Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande

Band: 59 (1933)

Heft: 22

Artikel: L'étude de l'influence du coup de bélier sur le réglage des turbines hydrauliques par la méthode d'Allievi

Autor: Oguey, P.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-45681

59e année 28 octobre 1933 N° 22

BULLETIN TECHNIQUE
DE LA SUISSE ROMANDE

Rédaction : H. DEMIERRE et J. PEITREQUIN, ingénieurs.

Paraissant tous les 15 jours

ORGANE DE PUBLICATION DE LA COMMISSION CENTRALE POUR LA NAVIGATION DU RHIN

ORGANE EN LANGUE FRANÇAISE DE LA SOCIÉTÉ SUISSE DES INGÉNIEURS ET DES ARCHITECTES

L'étude de l'influence du coup de bélier
sur le réglage des turbines hydrauliques par la méthode d'Allievi,

par M. P. OGUEY,
professeur à l'Ecole d'ingénieurs de l'Université de Lausanne.

Le réglage automatique des groupes hydroélectriques alimentés par une conduite sous pression est souvent influencé, parfois même considérablement gêné, par les phénomènes de coup de bélier.

Le régulateur, dont la mission est de maintenir la vitesse de rotation aussi constante que possible, agit sur le vannage de la turbine de manière à toujours proportionner la puissance hydraulique fournie par l'installation à la puissance demandée par la génératrice électrique. Lors d'une décharge, par exemple, le déséquilibre des couples moteur et résistant donne lieu à une accélération angulaire que le régulateur cherche à corriger en fermant l'obturateur. Mais cette fermeture provoque une surpression qui, tout en restant dans des limites admissibles au point de vue des efforts exercés sur les divers organes, peut compenser, et au delà, l'effet de la diminution de section de l'orifice d'écoulement. Autrement dit, la puissance de l'eau sortant de la conduite peut augmenter au lieu de diminuer.

Inversement, en cas de charge, le groupe tend à ralentir, le régulateur ouvre, mais la chute de pression peut produire une diminution de la puissance de la veine liquide. *La puissance livrée à la turbine varie donc en sens contraire de la puissance demandée*, le mouvement du régulateur accentue le déséquilibre des couples au lieu de l'atténuer et ce n'est qu'ensuite, après un temps fonction de la longueur de la conduite, que ce phénomène d'inversion disparaît et qu'un réglage effectif devient possible.

Reprenant ce problème dont il avait déjà, en 1904, signalé l'importance, M. *Allievi* a publié récemment une pénétrante étude qu'il nous a paru intéressant de mettre à la portée du public français [1]. Nous donnons ci-dessous un exposé succinct de ce travail, avec un résumé de ses conclusions.

[1] Voir *Revue générale de l'électricité*, Paris, 1er juillet 1933.

M. Allievi prend naturellement comme base ses travaux antérieurs et, par la généralité, en même temps que la simplicité, de ses calculs, donne une preuve nouvelle de la fécondité de sa méthode.

Le coup de bélier.

Dans une conduite d'épaisseur et de diamètre constants, alimentée par un réservoir de très grande section à niveau constant, et munie à son extrémité inférieure d'un obturateur à orifice d'écoulement variable, les phénomènes provoqués par une manœuvre quelconque de cet obturateur sont régis [1] par le système d'équations :

$$\left.\begin{aligned} \zeta_1^2 - 1 &= 2\rho(1 - \eta_1\zeta_1) \\ \zeta_1^2 + \zeta_2^2 - 2 &= 2\rho(\eta_1\zeta_1 - \eta_2\zeta_2) \\ \zeta_2^2 + \zeta_3^2 - 2 &= 2\rho(\eta_2\zeta_2 - \eta_3\zeta_3) \\ \dots\dots &\dots\dots \end{aligned}\right\} \quad (\mathrm{I})$$

qui peut être considéré comme résultant de l'application répétée de l'équation générale

$$\zeta_{i-1}^2 + \zeta_i^2 - 2 = 2\rho(\eta_{i-1}\zeta_{i-1} - \eta_i\zeta_i) \qquad (\mathrm{II})$$

Le coup de bélier est un phénomène rythmique. Les indices 1, 2, ... $i-1$, i, désignent les *phases* successives, ou *rythmes*, de durée $\mu = 2L : a$ comptées à partir du début de la manœuvre (L étant la longueur de la conduite et a la vitesse de propagation des variations de pression) et l'indice zéro désigne les valeurs correspondant au régime permanent initial.

