

L'ÉTUDE DES COUPS DE BÉLIER

DANS LES

CANALISATIONS MÉTALLIQUES SOUS PRESSION

RÉSULTATS OBTENUS PENDANT LA GUERRE

Dans les pages suivantes de ce numéro et de ceux de l'année en cours, nous allons mettre sous les yeux de nos lecteurs les plus remarquables des études faites et des résultats pratiques obtenus en cette voie scientifique qui mène à de si capitales conséquences dans l'économie de la meilleure utilisation de notre houille blanche.

Ces travaux qui élèvent un considérable édifice de faits documentaires sur les bases posées par les précurseurs ALLIEVI et RATEAU sont dus à un groupe de savants : MM. le COMTE DE SPARRE, C. CAMICHEL, D. EYDOUX et M. GARIEL.

Nous les présentons sous la forme des communications, brèves et concises, faites par leurs auteurs à l'ACADÉMIE DES SCIENCES. Préalablement nous donnons les deux notes par lesquelles d'une part M. le COMTE DE SPARRE et M. C. CAMICHEL d'autre part, exposent en résumé leurs travaux et l'état de la question, avec la Bibliographie des diverses publications scientifiques en lesquelles ces études ont fait l'objet de développements.

Pour mémoire, rappelons que les travaux antérieurs sur ce sujet par MM. DE SPARRE, ALLIEVI, RATEAU, JOKOUSKI, sont clairement résumés et parfaitement groupés, Tome II, pages 117 et s. du DEUXIÈME CONGRÈS DE LA HOUILLE BLANCHE (Lyon, 1914).

NOTE DE M. LE COMTE DE SPARRE

Doyen de la Faculté catholique des Sciences de Lyon
Correspondant de l'Institut

(PREMIÈRE PARTIE)

Je rappelle que la théorie du coup de bélier, dans le cas d'une conduite de diamètre et d'épaisseur constante, et en supposant que le coup de bélier ne dépasse pas notablement, en valeur absolue, la moitié de la pression statique, se déduit en entier des formules que j'ai données en 1905 dans la Houille Blanche, et qui sont reproduites dans le N° 1 du Bulletin spécial du Comité technique.

$$\xi_1(\tau) = 2\rho\gamma_0 \frac{\lambda_0 - \lambda_1(\tau)}{1 + \rho\lambda_1(\tau)}$$

$$\xi_n(\tau) = 2\rho\gamma_0 \frac{\lambda_{n-1}(\tau) - \lambda_n(\tau)}{1 + \rho\lambda_n(\tau)} - \frac{1 - \rho\lambda_{n-1}(\tau)}{1 + \rho\lambda_n(\tau)} \xi_{n-1}(\tau)$$

Dans ces formules, a désigne la vitesse de propagation calculée par la formule de M. Allievi et l'on suppose, l désignant la longueur de la conduite, que l'on considère une série de périodes de durée $\theta = \frac{2l}{a}$. Pour la n° période, on a alors pour le temps $t = (n - 1)\theta + \tau$ où $0 \leq \tau \leq \theta$, on désigne alors par $\xi_n(\tau)$ le coup de bélier et par $\lambda_n(\tau)$ la fraction de son ouverture totale dont le distributeur est ouvert. De plus, λ_0 désigne la valeur initiale de λ , l'eau étant à l'état de régime, et on a posé $\rho = \frac{av_1}{2gy_0}$, v_1 étant la vitesse de l'eau à l'état de régime, pour le distributeur complètement ouvert, γ_0 la pression statique et g la gravité. Ces formules permettent alors, quelle que soit la loi d'ouverture ou de fermeture, ou plus généralement quels que soient les mouvements successifs du distributeur, de calculer de proche en proche le coup de bélier à un instant quelconque.

