conclut ainsi :

« Formule de Michaud $2\,Lv_0/gT$ pour l'immense majorité des installations de turbines hy-

(5) Si l'on utilise les grandeurs relatives, c'est le rapport ρ/θ qui demeure constant pour toutes les ouvertures partielles.

(6) Il résulte immédiatement de cette formule que si ρ_0 représente la caractéristique d'Allievi pour le débit de pleine ouverture, le coup de bélier maximal peut s'écrire : $y_M - 1 = 2\,\rho_0/\theta$, θ étant la durée relative de la fermeture totale à partir de la pleine ouverture.

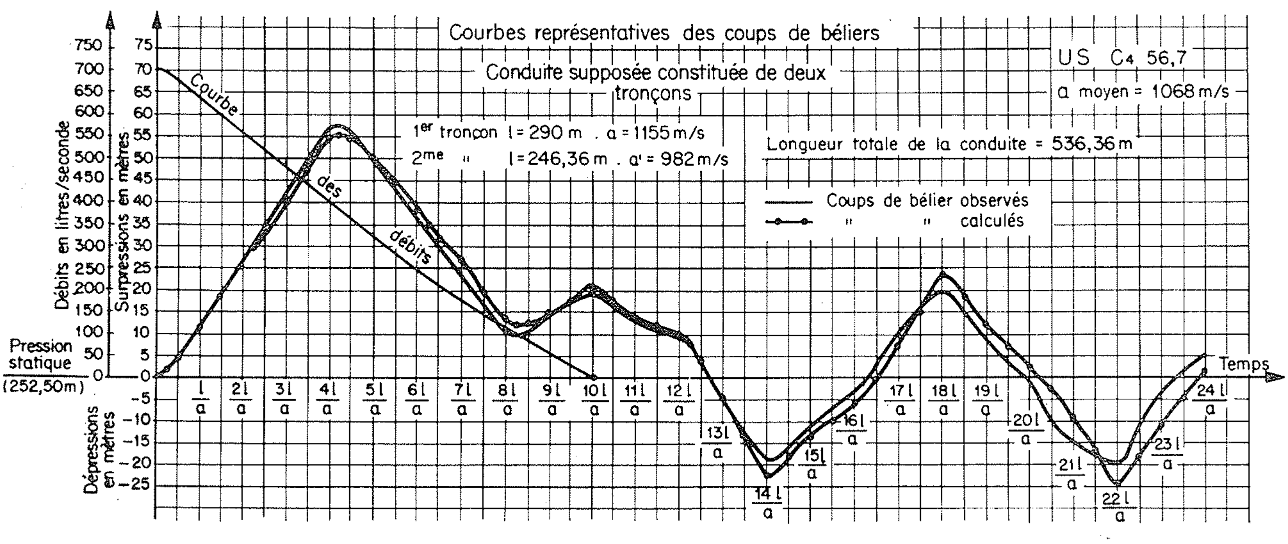

FIG. 8

Courbe $\xi(t)$ relevée au bas de la conduite forcée de Soulom, à la suite de la « coupure » d'un débit de 700 l/s en un temps $T = 10\,L/a$.

draauliques, formule de Joukowski-Allievi av_0/g pour les fermetures en un temps inférieur à $2\,L/a$ dans les conduites d'épaisseur constante, formule majorée de M. de Sparre $1{,}75\,(av_0/g)$ pour les fermetures extra-rapides dans les conduites d'épaisseur variable, telles sont les trois expressions extrêmement simples auxquelles se résolvent, pour les besoins de la pratique industrielle courante, les théories modernes des coups de bélier, en ce qui concerne les maxima de surpression consécutifs à des fermetures linéaires dans des conduites de diamètre constant. »

Le mémoire se termine par l'analyse de quelques courbes $\xi\,(t)$ relevées lors des célèbres expériences exécutées à l'usine de Soulom et montrant « que les théories générales de MM. Allievi et de Sparre peuvent s'appliquer avec très grande approximation aux conduites de diamètre constant et d'épaisseur variable (" a " devant, dans ce cas, être pris égal à la vitesse de propagation de l'onde dans les tronçons de diverses épaisseurs)... » La figure 8 qui reproduit l'un de ces diagrammes relatif à une fermeture complète en un temps $T = 10\,L/a$, soit $\theta = 5$, met en lumière la remarquable concordance entre les courbes observées et calculées.