Les équations ci-dessus ont été établies en considérant la perte de charge totale et la hauteur représentative de la vitesse de l'eau dans la conduite comme négligeables vis-à-vis de la charge statique y_0 à l'obturateur, ce qui revient à admettre que la vitesse théorique de sortie u_i dépend uniquement de la pression Y_i donc à poser $u_0 = \sqrt{2gy_0}$ en régime initial et $u_i = \sqrt{2gY_i}$ en régime troublé.

Appelons « degré d'ouverture » le rapport de l'aire

[1] *Théorie du coup de bélier*, par L. Allievi, traduction D. Gaden. Dunod, Paris 1921.

variable de l'orifice d'écoulement à la section constante de la conduite, ou mieux le rapport de la vitesse $V = Q : s$ de l'eau dans la conduite à la vitesse théorique d'écoulement u, soit $\psi = V : u$.

Le symbole η_i désigne alors le *degré d'ouverture relatif*, rapport de ψ_i à un instant quelconque de la $i^{ème}$ phase à sa valeur initiale prise comme unité : $\eta_i = \psi_i : \psi_0$.

Le symbole ζ_i désigne la *valeur relative de la vitesse d'écoulement :* $\zeta_i = u_i : u_0 = \sqrt{Y_i} : \sqrt{y_0}$ de sorte que la *pression ou charge relative* dans la section adjacente à l'obturateur a pour valeur

$$\zeta_i^2 = \frac{Y_i}{y_0} = \frac{u_i^2}{u_0^2}$$

Définissons maintenant la *valeur relative du débit de l'orifice*

$$\frac{Q_i}{Q_0} = \frac{\psi_i}{\psi_0}\frac{u_i}{u_0} = \eta_i\zeta_i$$

et la *valeur relative de la puissance de l'eau* sortant de la conduite

$$w_i = \frac{1000\,Q_i Y_i}{1000\,Q_0 y_0} = \eta_i\zeta_i\zeta_i^2 = \eta_i\zeta_i^3$$

Les équations (I) et (II) où $\rho = a v_0 : 2gy$ est la *caractéristique* de la conduite, contiennent toute la théorie du coup de bélier dans les conditions rappelées plus haut ; elles permettent de déterminer, tant analytiquement que graphiquement, les valeurs successives de la pression ζ_i^2 à l'obturateur lors d'une manœuvre absolument quelconque de celui-ci, et, par suite, la valeur en chaque instant de la puissance

$$w_i = \eta_i\zeta_i^3 \qquad \text{(III)}$$

Puissance de l'eau sortant d'une conduite de longueur infinie (coup direct).

Durant la première phase, c'est-à-dire les premières $2L : a$ secondes qui suivent le début de la manœuvre, tout se passe comme si la conduite était de longueur infinie. Le phénomène est régi par la première des équations (I) qui ne contient que ζ_1, la constante ρ et le degré d'ouverture η_1 comme variable indépendante.

La loi de variation de la puissance w_1 est alors donnée par la relation

$$\frac{\partial w_1}{\partial \eta_1} = \frac{\zeta_1 - 2\rho\eta_1}{\zeta_1 + \rho\eta_1}\zeta_1^3$$

et l'on a, au début de la manœuvre, temps zéro, $\zeta_1 = 1$, $\eta_1 = 1$, et

$$\left(\frac{\partial w_1}{\partial \eta_1}\right)_0 = \frac{1 - 2\rho}{1 + \rho}$$

Si $\rho < 0{,}5$, ∂w_1 et $\partial \eta_1$ sont de même signe ; la puissance de l'eau diminue donc lors d'une fermeture et augmente lors d'une ouverture.

Si $\rho = 0{,}5$, on a $\left(\frac{\partial w_1}{\partial \eta_1}\right) = 0$, condition de maximum ; la puissance diminue dès que l'obturateur bouge, que ce soit dans un sens ou dans l'autre.