En partant de ces formules, j'ai montré que si on suppose une loi de fermeture linéaire telle que l'on ait : $\lambda_{n-1}(\tau) - \lambda_n(\tau) = b\theta$, b désignant une constante, le coup de bélier maximum ξ_m est donné si $\rho\lambda_0 < 1$ par la formule

$$(1) \quad \xi_m = 2\rho\gamma_0 \frac{b\theta}{1 + \rho(\lambda_0 - b\theta)}$$

et au lieu de cela si $\rho\lambda_0 > 1$ par la formule

$$(2) \quad \xi_m = 2\rho\gamma_0 \frac{b\theta}{2 - \rho b\theta}$$

On conclut de la formule (1) que, pour $\rho\lambda_0 < 1$, ξ_m aura la plus grande valeur possible pour une valeur donnée de $b\theta$, si $\lambda_0 = b\theta$, car la formule suppose $\lambda_0 \geq b\theta$. ξ_m aura donc sa plus grande valeur si l'ouverture initiale est telle que la fermeture totale se fasse dans le temps θ . Si on désigne alors par T le temps de la fermeture totale pour le distributeur

complètement ouvert, de telle sorte que l'on ait $b = \frac{1}{T}$, on aura pour la valeur maxima de ξ_m , $2\rho\gamma_0 b\theta = \frac{2lv_1}{Tg}$, ce qui est la formule de Michaud.

Si $\rho\lambda_0 > 1$ (1), le coup de bélier reste constant si on fait décroître λ_0 , tant que l'on a $\lambda_0 > \frac{1}{\rho}$ et pour $\lambda_0 < \frac{1}{\rho}$ on rentre dans le cas précédent. On voit donc que, pour une valeur constante de $b\theta$, c'est-à-dire pour une loi de fermeture linéaire, la valeur maxima du coup de bélier est toujours

$$\frac{2lv_1}{Tg}$$

J'ai montré que l'on pourrait considérablement accélérer la vitesse fermeture, sans augmenter le coup de bélier maximum, en admettant une loi de fermeture non linéaire que j'ai donnée (2) dans la *Revue Générale de l'Electricité*.

Ce qui précède suppose la conduite de diamètre constant et l'épaisseur de ses parois également constante. Or, pour les conduites industrielles, on est amené à donner une épaisseur des parois qui augmente avec la pression qu'elles ont à supporter. De plus, pour les hautes chutes, on est souvent conduit à les composer de deux et parfois, quoique plus rarement, de trois tronçons de diamètre différent ; on peut, en effet, avec une moindre augmentation de prix, augmenter le diamètre, et par là, diminuer la perte de charge dans les parties qui supportent une plus faible pression. Avec cette disposition, il se produit une réflexion partielle de l'ongle au changement de diamètre, ce qui modifie complètement le calcul du coup de bélier.

Le même fait se produit, quoique à un degré moindre, toutes les fois que l'épaisseur des parois de la conduite varie, cette variation amenant un changement dans la vitesse de propagation de l'onde.

Lorsqu'il s'agit de fermetures peu rapides, on peut obtenir pour les conduites de diamètre variable, une approximation en général suffisante en appliquant la méthode que j'ai indiquée dans mon rapport au deuxième Congrès de la Houille Blanche (3), à propos des expériences de l'Ackersand. Méthode qui consiste, pour le calcul du coup de bélier, à substituer à la conduite donnée une conduite fictive ayant même débit et de diamètre tel que la force vive de l'eau soit la même pour la conduite fictive ainsi obtenue et pour la conduite donnée. Il est certain, toutefois, que si on peut ainsi obtenir une première approximation suffisante, dans le cas de fermetures suffisamment lentes et pour une étude préli-

(1) On voit que dans ce cas pour $\lambda_0 \xi_m$ ne dépasse pas $\frac{2\gamma_0}{5}$ il faut que l'on ait $b\theta \leq \frac{2}{5}$.

(2) *Revue Générale de l'Electricité*, 31 mars 1917

(3) *Deuxième Congrès de la Houille Blanche*, t. II, p. 176 et suivantes.

minaire, ce procédé donnera des résultats inexacts s'il s'agit d'une fermeture rapide (1) et, de plus, pour une étude définitive, il sera toujours préférable de recourir à une méthode exacte. J'ai résolu ce problème pour une conduite formée de deux tronçons de diamètres différents dans deux communications à l'Académie des Sciences, du 26 décembre 1916 et du 8 janvier 1917. J'ai ensuite résolu le même problème pour une conduite formée de trois tronçons de diamètre différent, mais pour lesquels la durée de propagation est la même, dans une communication du 3 avril 1917.