REMARQUES :

1. L'exposé qui précède suppose non seulement qu'au cours de fermeture partielle, sous l'action du régulateur de vitesse de la turbine, le débit instantané Q_t (de régime permanent) est une fonction linéaire du temps :

$$Q_t = Q_0\,(1 - kt)$$

mais encore que la valeur de k dans l'expression ci-dessus reste la même quelle que soit l'ouverture initiale.

Il en est très sensiblement ainsi pour les vannages à fermeture lente des turbines « à double réglage » (pointeau de Pelton, clapet d'orifice compensateur, etc.); dans les autres turbines, le régulateur de vitesse impose au distributeur une loi de fermeture toujours linéaire mais comportant un coefficient k diminuant avec l'ouverture initiale; la variation de k avec ce degré d'ouverture dépend :

— du type de régulateur,

— de la survitesse atteinte lors de décharges partielles,

— du débit de marche à vide de la turbine, etc...

Dans ce cas, le coup de bélier maximal ne se produit plus pour la fermeture réalisée en un temps $2\,L/a$, mais pour celle correspondant à un degré d'ouverture plus important (7) (aux environs de la demi-ouverture pour ρ compris entre 0,5 et 2).

Si l'on accepte des lois de manœuvre non linéaires, on peut se poser le problème suivant :

Etant donné une durée totale de fermeture imposée et une valeur maximale admise pour le coup de bélier, quelle est la loi de fermeture à adopter pour satisfaire à ces deux conditions quelle que soit l'ouverture initiale?

Cette question, étudiée analytiquement par de Sparre, peut aussi être résolue par tâtonnements au moyen des abaques d'Allievi ou analogues : mais le diagramme de Gariel (fig. 7) permet d'aboutir très élégamment à la solution (voir chapitre XVIII de l'ouvrage *Turbines Hydrauliques* par A. Rateau, D. Eydoux et M. Gariel).

II) Coups de bélier d'ouverture au distributeur :

Ce mémoire, par un exposé en quelque sorte symétrique de celui que nous venons d'analyser brièvement, donne à partir des travaux de de Sparre des formules simples permettant de calculer, toujours dans le cas de conduites à caractéristique unique et de manœuvres « linéaires » du vannage :

1° le maximum de dépression correspondant à une ouverture donnée;

2° le maximum de surpression consécutif à une dépression donnée.

Avec le même souci de faciliter les calculs du projeteur, M. Gariel conclut en ce qui concerne le premier point :

« Dans toutes les installations hydrauliques comportant une conduite de diamètre constant et d'épaisseur constante ou variable alimentant une turbine commandée par un régulateur qui assure l'ouverture complète du vannage suivant une loi linéaire en un temps supérieur ou égal à $2\,L/a$, la dépression maximum qui puisse se produire à la sortie d'une ouverture et qui se produira certainement en cours d'exploitation est celle correspondant à l'ouverture en un temps $2\,L/a$ à partir de la fermeture complète. Si T est le temps total d'ouverture du régulateur et v_t la vitesse dans la conduite pour l'ouverture complète, cette dépression maximum est donnée par la formule :

$$\frac{2\,Lv_t}{gT} \times \frac{1}{1 + (av'/2\,gy_0)}$$

(7) Voir notamment : ARMANET, Du coup de bélier maximal au cours des manœuvres de fermeture d'une turbine hydraulique. *Inf. Tech. Charmilles*, n° 1, mai 1945.

où l'on fait figurer la vitesse finale, c'est-à-dire par la formule de Michaud multipliée par un facteur correctif dont la valeur se rapproche sensiblement de l'unité pour les hautes chutes, mais qui peut prendre une grande importance pour les basses chutes. La vitesse v' figurant dans le facteur correctif est la vitesse qui serait réalisée dans la conduite pour l'ouverture atteinte au bout du temps $2\,L/a$ s'il n'y avait pas de coup de bélier. »