Si enfin $\rho > 0{,}5$, ∂w_1 et $\partial \eta_1$ sont de signes contraires ; la puissance augmente lors d'une fermeture et diminue lors d'une ouverture, et ce phénomène d'inversion, s'il est de quelque durée, contrarie évidemment le réglage des turbines alimentées par la conduite. Durant une ouverture, la puissance est constamment décroissante ; durant une fermeture, elle croît jusqu'à la valeur

$$w_{1\,max} = \frac{(\rho + 0{,}5)^2}{2\rho}$$

et décroît ensuite pour s'annuler à la fermeture complète, où $\eta_1 = 0$.

Conduite de longueur finie (influence du contre-coup).

Admettons une *fermeture linéaire*, définie par la loi

$$\eta_i = 1 - \frac{i}{\theta}$$

où i est un temps quelconque et $\theta = \tau : \mu$ le temps de fermeture complète, exprimés en rythmes ou unités μ.

Les valeurs successives de la charge ζ_i^2 tendent vers une limite ζ_m^2, atteinte pratiquement en quelques rythmes, donnée par l'équation

$$\zeta_m^2 - \frac{\rho}{\theta}\zeta_m - 1 = 0 \qquad \text{(IV)}$$

Le calcul numérique, pour différentes valeurs de ρ et ζ_m^2 montre [1] la forte influence du contre-coup sur la valeur de la puissance w_i, influence sans laquelle la stabilité de réglage serait dans bien des cas impossible, la plupart des conduites, celles du moins des chutes inférieures à 200 m, ayant une caractéristique $\rho > 0{,}5$.

Cependant, la puissance reste constamment supérieure à celle que l'on obtiendrait sans coup de bélier. Le calcul du PD^2 à donner aux masses en rotation pour réaliser un écart de vitesse fixé lors d'une décharge totale du groupe exige la connaissance de *l'énergie totale débitée durant la fermeture.*

Si l'on remplace la courbe des valeurs successives de ζ_i^2 par la parabole

$$\zeta^3 = \zeta_m^3 - (\zeta_m^3 - 1)\eta^n \qquad \text{où} \qquad n = \frac{3\rho}{(\rho + 1)(\zeta_m^3 - 1)}$$

la *valeur relative* de cette énergie est :

$$\int_0^\theta w\,dt = \frac{n\zeta_m^3 + 2}{n + 2}\cdot\frac{\zeta_m}{\zeta_m^2 - 1}\cdot\frac{\rho}{2} = K\frac{\rho}{2} \qquad \text{(V)}$$

Sa *valeur absolue*, en kgm, s'obtiendra en multipliant cette intégrale par l'unité de temps μ et la puissance débitée en régime initial $1000\,Q_0 y_0$. Tenant compte des définitions de μ et de ρ, on peut l'écrire

$$1000\,Q_0 y_0 \mu \int_0^\theta w\,dt = K\left(\frac{1000}{g}\,\frac{\pi D^2}{4}\,\frac{v_0^2}{2}\,L\right)$$

d'où K est le nombre par lequel on doit multiplier l'énergie cinétique de la colonne liquide de la conduite en régime initial pour obtenir l'énergie totale débitée par l'orifice pendant une fermeture complète linéaire.

[1] Voir article de la *Revue générale de l'électricité.*

Les valeurs de K dépendent essentiellement de la charge limite ζ_m^2, mais varient peu avec ρ, et la formule exacte (V) peut être remplacée par la suivante, où $Y_m = \zeta_m^2 y_0$ est la charge limite en mètres :

$$K = \frac{2}{\zeta_m} + \frac{1}{\zeta_m^2 - 1} = 2\sqrt{\frac{y_0}{Y_m}} + \frac{y_0}{Y_m - y_0} \qquad \text{(VI)}$$

Nous pouvons aussi, en divisant l'expression (V) de l'énergie débitée pendant la fermeture par $\theta : 2$, expression de l'énergie débitée sans coup de bélier, calculer le *facteur de majoration* φ qu'il faut introduire dans les formules habituelles du PD^2 pour tenir compte de l'influence de la conduite. Ce facteur a pour valeur $\varphi = K\frac{\rho}{\theta}$ ou, en partant de la formule approchée (VI)

$$\varphi = 2\left(1 - \frac{y_0}{Y_m}\right) + \sqrt{\frac{y_0}{Y_m}} \qquad \text{(VII)}$$

Lorsque la longueur de la conduite devient grande par rapport à la chute, le réglage automatique devient difficile. Les conditions de réglage peuvent alors être notablement améliorées par l'installation de dispositifs spéciaux, dont les plus courants sont les *orifices compensateurs synchrones*, qui suppriment pratiquement le coup de bélier de fermeture, et les *tubes piézométriques d'extrémité* ; on peut encore, comme on le verra plus loin, y ajouter les *chambres d'air*.