Comme je le dis plus haut, les conduites de diamètre constant, mais dont l'épaisseur des parois est variable, posent un problème tout à fait semblable à celui des conduites de diamètre variable ; mais dans leurs très intéressantes expériences de Soulom, MM. Camichel, Eydoux et Gariel ont montré que, par l'application des formules que j'ai données pour une conduite formée de trois tronçons pour lesquels la durée de propagation est la même, on arrive à rendre compte des phénomènes d'une façon absolument complète et à une concordance entre l'expérience et les calculs tout à fait rigoureuse.

Pour ces conduites de diamètre constant, mais d'épaisseur variable, j'ai étudié complètement la question dans deux communications des 22 octobre 1917 et 28 janvier 1918 à l'Académie des Sciences. J'ai montré que, s'il s'agissait d'une fermeture en un temps supérieur à celui d'une oscillation complète de l'eau, et si l'on n'a en vue que le calcul du coup de bélier maximum, on peut remplacer la vitesse de propagation par sa valeur moyenne et appliquer la formule relative à une conduite d'épaisseur constante. Il n'en est, toutefois, plus de même, s'il s'agit d'une fermeture en un temps suffisamment court : dans ce cas, le coup de bélier maximum peut être de 75 % supérieur à ce qu'il aurait été si l'épaisseur avait été constante et égale à sa valeur moyenne.

On doit remarquer, d'ailleurs, que si, dans le cas d'une fermeture en un temps supérieur à celui d'une oscillation complète de l'eau, on peut remplacer, pour le calcul du coup de bélier maximum, la vitesse de propagation par sa valeur moyenne, il est au lieu de cela, même dans ce cas, nécessaire, si on veut étudier le phénomène dans son ensemble, de tenir compte de la variation de l'épaisseur des parois, ce qu'il est facile de faire par l'emploi des formules que j'ai données. Il se produit, en effet, par suite de la variation de l'épaisseur des parois, un décalage qui fait que la période d'oscillation apparente n'est pas égale à la période théorique : c'est là une observation importante due à M. Camichel, et qui a fourni l'explication d'un phénomène qui avait fait croire à certains observateurs, que la période d'oscillation dépendait de la pression.

On doit remarquer que, dans les expériences d'Allevard, exécutées sous la direction du regretté M. Pinat, et dont M. Rateau a rendu compte dans son rapport au second Congrès de la Houille Blanche, la conduite était d'épaisseur constante, et cela a été une circonstance très favorable pour la netteté des résultats, sans cela, comme elles portaient sur des fermetures brusques, on se serait trouvé en présence du phénomène signalé dans ma communication du 22 octobre 1917 et qui aurait pu nuire beaucoup aux conclusions (2).

Les différents résultats donnés dans mes communications indiquées plus haut ont été réunies et complétées dans un mémoire publié par le Comité technique de la Société hydro-technique, qui forme le numéro 2 de son bulletin spécial, et où on trouve de plus la solution du cas d'une conduite formée de trois tronçons dont le rapport est quelconque (1).

NOTE DE M. CAMICHEL

Professeur à la Faculté des Sciences
Directeur de l'Institut Electrotechnique de Toulouse

EXPOSÉ ANALYTIQUE DES RECHERCHES SUR LES COUPS DE BÉLIER

de MM. CAMICHEL, EYDOUX et GARIEL

(DEUXIÈME PARTIE)

On trouvera ce résumé dans les deux notes présentées à l'Académie des Sciences, par MM. CAMICHEL, EYDOUX et GARIEL, le 22 octobre 1917 et le 5 novembre 1917, et dans deux articles du 31 octobre et du 15 novembre 1917 de la *Revue Générale des Sciences*.

Les points les plus importants de leurs travaux sont les suivants :

I. — La méthode de la dépression brusque imaginée et étudiée par l'un d'eux, lui a permis de résoudre la question fondamentale de la détermination de la vitesse a de d'un bout à l'autre et d'élucider la question si controversée de la variation apparente de la vitesse avec la pression. Cette méthode a été constamment utilisée dans leurs recherches et leur a permis de mettre en évidence dans les conduites à caractéristiques multiples, deux périodes, l'une $4 \sum \frac{l_i}{a_i}$ qu'ils ont appelée période théorique, (l_i désignant la longueur d'un tronçon et a_i la vitesse correspondante) et l'autre la période apparente résultant du jeu des réflexions partielles qui se produisent aux points de jonction des divers tronçons.