Quant au deuxième problème, il est résolu avec le même réalisme et la même clarté :

« Si, à la suite d'une ouverture, il se produit une dépression de :

« 10 % 14 % 44,6 % 57 % 70 % 90 %

« la surpression maximum consécutive sera :

« 9 % 12 % 22,8 % 19,3 % 7,6 % — 6 % »

III) Transmission du coup de bélier le long de la conduite :

Ce mémoire, rédigé en collaboration avec C. Camichel et D. Eydoux, forme le troisième volet du triptyque sur le calcul pratique du coup de bélier dans les usines hydroélectriques. Il donne la solution du problème suivant :

« Etant donné une fermeture ou une ouverture de vannage s'effectuant suivant une loi linéaire au bas d'une conduite déterminée, et connaissant par les formules données dans les deux précédents mémoires le coup de bélier maximum au distributeur, comment déduire de celui-ci le coup de bélier maximum à craindre en un point quelconque de la conduite? »

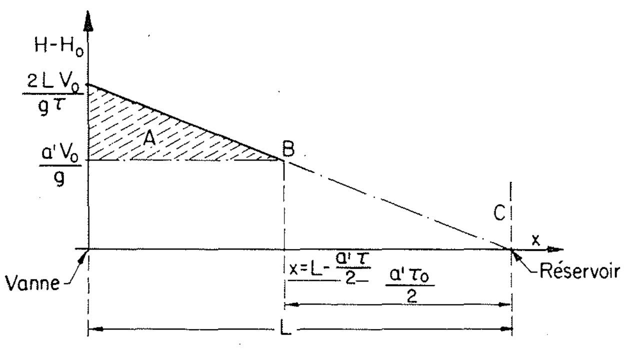

FIG. 9
Répartition linéaire du coup de bélier le long de la conduite ($T > 2\,L/a$).

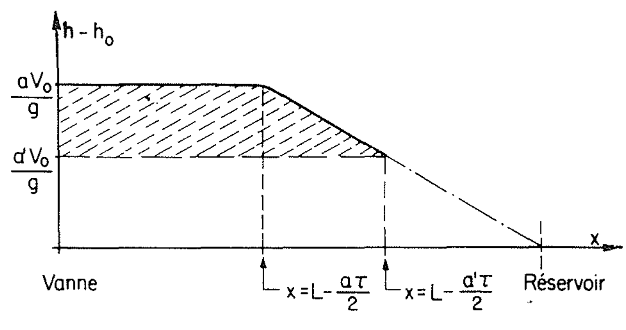

FIG. 10
Répartition mi-intégrale, mi-linéaire du coup de bélier le long de la conduite ($T < 2\,L/a$).

Des théories d'Allievi et des formules de de Sparre vérifiées d'une façon très satisfaisante par les essais de Toulouse et de Soulom, les auteurs tirent les conclusions simples suivantes applicables seulement dans les cas de manœuvres linéaires :

« 1° Transmission intégrale du coup de bélier tout le long de la conduite pour les fermetures extra-rapides, répartition linéaire des maxima pour les durées de fermeture supérieures à $2\,L/a$ (fig. 9), transmission mi-linéaire, mi-intégrale pour les fermetures non instantanées s'effectuant en un temps inférieur à $2\,L/a$ (fig. 10), tels sont les trois modes de répartition du coup de bélier pour des conduites d'épaisseur et de diamètre constants sans réservoir d'air ni cheminée d'équilibre.

« . . . .

« . . . .

« 2° *Dans l'immense majorité des installations de turbines, la répartition est linéaire. Si, par suite, on appelle* S_m *le coup de bélier maximum au distributeur,* L *la longueur de la conduite,* x *la distance du distributeur au point considéré, la surpression en ce point sera égale à :*

$$S_m \times \frac{L - x}{L}$$

L'étude se termine par des conclusions générales résultant des trois mémoires analysés plus haut et consistant essentiellement dans la codification des règles de calcul « valables dans l'immense majorité des cas ».