Tubes piézométriques d'extrémité (chambres d'équilibre).

Lorsque la conduite est munie, immédiatement avant l'obturateur, d'un tube piézométrique vertical de hauteur $L' = y_0$, surmonté d'un réservoir, avec déversoir, qui y maintient le niveau d'eau constant, les lois du coup de bélier sont profondément modifiées.

La longueur L étant, par hypothèse, très grande par rapport à y_0, l'étude du phénomène peut se limiter à la seule phase directe de la conduite. Désignons par $q = D'^2 : D^2$ le rapport de la section du tube à celle de la conduite et supposons que la vitesse a de propagation soit la même dans les deux tuyaux [1]. Le système fondamental (I) est alors remplacé par le suivant :

$$\left.\begin{array}{rl}(\zeta_1^2-1)(q+1) &= 2\rho(1-\eta_1\zeta_1)\\ (\zeta_1^2-1)(q-1)+(\zeta_2^2-1)(q+1) &= 2\rho(\eta_1\zeta_1-\eta_2\zeta_2)\\ (\zeta_2^2-1)(q-1)+(\zeta_3^2-1)(q+1) &= 2\rho(\eta_2\zeta_2-\eta_3\zeta_3)\\ \ldots\ldots\ldots\ldots & \end{array}\right\} \text{(VIII)}$$

équations applicables à des instants se succédant à des intervalles $\mu' = 2L' : a = 2y_0 : a$.

La discussion de la fonction $w_i = \eta_i\zeta_i^3$ dans le même esprit que précédemment fait nettement ressortir l'influence du tube.

La charge ζ_i^2 tend vers une limite ζ_m^2 solution de l'équation

$$\zeta_m^2 - \frac{\rho}{q\theta'}\zeta_m - 1 = 0 \qquad \text{(IX)}$$

où θ' est le temps de fermeture exprimé en rythmes $\mu' = 2y_0 : a$ du tube piézométrique.

La valeur relative de l'*énergie totale libérée* lors d'une fermeture complète, intervenant, par hypothèse, pendant la phase directe de la conduite, sera donnée par l'expression

$$\int_0^{\theta'} w dt = \frac{n'\zeta_m^3 + 2}{n' + 2}\cdot\frac{\zeta_m}{\zeta_m^2 - 1}\cdot\frac{\rho}{2q} = K'\frac{\rho}{2q} \qquad \text{(X)}$$

où $$n' = \frac{3\rho}{(q+\rho+1)(\zeta_m^3 - 1)}$$

Sa *valeur absolue*, en kgm, s'obtient en multipliant cette intégrale par $1000 Q_0 y_0 \mu'$ et, en raisonnant comme précédemment, peut s'écrire :

$$1000_0 Q_0 y_0 \mu' \int_0^{\theta'} w dt = K'\frac{y_0}{q}\left(\frac{1000}{g}\frac{\Pi D^2}{4}\frac{v_0^2}{2}\right) \qquad \text{(XI)}$$

Elle est donc égale à l'énergie cinétique, en régime initial, d'un tronçon de colonne liquide de la conduite principale de longueur $K'\frac{y_0}{q}$.

Il est facile de se rendre compte, à l'aide de quelques exemples numériques, de la diminution d'énergie apportée par le tube piézométrique.

Les *chambres d'équilibre d'extrémité* n'ont donc pas seulement pour effet de réduire la surpression maximum, raison habituelle de leur établissement, mais elles *améliorent sensiblement les conditions de réglage.*

Chambres d'air.

Soit $\frac{\Pi D^2}{4} C_0$ la capacité, ou volume, de la chambre d'air en régime initial, C_0 étant donc le rapport de ce volume à celui d'un mètre de colonne liquide de la conduite. Soient C_i la valeur de ce rapport et $\left(\frac{dC}{dt}\right)_i$ sa variation à un instant i.

Le système (I) devient, par la présence de la chambre d'air :

$$\left.\begin{array}{l}\zeta_1^2-1 = 2\rho\left\{1-\eta_1\zeta_1+\frac{1}{v_0}\left(\frac{dC}{dt}\right)_1\right\}\\ \zeta_1^2+\zeta_2^2-2 = 2\rho\left\{\eta_1\zeta_1-\eta_2\zeta_2+\frac{1}{v_0}\left[\left(\frac{dC}{dt}\right)_2-\left(\frac{dC}{dt}\right)_1\right]\right\}\\ \zeta_2^2+\zeta_3^2-2 = 2\rho\left\{\eta_2\zeta_2-\eta_3\zeta_3+\frac{1}{v_0}\left[\left(\frac{dC}{dt}\right)_3-\left(\frac{dC}{dt}\right)_2\right]\right\}\\ \ldots\ldots\ldots\ldots\end{array}\right\} \text{(XII)}$$

Supposons une *transformation isothermique* ; C_0 et C_i sont liés par la relation

$$C_i = C_0\frac{y_0 + h}{Y_i + h} = C_0\frac{1+\epsilon}{\zeta_i^2 + \epsilon}$$

où h est la pression atmosphérique, en mètres d'eau et $\epsilon = h : y_0$ sa valeur rapportée à la pression statique.

[1] Si ce n'est pas le cas, le tube étant de nature et dimensions très différentes de celles de la conduite, il faut introduire le rapport $K = \rho : \rho'$ des caractéristiques et l'on obtient un système un peu différent du système (VIII). (Voir Calame et Gaden, *Théorie des chambres d'équilibre*, Gauthier-Villars, Paris 1926.)

La première des équations (XII) peut alors se mettre sous la forme :

$$\zeta_1^2 - 1 = 2\rho \left\{ 1 - \eta_1 \zeta_1 - \frac{2C_0}{v_0} \frac{(1+\epsilon)\zeta_1}{(\zeta_1^2+\epsilon)^2} \left(\frac{d\zeta_1}{dt}\right) \right\}$$

et l'on voit qu'à l'instant $t = 0$, où $\zeta_1 = 1$, $\eta_1 = 1$

$$\left(\frac{d\zeta_1}{dt}\right)_0 = 0 \quad \text{et} \quad \left(\frac{d^2\zeta_1}{dt^2}\right)_0 = 0$$

La chambre d'air supprime donc toute variation de pression *au début* de la manœuvre. Le débit variant proportionnellement au degré d'ouverture, il en sera de même de la puissance ; on trouve en effet

$$\left(\frac{dw_1}{dt}\right)_0 = -\frac{1}{\theta} = \left(\frac{d\eta_1}{dt}\right)_0$$

Par l'effet de la chambre d'air, la puissance w_1 de l'eau sortant de la conduite varie, pendant les premiers instants d'une manœuvre, dans le même sens et proportionnellement à la section de l'orifice d'écoulement, conditions idéales de la stabilité de réglage des turbines.

Le volume minimum C_0 de la chambre peut se calculer en posant les conditions suivantes : 1° La charge du coup de bélier ne doit pas dépasser une valeur ζ_m^2 fixée d'avance ; 2° l'énergie w de l'eau doit toujours être décroissante ; 3° le point d'inflexion de la courbe $w = f(t)$ dont les équations révèlent l'existence sera un point de tangente horizontale correspondant à la fin de la phase directe. Il est alors donné par l'expression

$$C_0 = \frac{3}{2} \frac{\eta_1^2(\zeta_1^2+\epsilon)^2}{(1+\epsilon)\zeta_1} v_0 \qquad \text{(XIII)}$$

dans laquelle ζ_1 est donné par l'équation

$$z_1^2 + 2\rho \left\{ 1 - \left(\frac{\zeta_m^2 - 1}{\rho\zeta_m}\right)^2 \right\} \zeta_1 - (1+2\rho) = 0 \qquad \text{(XIV)}$$

et η_1 calculé ensuite par l'expression

$$\eta_1 = 1 - \sqrt{1 - \frac{1 + 2\rho - \zeta_1^2}{2\rho\zeta_1}} \qquad \text{(XV)}$$

Si l'on suppose une *transformation adiabatique*, donnée par

$$C^{1,41}(\zeta_1^2 + \epsilon) = C_0^{1,41}(1+\epsilon)$$

le volume minimum C_0 doit être majoré de 40 % environ.

La *valeur relative de l'énergie débitée* durant la fermeture complète est approximativement, d'après le diagramme $w = f(t)$

$$\int_0^\theta w dt = \frac{1}{3}\left(1 + \frac{2}{1-\eta_1}\eta_1\zeta_1^3\right) \qquad \text{(XVI)}$$

et sa *valeur absolue*, en kgm

$$1000 Q_0 y_0 \mu \int_0^\theta w dt = K_c \left(\frac{1000}{g} \frac{\Pi D^2}{4} \frac{v_0^2}{2} L\right) \qquad \text{(XVII)}$$

où

$$K_c = \frac{2}{3\rho}\left(1 + \frac{2}{1-\eta_1}\eta_1\zeta_1^3\right) \qquad \text{(XVIII)}$$

Les valeurs numériques de K_c données par cette formule sont inférieures aux valeurs analogues de K données par la formule (V) mais peu différentes, sauf pour les très basses chutes avec fortes surpressions.

La valeur de l'énergie totale est peu affectée par la présence de la chambre dont l'heureuse influence sur la pression, très marquée pendant la première phase, disparaît bien vite si la manœuvre se prolonge durant les phases de contre-coup, les équations (XII) tendant vers la même équation (IV) et la pression vers la même limite ζ_m^2 que si la chambre d'air n'existait pas. Celle-ci est donc d'une médiocre utilité s'il s'agit de diminuer la valeur maximum du coup de bélier ou de réduire le PD^2 du groupe, le cas exceptionnel des manœuvres très rapides, exécutées en un temps voisin de $2L : a$ secondes, étant naturellement réservé.

La chambre d'air peut, par contre, rendre d'appréciables services dans les installations où il s'agit d'*améliorer la stabilité de réglage*.

Concours d'idées pour la construction d'un marché couvert, à Vevey.

(Suite et fin.)[1]

N° 8, « *Les Arcades* ». Bonne utilisation du terrain. Belle conception de la halle. Les salles d'exposition sont mal placées et relativement petites. L'accès à ces salles devrait être à proximité de l'entrée sud. Les arcades sont une solution coûteuse. Il aurait été indiqué de mieux accuser l'entrée principale sud en façade.

N° 11, « *Mercure I* ». Le terrain est bien utilisé. Les accès aux salles d'exposition devraient être à proximité de l'entrée sud, sur la rue Louis Meyer. Ces salles sont assez bien groupées mais leur distribution intérieure est encombrée par des cloisons. Les escaliers d'accès aux appartements de l'immeuble locatif ne devraient pas être en façade. La distribution des appartements est peu pratique et difficilement rentable.

Du développement de l'emploi du gaz et de l'électricité[2],

par le Dr Th. HENNY, ingénieur-chimiste.

Tout d'abord laissez-moi vous rassurer sur le développement que je donnerai à mon sujet : loin de faire une conférence indigeste sur un objet trop vaste, je vais m'efforcer au cours de ma causerie de vous intéresser par de rapides notations sur les progrès des emplois du gaz et de l'électricité et leurs conséquences dans notre pays.

Depuis Ampère et Lebon, en guère plus d'un siècle, quel merveilleux développement des moyens de production et d'utilisation des fluides transporteurs d'énergie !

Dans le domaine de l'*éclairage*, les résultats de la concurrence féconde entre gaziers et électriciens ont prolongé la durée utile de notre vie, dont l'activité cessait autrefois dès la nuit venue.

François Ier promulgua, en 1524, une ordonnance exigeant des Parisiens de mettre des chandelles ardentes à chaque maison « pour éviter le danger des mauvais garçons qui courent la nuit par la ville ».

M. de Sartines, lieutenant général de la Police, qui organisa le premier concours du meilleur éclairage public et fit installer 300 réverbères à huile, affirmait, en 1769, à la suite de cet

[1] Voir *Bulletin technique* du 14 octobre 1933, page 255.

[2] Nous pensons intéresser nos lecteurs en reproduisant cette causerie faite au jubilé célébrant le 75e anniversaire de la Société d'étudiants « *Stella* », bien qu'elle ait été conçue à l'intention d'un jeune auditoire. (Réd.).