II. — Ils ont, pendant plusieurs années, fait des expériences de laboratoire sur une chute artificielle de 17^m3 et d'une puissance de 4 chevaux à l'Institut électrotechnique de Toulouse et de grandes expériences industrielles à l'usine de Soulom d'une puissance totale de 21.000 chevaux répartie en deux chutes distinctes : gave de Pau et gave de Cauterets, ayant respectivement 120 mètres et 250 mètres de hauteur. Dans cette série de recherches qui a nécessité plus de trois mille expériences distinctes, ils ont vérifié complètement les méthodes de calcul dues à MM. JUKOWSKI, ALLIEVI et de SPARRE, et les formules si remarquables de M. DE SPARRE, qui permettent de déterminer les pressions produites dans les conduites à caractéristique unique et à

(1) A consulter pour les travaux de M. LE COMTE DE SPARRE en outre de sa communication au *Deuxième Congrès de la Houille Blanche* : « Note sur les conditions à remplir au point de vue des coups de bélier par les régulateurs des moteurs hydrauliques : *Revue Générale de l'Electricité* N° du 31 mars 1917, tome I, pages 483-489. »
« Remarque au sujet des conditions à remplir par certains dispositifs destinés à atténuer les coups de bélier dans les conduites forcées ». *Revue Générale de l'Electricité*, 9 et 16 Novembre 1918, t. IV, p. 685-689 et 731-740.

(1) Par exemple pour la conduite du lac de Fullv *Deuxième Congrès de la Houille Blanche*, t. III p. 153, le coup de bélier maximum pour une fermeture en 4^s est de 153^m et par la méthode indiquée on trouvera seulement 104^m.

(2) On doit remarquer cependant qu'il y avait à côté de cela une cause de perturbation due à la variation, sur une faible longueur il est vrai, du diamètre de la partie supérieure de la conduite M. RATEAU a donné dans son rapport les diagrammes que j'avais calculé pour tenir compte de cet effet.

caractéristiques multiples, par des fermetures ou des ouvertures, lentes ou rapides, et d'étudier les répartitions de ces pressions le long des conduites.

Ils ont été amenés à mettre en évidence trois cas remarquables de répartition des pressions :

1° La transmission intégrale qui a lieu dans une conduite à caractéristique constante entièrement purgée dans le cas de fermeture très rapide ; 2° La répartition linéaire qui se produit dans les conduites purgées, dans les conditions qu'a indiquées M. DE SPARRE et qui se produit également dans les conduites munies à leur extrémité aval d'un réservoir d'air ; et 3° la répartition sinusoïdale qui se produit au bout d'un certain temps, dans les conduites entièrement purgées, et qui provient de la déformation des ondes, a été mise en évidence par l'un d'eux.

III. — Les phénomènes de résonance présentent le plus grand intérêt. L'un des auteurs a imaginé un procédé d'analyse harmonique des conduites (robinet tournant), qui lui a permis d'étudier dans les conduites à caractéristique unique et à caractéristiques variables, la résonance du fondamental et de ses divers harmoniques, il a établi théoriquement et vérifié par l'expérience que pour les harmoniques impairs la résonance double la pression et rend le débit minimum.

La méthode du robinet tournant a été appliquée par les auteurs aux conduites industrielles à caractéristiques variables où ils ont mis également en évidence la résonance de la période apparente et celle des harmoniques impairs de la période $4 \sum \frac{L_i}{a_i}$. La résonance de la période apparente est particulièrement dangereuse : dans l'une de leurs expériences, ils ont pu, au moyen d'un robinet ayant une lumière de 10 centimètres carrés environ, produire, dans une conduite de 1^m20 de diamètre alimentant une turbine de 3.500 chevaux, des surpressions égales à trente pour cent de la pression statique.

IV. — L'influence de la perte de charge dans les coups de bélier n'avait jamais été abordée, les auteurs ont montré que, dans les conduites industrielles de longueur moyenne et pour les durées de fermeture ordinairement réalisées, les formules de MM. ALLIÉVI et de SPARRE s'appliquaient à condition de prendre comme pression initiale, la pression statique diminuée de la perte de charge.

V. — Les oscillations en masse ont donné lieu à des études de M. EXPoux, relatives aux cheminées d'équilibre, pour lesquelles il a donné un ensemble de formules applicables dans la pratique, il s'est également occupé des accumulateurs hydrauliques, conduites d'eau sous pression, pare chocs, etc., utilisés dans les usines métallurgiques, et il a donné une théorie de ces appareils. M. CAMICHEL a étudié les oscillations en masse qui prennent naissance dans les conduites munies d'un réservoir d'air, il a étendu les résultats trouvés par M. Rateau, dans son mémoire classique (*Revue Générale de Mécanique*, 1900), au cas de n poche d'air ; il a donné également un mode de calcul des grands coups de bélier provenant d'oscillations en masse.

VI. — M. Gariel s'est particulièrement attaché à l'étude des maxima de surpression qui se produisent, dans une conduite forcée, sous l'influence du fonctionnement du régulateur de la turbine alimentée ; il a donné des règles simples permettant de résoudre cette question sans avoir recours aux formules théoriques qui exigent des calculs compliqués.

L'ÉCONOMIE DE LA HOUILLE NOIRE

DANS

LA FABRICATION DES ÉLECTRODES

I. — LES PROCÉDÉS ACTUELS

Les conditions dans lesquelles se trouve actuellement notre Industrie nous font une impérieuse obligation d'économiser les combustibles. L'un des meilleurs moyens d'y arriver est de multiplier les procédés électrothermiques et électrochimiques. On réalisera, de ce fait, au profit de la Nation, une économie de charbon, d'argent, de main-d'œuvre, de transports et de temps : économie de houille, qui ne sera point brûlée dans l'usine ; économie d'argent, car les procédés électriques transportent l'énergie thermique à meilleur compte que les chemins de fer ; économie sur les frais d'extraction de la houille, par réduction de la main-d'œuvre pour extraire cette houille et pour la transporter ; économie de main-d'œuvre aussi pour le convoyeur ; et de tout cela, économie résultante de temps pour l'usine de fabrication.

**

A la base des Industries électrométallurgiques et électrochimiques, il y a la fabrication des Electrodes. Cette industrie a fait, en ces derniers temps, de notables progrès, grâce à l'application de procédés nouveaux, *entièrement électriques*.

Pour que le lecteur puisse nous suivre, et comprendre les avantages des nouveaux procédés, nous allons donner dans la première partie de cette étude, un résumé de la fabrication des électrodes par les méthodes actuelles ; la seconde partie exposera le principe de la méthode électrique.

Le procédé actuellement employé pour préparer les électrodes est dérivé de celui qui a été autrefois imaginé par CARRÉ.

L'opération se fait en quatre phases : 1° Préparation des matières premières ; 2° Agglomération de la pâte ; 3° Pression et Moulage ; 4° Cuisson des pièces.

I. — LA PRÉPARATION DES MATIÈRES PREMIÈRES

Les matières premières employées sont : en première ligne la houille, l'antracite, le charbon de cornues, le coke de pétrole, auxquels il faut ajouter, mais seulement, comme accessoires, le graphite naturel, le graphite artificiel et le noir de fumée.

Les charbons arrivent ordinairement à l'usine en blocs assez gros. La première opération à leur faire subir est le broyage, de façon à les amener en morceaux de la grosseur de noisettes. On emploie, dans ce but, des concasseurs formés essentiellement de quatre cylindres accouplés deux à deux et garnis d'étoiles en acier moulé, entre lesquels passe le charbon. Des coussinets, à déplacement réglable, permettent de varier l'écartement des cylindres et, par conséquent, la grosseur des produits du concassage.

Les charbons concassés sont amenés dans des appareils laveurs où les cailloux, schistes, pyrites et autres impuretés sont enlevés par un courant d'eau. Les charbons lavés sont séchés à l'air libre et envoyés au *dégazage*.

LE DÉGAZAGE ou *Cokification* enlève aux charbons leurs matières volatiles. Il s'opère dans des cornues réfractaires placées verticalement dans un four chauffé par un gazogène. Ce n'est autre opération qu'une distillation pyrogénée, effectuée à peu près comme s'il s'agissait de fabriquer du gaz d'éclairage. A la sortie des cornues de dégazage, les charbons sont jetés dans des étouffoirs montés sur wagon-