C. — LES PROLONGEMENTS DE L'ŒUVRE DE MAURICE GARIEL

Malgré les hautes fonctions, toujours plus nombreuses d'année en année, dont il assuma les lourdes charges, Maurice Gariel ne cessa jamais de s'intéresser à ce domaine des coups de bélier dont il fut l'un des pionniers éminents; plus de dix ans après la publication des mémoires que nous avons analysés, tous les calculs de ce genre élaborés par « Neyrpic » étaient minutieusement supervisés sinon entièrement exécutés par Maurice Gariel.

On devine avec quelle curiosité avertie il suivit les divers travaux qui n'ont cessé de perfectionner depuis lors cette branche de la technique :

— Méthode graphique de M. Bergeron qui a permis de résoudre élégamment les problèmes les plus complexes inabordables par les méthodes analytiques (8) (réseaux de conduites alimentés par des pompes, conduites comportant des bulles de cavitation ou des réservoirs d'air, etc.);

— Etudes et essais de MM. Favre, Haller, Evangelisti, Jaeger, etc. sur les conduites à caractéristiques variables le long de leur axe (en particulier conduites dites « coniques »);

— Travaux de M. Gaden, de M. Almeras et de leurs continuateurs sur l'influence du coup de bélier sur la régulation des turbines;

— Travaux de M. Escande et de ses collaborateurs, qui continuent au Laboratoire de Mécanique des Fluides de Toulouse, la tradition — instaurée par C. Camichel — des études sur les coups de bélier et les cheminées d'équilibre;

— Calcul du coup de bélier dans des cas spéciaux s'écartant par trop des hypothèses d'Allievi (conduites à parois très élastiques; cas où la vitesse de l'eau ne peut être négligée devant la célérité des ondes);

— Etude des dispositifs de protection contre les coups de bélier, etc.

Le nombre et l'ampleur de ces études sont le témoignage de l'essor ininterrompu de « l'hydraulique des coups de bélier » dont Maurice Gariel fut l'un des grands promoteurs; à ce seul titre, qui s'ajoute à bien d'autres peut-être plus prestigieux, sa mémoire restera toujours vivante dans l'esprit et dans le cœur des ingénieurs voués aux techniques de l'eau.

(8) Les calculateurs électroniques modernes permettraient sans doute de reculer les limites pratiques d'application des méthodes analytiques, mais la rentabilité de tels calculs reste à démontrer dans chaque cas particulier.

TRAVAUX DE M. GARIEL CONCERNANT LES COUPS DE BÉLIER

1. — CAMICHEL (C.), EYDOUX (D.) et GARIEL (M.) : Etude théorique et expérimentale des coups de bélier.
Publications de l'Institut Electrotechnique et de Mécanique appliquée de l'Université de Toulouse, 1918.

2. — CAMICHEL (C.), EYDOUX (D.) et GARIEL (M.) : Résumé des recherches théoriques et expérimentales sur les coups de bélier.
Société Hydrotechnique de France, bulletin spécial n° 3, 1919.

3. — GARIEL (M.) : Etude sur les maxima de surpression dans les phénomènes de coup de bélier.
a. Coup de bélier de fermeture au distributeur.
Revue Générale de l'Electricité du 21 septembre 1918, t. IV, pp. 403-411.
b. Coup de bélier d'ouverture au distributeur.
Revue Générale de l'Electricité du 5 octobre 1918, t. IV, p. 483.
En collaboration avec CAMICHEL (C.) et EYDOUX (D.):
c. Transmission du coup de bélier le long de la conduite.
Revue Générale de l'Electricité, 15 février 1919, t. V, pp. 213-252.

4. — CAMICHEL (C.), EYDOUX (D.) et GARIEL (M.) : Sur les coups de bélier.
Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences, t. 165, 2° semestre, 22 octobre 1917, pp. 548-553.

5. — CAMICHEL (C.), EYDOUX (D.) et GARIEL (M.) : Sur les coups de bélier; calcul des pressions en un point quelconque de la conduite.
Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences, t. 165, 5 novembre 1917, pp. 626-629.

6. — RATEAU (A.), EYDOUX (D.) et GARIEL (M.) : « Turbines hydrauliques », chap. XVIII : Coups de bélier d'onde.
Baillière, éditeur, Paris, 1926, pp. 457-530.