

**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 103/104 (1934)  
**Heft:** 6

**Artikel:** Note II relative au coup de bélier et à son influence sur le réglage automatique des turbines  
**Autor:** Jaeger, Charles  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-83156>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 09.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

INHALT: Note II relative au coup de bélier et à son influence sur le réglage automatique des turbines. — Linsebhühl-Bau in St. Gallen. — Touring-Hotel in Zürich. — Das neue Rom. — Elektrische Erwärmung von Beton. — Mitteilungen: Der Kurzschluss-Schutz von Wechselstromnetzen. Einheitsbauart einer Kleinlokomotive der Deutschen Reichsbahn. Schnelltriebwagen Littorina. