Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 89/90 (1927)

Heft: 5

Artikel: De la stabilité des installations hydrauliques munies de chambres d'équilibre

Autor: Calame, Jules / Gaden, Daniel

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-41729

INHALT: De la stabilité des installations hydrauliques munies de chambres d'équilibre. — Zum Problem der Akustik im Grossen Versammlungs-Saal des Völkerbund-Gebäudes in Genf. — † Achilles Schucan (mit Tafel 5). — Mitteilungen: Kritische Betrachtungen über die Wertung von Verbrennungskraftmaschinen. Ueber die Neckar-Kanalisierung von Mannheim bis Plochingen. Neues Dynamometer von Wazau. Eine Ausstellung „Die farbige Stadt". Werkbundausstellung „Die Wohnung" Stuttgart. — Korrespondenz: Zur Weiterentwicklung des Badener Schulhaus-Wettbewerbs. — Literatur. — Vereinsnachrichten: G. E. P.-Generalversammlung Schaffhausen. S. T. S.

Band 90. Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet. Nr. 5

De la stabilité des installations hydrauliques munies de chambres d'équilibre.

Par JULES CALAME et DANIEL GADEN,
Ingénieurs aux „Ateliers des Charmilles", Genève et Paris.

Le problème de la stabilité du réglage automatique d'une installation hydraulique munie d'une chambre d'équilibre a été traité pour la première fois, à notre connaissance, par le Professeur *Dieter Thoma*, dans une étude fort complète[1]) qui lui fut suggérée par l'examen des difficultés rencontrées à la Centrale de Heimbach. *Raymond D. Johnson*, dont les importants travaux et la longue expérience, en matière de chambres d'équilibre, ont fait un spécialiste écouté, à lui-même repris la question à l'occasion de la discussion d'une note[2]) de Minton M. Warren sur les chambres à air et a établi une formule concordant, ainsi qu'il l'a fait remarquer, avec celle de Thoma pour le cas d'une chambre ouverte à niveau libre.

Nous avons nous-mêmes exposé ailleurs[3]) la solution de ce problème à l'aide d'une notation qui nous a paru particulièrement commode pour obtenir la synthèse des résultats; mais, dans le cadre d'une étude plus générale, nous ne lui avons peut-être pas donné tout le développement désirable si l'on veut être à même d'en tirer le meilleur parti possible, lors de son application dans la pratique.

Quelques critiques qui nous ont été formulées à ce sujet nous ont montré souvent, de la part de nos correspondants, sinon une incrédulité complète, du moins certaines hésitations au sujet de la raison d'être de la formule de Thoma, laquelle est demeurée malgré tout encore peu connue des milieux intéressés. On nous a fait observer qu'elle ne tenait pas suffisamment compte des particularités du régulateur automatique de vitesse ou encore que certaines installations réalisées et qui n'y satisfaisaient pas, assuraient pourtant un fonctionnement dont il n'y avait pas lieu de se plaindre.

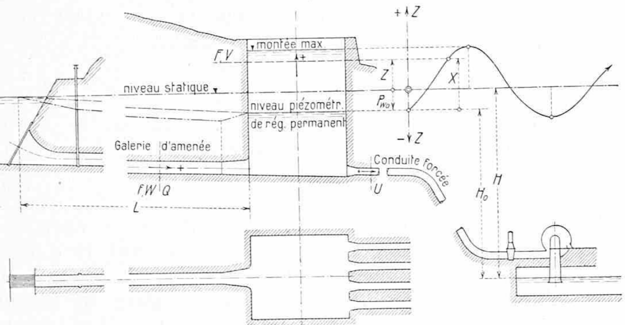

Fig. 1. Chambre d'équilibre située sur le parcours même de courant.

Nous voudrions ici, après avoir succinctement reproduit l'établissement de la *formule de Thoma*, examiner la répercussion que peuvent avoir des corrections d'hypothèses qui demandent, dans certains cas, à être prises en considération. Plusieurs d'entre elles ont été étudiées déjà par les deux auteurs précités et nous sommes heureux d'avoir ici l'occasion de remercier MM. R. D. Johnson et D. Thoma des indications ou résultats d'expérience dont ils ont bien voulu nous faire part. Si, malgré les remarques qui vont suivre et toutes conditions bien considérées, certaines installations se révélaient „stables", en dépit des prévisions de la théorie, nous serions reconnaissants aux ingénieurs qui s'en sont occupés de bien vouloir les signaler, dans l'intérêt même de la solution générale à donner à cet important problème.

I. NOTATION — ÉQUATION GÉNÉRALE.

Nous désignerons ici aussi les caractéristiques principales du système *galerie d'amenée — chambre d'équilibre* par les lettres suivantes (fig. 1):

Q_0 le débit de régime permanent considéré,

F la section de la chambre[1]),

f la section, supposée constante, de la galerie d'amenée,

L la longueur de la galerie.

Ces données permettent de définir dans le cas idéal où le système ne serait le siège d'aucune perte de charge:

$Z_* = \frac{Q_0}{F}\sqrt{g\frac{LF}{gf}}$ l'amplitude de l'oscillation résultant d'une fermeture instantanée opérée sur le débit Q_0,

$T = 2\pi\sqrt{\frac{LF}{gf}}$ la période du mouvement oscillatoire ainsi amorcé.

Nous conviendrons dorénavant de mesurer toutes les variables à l'aide de leurs *valeurs relatives*, c'est-à-dire en prenant comme unités:

1° La grandeur Z_* pour les déplacements du niveau de l'eau dans la chambre. Ainsi:

$z = \frac{Z}{Z_*}$ caractérisera l'ordonnée Z en régime troublé du plan d'eau dans la chambre d'équilibre, à partir du niveau statique ou du niveau du réservoir amont, comptée positivement vers le haut,

$x = \frac{X}{Z_*}$ l'ordonnée X en régime troublé du même plan d'eau, mais à partir du niveau piézométrique ou niveau dans la chambre en régime permanent, comptée positivement vers le haut,

$p_0 = \frac{P_{w0}}{Z_*}$ caractérisera la perte de charge P_{w0} dans la galerie d'amenée en régime permanent; ce qui implique: $z = x - p_0$.

2° La grandeur T pour le temps:

$t' = \frac{t}{T}$ caractérisera l'instant t à partir d'une origine déterminée.

3° Pour les diverses vitesses d'écoulement, celle de leurs valeurs qui correspond au débit Q_0 de régime permanent:

$w = \frac{W}{W_0}$ caractérisera la vitesse dans la galerie, comptée positivement de l'amont vers l'aval; $W_0 = Q_0 : f$.

$v = \frac{V}{V_0}$ la vitesse dans la chambre, comptée positivement vers le haut; $V_0 = Q_0 : F$.

$u = \frac{U}{U_0}$ la vitesse d'écoulement vers les turbines, au-delà de la chambre; $U_0 = V_0 = Q_0 : F$.

---

[1]) D. Thoma: Zur Theorie des Wasserschlosses bei selbsttätig geregelten Turbinenanlagen. München (Verlag R. Oldenbourg) 1910.

[2]) Minton M. Warren: Air tanks on pipe lines; „Transactions American Society of Civil Engineers". 1918 p. 250.

[3]) J. Calame et D. Gaden: Théorie des chambres d'équilibre. La Concorde, Lausanne, et Gauthier-Villars, Paris, 1926. [Voir la notice bibliographique dans le no 1 du 3 juillet 1926 de cette revue, vol. 88, p. 20. La réd.]

[1]) Dans l'étude des oscillations du réglage automatique, il faut choisir pour F la section la plus dangereuse, soit la plus petite section de la chambre si celle-ci n'est pas de section constante.

A l'aide de ces variables homogènes, l'équation générale du mouvement, pour un écoulement dans la galerie dirigé de l'amont vers l'aval, s'écrit sous la forme simple suivante:

$$v \frac{dv}{dz} + \frac{1}{2\pi}\frac{du}{dt'} + z + p_0 w^2 = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Elle se déduit de l'application du théorème des forces vives, en tenant compte aussi de l'équation de continuité, sous la forme:

$$w = v + u \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

On peut y ajouter l'expression de la valeur instantanée de la perte de charge:

$$p = p_0 w^2 = p_0 (v + u)^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

L'équation (1) suppose que le volume de la chambre est négligeable devant celui de la galerie, ce qui est en général le cas, et celui-ci à son tour très petit comparé à celui du réservoir d'amont dont le niveau est donc considéré comme invariable.[1]

II. ACTION DU RÉGLAGE AUTOMATIQUE — CONDITIONS DE STABILITÉ — FORMULE DE THOMA.

Nous supposerons que l'action du réglage automatique tende à maintenir à une valeur *constante*[2] la puissance débitée par les groupes de l'installation, puissance correspondant au régime permanent:

$$N_0 = \eta \, \gamma \, Q_0 \, H_0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

η désignant le produit du rendement de la conduite forcée proprement dite (à l'aval de la chambre) par le rendement des turbines.

$H_0 = H - P_{wo}$ la chute mesurée entre le niveau piézométrique dans la chambre et le niveau aval dans le canal de fuite des turbines.

Soit Z, à un instant donné d'une oscillation amorcée, l'ordonnée du niveau de l'eau dans la chambre, entraînant pour la chute la valeur $H + Z$. Le débit absorbé prend alors, grâce au réglage automatique, une valeur instantanée Q telle que la puissance produite demeure la même:

$$N_0 = \eta \, \gamma \, Q \, (H + Z) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4')$$

ceci en supposant qu'au cours de l'oscillation le rendement de la conduite et des turbines ne varie pas.

On tire des équations (4) et (4'):

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{H_0}{H + Z} = \frac{H_0}{H_0 + P_{wo} + Z}$$

ou, en caractérisant la *chute* par sa valeur *relative* $h_0 = \frac{H_0}{Z_*}$

$$u = \frac{h_0}{h_0 + p_0 + z} = \frac{1}{1 + \frac{x}{h_0}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

Nous admettons dorénavant que le mouvement étudié est de petite amplitude et qu'il ne met donc en jeu qu'un échange de débit de faible valeur entre la galerie et la chambre. Cette hypothèse est en effet parfaitement motivée puisque notre but est de fixer les conditions d'un mouvement amorti, seul compatible avec un bon fonctionnement du réglage, et que cet amortissement, pour être complet, doit avoir lieu à partir de n'importe quelle dénivellation initiale, si faible soit-elle.

En conséquence nous supposons que $\left(\frac{x}{h_0}\right)$ et v sont très faibles vis-à-vis de l'unité et que leurs puissances d'ordre supérieur sont négligeables dans les calculs, ce qui permet les simplifications suivantes:

$$u = 1 - \frac{x}{h_0} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5')$$

$$p_0 w^2 = p_0 (v + u)^2 = p_0 \left(1 + 2v - \frac{2x}{h_0}\right); \quad \frac{du}{dt'} = -\frac{1}{h_0}\frac{dx}{dt'}$$

En remarquant en outre que:

$$v = \frac{1}{2\pi}\frac{dx}{dt'} \qquad v\frac{dv}{dz} = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 \frac{d^2x}{dt'^2}$$

et en introduisant dans l'équation (1), on obtient une équation linéaire du second ordre:

$$\frac{d^2x}{dt'^2} - 2a\frac{dx}{dt'} + bx = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

dont les coefficients sont:

$$a = \pi\left(\frac{1}{h_0} - 2p_0\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7)$$

$$b = 4\pi^2\left(1 - \frac{2p_0}{h_0}\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8)$$

Nous nous limiterons au cas où:

$$b > 0, \quad p_0 < \frac{h_0}{2}, \quad P_{wo} < \frac{H_0}{2},$$

$$a^2 < b, \quad p_0 < 1 - \frac{1}{2h_0}$$

Si ces conditions n'étaient pas réalisées, le mouvement serait apériodique[1]; mais la plupart des installations y satisfont en pratique, si bien que la solution de l'équation (6) est de la forme:

$$x = m\, e^{at'} \sin\left(\sqrt{b - a^2}\, t' - \mu\right) \quad . \quad . \quad . \quad (9)$$

traduisant un mouvement oscillatoire qui sera:

amorti si $a < 0$
amplifié si $a > 0$

Or, seul un mouvement *amorti* est admissible pour la stabilité du réglage automatique; il est dès lors nécessaire que:

$$p_0 > \frac{1}{2h_0}$$

Telle est la *condition de stabilité* recherchée, dans l'expression de laquelle on peut mettre en évidence les données: f, L, W_0, P_{wo}, H_0. On obtient alors comme valeur de la section limite de la chambre:

$$F_0 > \frac{W_0^2}{2g}\frac{Lf}{H_0 P_{wo}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (10)$$

inégalité connue sous le nom de „formule de Thoma". Transformée en égalité, elle correspondrait à un mouvement *entretenu*.

Cette condition de stabilité est nécessaire, parce que l'on ne peut tolérer un mouvement de va et vient continuel des régulateurs ajustant à tout instant le débit du fait de l'oscillation du niveau dans la chambre, autrement dit d'une variation périodique de la valeur de la chute. Les régulateurs n'étant pas, en outre, infiniment sensibles, ce mouvement correspondrait forcément à une oscillation de la vitesse des groupes.

Il est possible toutefois que, même si cette condition n'était pas satisfaite, l'oscillation n'irait pas en s'amplifiant indéfiniment:

soit que le niveau de l'eau dans la chambre rencontre pour de plus fortes amplitudes, vers le haut ou vers le bas, des sections plus grandes que celle considérée (cas de la chambre à sections multiples), ou qu'il atteigne un déversoir (chambre déversante),

soit que, l'échange de débit entre la galerie et la chambre devenant important, ce débit donne lieu à une perte de charge (proportionnelle à v^2) qui viendra s'ajouter aux frottements et freinera l'oscillation (ceci surtout dans les chambres munies à leur base d'un étranglement).

[1]) Il va sans dire que si le niveau amont en tête de la galerie pouvait lui-même osciller, comme ce serait le cas pour une galerie en charge débutant à l'extrémité aval d'un long canal à libre écoulement, il s'en suivrait une perturbation qu'il n'est pas possible d'analyser mathématiquement. Il nous paraît cependant qu'on peut admettre généralement, dans un cas pareil, que les deux mouvements oscillatoires, dans le canal d'une part, dans la galerie et la chambre d'autre part, ne sauraient se renforcer l'un l'autre, de sorte qu'en négligeant la variation de faible amplitude à laquelle peut être soumis le niveau amont, en tête de la galerie, on se place plutôt dans des conditions défavorables, pour autant du moins que les périodes des deux mouvements ne coïncident pas.

[2]) Les légères modifications de la puissance, telles qu'elles se produisent habituellement, par suite des variations de charge d'un réseau, ne sauraient être de nature à infirmer les résultats qu'on peut déduire de l'hypothèse d'une charge constante. Il faudrait déjà, pour que des variations de charge conduisent à des conclusions aggravantes, que ces variations s'effectuent suivant un rythme précis, à des intervalles de temps dont la valeur serait proche de la durée de la période du système oscillant galerie d'amenée-chambre d'équilibre. On peut donc admettre qu'un cas fortuit de ce genre est pratiquement exclu.

[1]) Voir „Théorie des chambres d'équilibre" § 51 page 198.

Mais l'amplitude limite, si elle existe, aurait en général, par rapport à la chute, une valeur telle qu'elle serait inadmissible en raison de sa répercussion sur le réglage automatique, et il est bon de se persuader que la formule de Thoma est valable même pour des chambres munies d'un étranglement, celui-ci ne produisant, lors de petites oscillations, qu'une perte négligeable qui ne saurait être de quelque efficacité pour l'amortissement.[1])

*

Remarquons encore que la période, mesurée en secondes, des petites oscillations s'exprime par:

$$T' = T\frac{2\pi}{\sqrt{b-a^2}} = \frac{T}{\sqrt{1-\frac{1}{4h_0^2}-\frac{p_0}{h_0}-p_0^2}}$$

Elle est donc plus grande que T, cette dernière valeur étant de l'ordre de grandeur de plusieurs dizaines de secondes, souvent de plus d'une minute. Etant donné un rythme aussi lent des oscillations, il n'est pas possible de les freiner par un dispositif quelconque agissant sur les régulateurs automatiques de vitesse des turbines, à moins de rendre ces régulateurs tout à fait insensibles et de les empêcher par conséquent de jouer leur rôle normalement. Nous en donnerons d'ailleurs encore la preuve plus loin.

III. INFLUENCE DE LA HAUTEUR REPRÉSENTATIVE DE LA VITESSE D'ÉCOULEMENT DANS LA GALERIE, AU POINT D'INSERTION DE LA CHAMBRE D'ÉQUILIBRE.

En ce qui concerne son effet sur le mouvement oscillatoire, la hauteur représentative de la vitesse d'écoulement, au point d'insertion de la chambre d'équilibre, est assimilable à une perte de charge. Elle correspond en effet á une dénivellation, c'est-à-dire à une perte de pression nécessaire à produire l'écoulement et ceci au même titre que la perte due au frottement, à laquelle elle vient s'ajouter.[1])

Par contre, dans l'évaluation de la chute H_0, faite à partir de la chute brute H, il n'y a lieu de retenir que les pertes de charge proprement dites, la hauteur représentative de la vitesse constituant, au point de vue de la puissance réalisée, non pas une perte, mais une part utile de l'énergie qui est récupérée dans les turbines.

*

Pour examiner en détail cette influence de la hauteur représentative de la vitesse dans la galerie, il faut distinguer deux dispositions caractéristiques différentes:

ou bien la galerie d'amenée débouche, après un épanouissement, dans une chambre d'équilibre de grande section (figure 1), sur une autre face de laquelle part la conduite forcée;

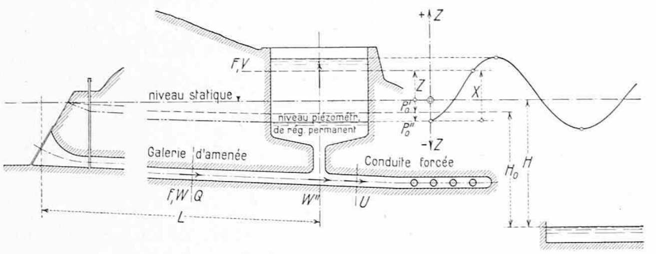

Fig. 2. Chambre d'équilibre raccordée au point de jonction de la galerie d'amenée et de la conduite forcée.

ou bien la galerie d'amenée se raccorde directement à la conduite forcée, le point de jonction de ces deux ouvrages étant précisément le point d'insertion de la chambre d'équilibre (fig. 2) à laquelle il est relié par un tronçon approprié.

[1]) Op. cit. chapitre VII, p. 207.

[2]) Op. cit. chapitre II, p. 59.

Dans le premier cas, le débit de la galerie, qui traverse la chambre pour entrer, à l'opposé, dans la conduite forcée, s'écoule, dans la chambre même, à une très faible vitesse correspondant à une hautenr représentative négligeable. Si même l'épanouissement qui termine la galerie récupérait parfaitement l'énergie cinétique de l'eau avant son entrée dans la chambre, le niveau piézométrique dans la chambre ne différerait du niveau statique que de la valeur de la perte de charge par frottement, dans la galerie d'amenée, perte dont seule il y aurait lieu de tenir compte dans l'application de la formule de Thoma. Pratiquement la perte par frottement est augmentée d'une fraction au moins de l'énergie de vitesse qui n'est pas récupérée.

Dans le second cas, la vitesse d'écoulement au point de jonction reste importante et la dénivellation P_{wo} constatée, dans ce tube piézométrique parfait que constitue la chambre d'équilibre, comprend les termes:

P_0' soit la somme de *toutes les pertes de charges* proprement dites dans la galerie, entre la prise d'eau et la chambre, et

P_0'' la hauteur représentative de la vitesse de passage W_0'' au point de jonction de la galerie et de la conduite, soit au point d'insertion de la chambre. $P_0'' = W_0''^2 : 2g$.

$$P_{wo} = P_0' + P_0'' \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (11)$$

Dès lors, en tenant compte de (11), la chute nette à l'entrée de la conduite forcée, en régime permanent, s'écrit

$$H_0 = H - P_0' = H_0 - P_{wo} + P_0'' \quad . \quad . \quad . \quad (12)$$

et la puissance:

$$N_0 = \eta\,\gamma\,Q_0\,H_0$$

Pendant une oscillation, quand le niveau dans la chambre a pour ordonnée Z et quand la valeur du débit est $Q = fW$, celle de la chute nette momentanée devient:

$$(H + Z) + (W''^2 : 2g)$$

ou

$$H_0 + P_0' + Z + P_0''\frac{W''^2}{W_0''^2}$$

L'expression de la puissance constante s'écrit donc aussi:

$$N_0 = \eta\,\gamma\,Q\left(H_0 + P_0' + Z + P_0''\frac{W''^2}{W_0''^2}\right)$$

En comparant les deux valeurs de N_0 et en remarquant que W'', W_0'' sont proportionnels à Q, Q_0, soit également à U, U_0, on tire:

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{H_0}{H_0 + P_0' + Z + P_0''\frac{U^2}{U_0^2}} = \frac{H_0}{H_0 + X - P_0''\left(1 - \frac{U^2}{U_0^2}\right)}$$

ou en valeurs relatives:

$$u = \frac{1}{1 + \frac{x}{h_0} - \frac{p_0''}{h_0}(1 - u^2)} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (13)$$

Comme il s'agit de petites oscillations, x demeure faible vis-à-vis de h_0 et u reste voisin de l'unité; d'autre part p_0'' est malgré tout très sensiblement inférieur à h_0; on peut dès lors transformer cette expression de u de la façon suivante:

$$(1 - u^2) = 2(1 - u)$$

$$u = 1 - \frac{x}{h_0} + \frac{2p_0''}{h_0}(1 - u)$$

d'où

$$u = \frac{\left(1 - \frac{x}{h_0}\right) + 2\frac{p_0''}{h_0}}{1 + 2\frac{p_0''}{h_0}} = 1 - \frac{x}{h_0 + 2p_0''} \quad . \quad . \quad (5'a)$$

Or, pour l'établissement de la formule de Thoma, on s'est basé plus haut sur l'expression:

$$u = 1 - \frac{x}{h_0} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5')$$

On passe de (5') à (5a') en remplaçant respectivement h_0, H_0 par:

$$h_0' = h_0 + 2p_0'' \;;\quad H_0' = H_0 + 2P_0'' . \quad . \quad (14)$$

La formule de Thoma s'écrit donc dans ces conditions:

$$p_0' + p_0'' > \frac{1}{2(h_0 + 2p_0'')}$$

ou en introduisant ici encore les données:

$$F_0 > \frac{W_0^2}{2g} \frac{Lf}{(H_0 + 2P_0'')(P_0' + P_0'')} \quad . \quad . \quad . \quad (10\text{a})$$

la valeur de H_0 étant prise égale à:

$$H_0 = H - P_0'$$

c'est-à-dire en tenant compte des seules pertes proprement dites dans la galerie.

p_0'' joue donc favorablement dans le sens d'une diminution de la section limite F_0 et cela d'une double façon:

1° en s'ajoutant à P_0' dans la forme initiale de la formule de Thoma,

2° en modifiant H_0 qui devient $(H_0 + 2P_0'')$.

On voit immédiatement le parti que l'on peut tirer du facteur P_0'' pour diminuer la valeur de la section limite dans des cas difficiles. Il suffit d'augmenter la vitesse d'écoulement au point de jonction de la galerie et de la conduite, au-dessous de la chambre, par une diminution progressive de la section suivie au besoin d'un épanouissement (figure 3).

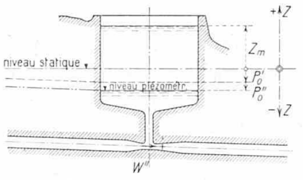

Fig. 3. Insertion de la chambre sur „venturi".

On réalise ainsi une sorte de „venturi" qui doit être prévu avec toutes les précautions désirables afin de n'être la cause ni d'une perte de charge sensible, ni de vibrations par suite d'une vitesse exagérée dans la section rétrécie. Un tel dispositif constitue, on le voit, un remède précieux pour *améliorer au besoin* la stabilité d'un système „galerie d'amenée — chambre d'équilibre". Il est d'ailleurs préconisé dans ce sens par *R. D. Johnson* qui nous l'a signalé, après l'avoir lui-même appliqué avec fruit.

Influence de la vitesse d'écoulement W_0 dans la galerie.

En remarquant que $P_{wo} = P_0' + P_0''$ reste proportionnel à W_0^2, on peut aisément faire ressortir, par la formule (10), que la condition de stabilité est indépendante de la vitesse d'écoulement[1]) et que si, par conséquent, la stabilité est réalisée dans une installation, pour un régime déterminé, elle le sera également pour tous les régimes possibles de cette installation.

Cette conclusion n'est cependant pas tout-à-fait exacte, car $H_0 = H - P_0'$ et si, du fait d'une augmentation de débit P_0' augmente, la condition de stabilité (formule 10) peut devenir plus difficile à réaliser, puisque H_0 diminue alors de valeur; encore faut-il pour cela que P_0' soit appréciable vis-à-vis de H_0.

Dans la formule (10a), le terme H_0 devient $H_0 + 2P_0'' = H - P_0' + 2P_0''$ et une augmentation de débit peut soit en réduire, soit en élever la valeur. Mais cette répercussion est pratiquement très faible, si bien que la conclusion générale ci-dessus énoncée subsiste pour les cas des deux formules (10) et (10a).

Influence de la longueur L de la galerie.

Il y a proportionnalité également entre L et P_{wo} pour une même valeur de débit utilisé, pourvu que P_0'' soit négligeable vis-à-vis de P_0' et que soient négligeables aussi les pertes à la prise ainsi que d'autres pertes possibles autres que le frottement dans la galerie. Autrement dit (formule 10), lorsque la perte de charge par frottement dans la galerie d'amenée est très supérieure à la hauteur représentative de la vitesse au bas de la chambre ainsi qu'aux autres pertes possibles, la condition de stabilité est pratiquement indépendante de L.

Il en est tout autrement dans le cas contraire (formule 10a), plus fréquent en pratique que le premier. $P_{wo} = P_0' + P_0''$ diminuant moins vite que L, la section limite F_0 varie dans le même sens que la longueur de la galerie.

[1]) Op. cit., page 197.

A la limite, si L tend vers zéro et par conséquent aussi les pertes par frottement dans la galerie, il reste toujours au dénominateur de la formule (10a) la valeur des pertes autres que celle par frottement dans la galerie et surtout le terme constant P_0'', si bien que F_0 tend aussi vers zéro.

Ainsi disparaît ce paradoxe d'après lequel, même pour de très faibles valeurs de L, la valeur limite F_0 conserverait la même grandeur.

Exemple numérique.

Sur la base des données qui suivent, on se rendra compte de la différence des résultats auxquels conduisent les deux formules (10) et (10a), particulièrement dans les installations à basse chute où le débit utilisé est important et dans lesquelles on a tendance à pousser au maximum la vitesse W_0, dans le but de réduire autant que possible les dimensions des ouvrages.

Soit à utiliser une chute brute de 10 m, en coupant par une galerie sous pression, longue de 350 m, la boucle d'une rivière dont on puisse mettre à contribution un débit de 420 m³/sec. Le profil de la galerie est supposé exécuté par des moyens tels qu'on puisse tolérer, au maximum, une vitesse moyenne d'écoulement de 3,40 m/sec dans la section.

Données:	$L = 350$ m	$Q_0 = 420$ m³/sec
	$f = 123$ m²	$W_0 = 3{,}40$ m/sec
	$H = 10{,}00$ m	$W_0^2 : 2\,g = 0{,}60$ m

L'emplacement de l'usine ne permet pas de donner à la chambre d'équilibre une section supérieure à 2400 m², ce qui d'ailleurs conduirait à une oscillation d'amplitude encore acceptable puisqu'on aurait, en supposant constante la section de la chambre, sans tenir compte d'un déversoir et dans l'hypothèse extrême d'un court-circuit général se produisant quand tous les groupes seraient chargés en plein:

$$Z_* = \frac{420}{2400} \sqrt{\frac{350}{9{,}81} \; \frac{2400}{123}} = 4{,}60 \text{ m}$$

la période d'oscillation étant:

$$T = 2\pi\sqrt{917} = 165 \text{ sec.}$$

Recherchons maintenant la section nécessaire au point de vue de la *stabilité* du réglage. A cet effet, le principal facteur à estimer est la perte de charge dans la galerie d'amenée, entre la prise d'eau et la chambre d'équilibre.

1° Admettons la *chambre de section importante* et la vitesse à la sortie de la galerie réduite à une valeur suffisamment faible pour que le terme P_0'' soit négligeable (voir fig. 1). Nous tenons compte dans la galerie des diverses pertes suivantes:

a) au passage des grilles et des vannes et à l'entrée convergente de la galerie . . 0,17 m
b) dans la galerie elle-même par frottement, par des coudes et par des changements internes de section . . . . 0,43 „
c) dans le divergent de sortie vers la chambre d'équilibre . . . . 0,15 „

Somme des pertes proprement dites $P_0' = 0{,}75$ m

D'après la formule de Thoma (10):

$P_{wo} = P_0' = 0{,}75$ m $\qquad H_0 = H - P_{wo} = 9{,}25$ m

on trouve:

$$F_0 > 3720 \text{ m}^2$$

section qui, dans le cas présent, serait donc irréalisable.

2° Considérons alors une disposition des ouvrages dans l'esprit de la figure 2. Il n'y aurait plus ainsi de divergent à la sortie de la galerie, d'où suppression de la perte c), mais l'eau passerait sous la chambre à la vitesse $W_0'' = W_0 = 3{,}40$ m/sec.

Il en résultera pour l'application de la formule (10a):

$P_0' = 0{,}60$ m	$H_0 = H - P_0' = 9{,}40$ m
$P_0'' = 0{,}60$ „	$H_0 + 2P_0'' = 10{,}60$ m
$P_{wo} = 1{,}20$ m	d'où l'on déduit (10a):

$$F_0 > 2030 \text{ m}^2$$

valeur vis-à-vis de laquelle la section prévue de 2400 m² n'offre qu'une marge de 18 % environ.

3° Pour obtenir une marge plus grande, il reste à examiner la disposition en „venturi" de la figure 3 en choisissant, par exemple, la section rétrécie de 93.5 m²; d'où $W_0'' = 4{,}50$ m/sec.

En admettant de 0,05 m la perte dans l'ajutage convergent du venturi, les pertes a) et b) dans la galerie restant les mêmes que sous 1°:

$$P_0' = 0{,}65 \text{ m}$$
$$P_0'' = 1{,}03 \text{ „}$$
$$P_{wo} = 1{,}68 \text{ m}$$

$$H_0 = H - P_0' = 9{,}35 \text{ m}$$
$$H_0 + 2\,P_0'' = 11{,}41 \text{ m}$$

d'où il résulte (10a):

$$F_0 > 1345 \text{ m}^2$$

correspondant à 56 % environ de la section pratiquement réalisable, c'est-à-dire à une marge de 78 %.

On voit qu'il est généralement possible d'améliorer sensiblement la condition de stabilité de la chambre par l'un ou l'autre des moyens préconisés. (à suivre.)

Zum Problem der Akustik im Grossen Versammlungs-Saal des Völkerbund-Gebäudes in Genf.

Von Ing. F. M. OSSWALD, Winterthur.

Die Aufgabe, die beim Völkerbundbau vorliegt, ist in doppelter Hinsicht ein einzigartiges Ereignis, einmal, weil ein ganz neuartiges Problem gestellt und zur Lösung in eine Hand gelegt werden soll, sodann aber auch, weil dabei die Abmessungen, vorab die des grossen Versammlungs-Saales, auch die bisher als sehr gross geltenden Bauten weit hinter sich lassen.

Der Architekt, als Künstler, sieht naturgemäss vor allem die ästhetische Seite, sowohl des Aeussern wie des Innern, vor sich. Wo aber die Dimensionen derart anschwellen, wie hier, da treten die *Gebrauchsanforderungen* immer zwingender hervor, ja, im vorliegenden Falle werden sie zu den alles andere überragenden Hauptforderungen, von deren Erfüllung das Gelingen geradezu abhängt.

Das hier zu lösende Architektur-Ingenieur-Problem erfordert mehr denn je, dass sich der Projekt-Verfasser zuerst vollständig in die Funktionen des Völkerbund-Apparates einlebt: er muss sich in die Stelle des Präsidenten, der Delegierten, der Zuhörer, usw., bis zum letzten Telegrammträger, Garderobeverwalter, Chauffeur hineindenken. Er muss den ganzen Bau in Gedanken hundertmal benutzt haben, um sicher zu sein, dass er, wenn verwirklicht, sich als befriedigend brauchbar erweist; vor allem gilt dies vom grossen Sitzungsaal. Denn, was nützte es dem Völkerbund, dieser weltumfassenden Organisation zur friedlichen gegenseitigen *Verständigung*, wenn die Redner in einer riesenhaften Zuhörerhalle sich nicht verständlich machen könnten? Wäre das nicht — in mehr als einem Sinne — die Wiederholung des tragischen Ausgangs vom Turmbau zu Babel? —

Auch die Bedingungen für die Ausarbeitung der Projekte waren aussergewöhnliche: Eine musterhaft detaillierte Umschreibung des Bauprogrammes war von der Studien-Kommission verfasst worden, sodass der Mitbewerber auf ein vorzügliches Unterlagenmaterial mit Wegleitung über die mannigfachen Betriebsfunktionen aufbauen konnte. In knapp einem halben Jahre musste ein riesiger Baukomplex erdacht werden, sodass im allgemeinen nur grosse Architekturbureaux mit der nötigen Gründlichkeit sich an die Arbeit machen konnten.

Der interessanteste und vom akustischen Standpunkt aus betrachtet weitaus schwierigste Teil liegt im *Grossen Versammlungs-Saal*, für den das Programm vorschrieb, dass rund 2700 Personen, zum Teil mit sehr breiten Einzelplatzflächen, darin Platz finden müssen. Dies entspricht bei rationeller Aufteilung ungefähr 3000 m² Sitzfläche (einschliesslich der Zwischenräume), und davon muss wieder — aus organisatorischen Gründen, für Präsident, Delegierte und Sekretäre — etwas mehr als die Hälfte zusammenhängend im Parterre liegen, sodass eine Grundfläche des Saales von mindestens 1600 m² geschaffen werden musste.

Die Zuhörer, das sind die nicht handelnden Personen in ihrer Gesamtheit: Diplomaten, eingeladene Freunde, Presse und Publikum, können an höhern Stellen, auf Galerien untergebracht werden; diese Plätze müssen aber gute Sicht mit guten akustischen Eigenschaften bieten; handelt es sich doch darum, das Tun und Lassen der universellen Staatenleker-Versammlung mit Aug und Ohr zu verfolgen.

Es muss also von minimal 1600 m² Parterrefläche ausgegangen werden, und der Architekt hat nun die Wände, Decken und Galerien zu einer zweckmässigen und schönen Form aufzubauen, wobei wir bewussterweise die Zweckmässigkeit voranstellen, denn, um nocheinmal daran zu erinnern, *Verständigung* ist doch der Endzweck!

Solange der Architekt von einer der hergebrachten *Kunststilrichtungen* oder Schulen ausgeht, ist durch die Grundfläche auch schon die Höhenentwicklung (wir sprechen immer nur vom Innenraum des Saales) in nicht zu weiten Grenzen gegeben, woraus sich notwendigerweise, auch bei mässiger Höhenentwicklung, ein Saalvolumen in der Gegend von 30 bis 40 000 m³ als Minimum ergibt. Freier in dieser Beziehung sind die Vertreter der modernen *Zweckmässigkeits-Architektur;* aber hier zeigte es sich, dass rein sachliches Raumformungsbestreben auf noch viel grössere Saal-Volumina führen kann, und dies gerade aus der Absicht, gute akustische Eigenschaften zu erreichen.

Schon das Programm der Studienkommission weist an mehr als einer Stelle auf die Wichtigkeit guter Sprech- und Hörbarkeit hin, und auch sonst hatte man gleich das Gefühl, dass bei den voraussichtlich sehr grossen Saal-Dimensionen akustische Schwierigkeiten zu überwinden und Ueberraschungen nicht ausgeschlossen seien. Dies zeigt sich auch bei einer grossen Zahl der eingereichten Projekte, und — um es gleich hier vorwegzunehmen — es sind in der Tat zahlreiche Verfasser schwersten akustischen Fehlschlüssen zum Opfer gefallen, weil sie das akustische Problem meistens vom rein geometrischen Standpunkt aus ansahen. Die ganz wenigen, die den akustischen Vorgang als *Energieumsetzungs-Problem* fühlten, haben dies mit grossenteils ganz ungenügenden Spezialkenntnissen angepackt: sie waren wohl qualitativ, nicht aber quantitativ auf dem richtigen Wege. Mit dieser Feststellung ist gleichzeitig auch die Kluft gekennzeichnet, die zwischen der alten, geometrischen Vorstellung und der neuen, auf physikalischen Messungen und physiologischen Beobachtungen beruhenden modernen Raumakustik besteht.

Es kann nicht bestimmt genug darauf hingewiesen werden, dass die an und für sich sehr kleinen mechanischen Energiewerte, die von einer Schallquelle — seien es Instrumente oder die menschliche Stimme — in den Raum gesendet werden, solange noch Hörempfindung im Ohr erwecken, bis sie, infolge von Ableitung durch die Wände oder durch Rückwurfverluste an den Wänden, an der Decke, am Boden, in den Gallerietaschen usw. sich genügend aufgebraucht haben, d. h. absorbiert worden sind. Es ist also ein *Energieverbrauchs-Vorgang*, in dem die physikalischen Grössen: Länge, Masse und Zeit enthalten sind.

Wenn eine Schallquelle in einem Raum ertönt und ihre Emission plötzlich gestoppt wird, so verschwindet die Schallvibration in der Raumluft nicht sofort; dies kennen wir ja alle aus Erfahrung. Wir wissen ferner, dass der Ausklingprozess, der *Nachhall,* in grossen und leeren Räumen länger dauert als in kleinen oder reichmöblierten, oder stark mit Menschen besetzten Räumen. Weil nun aber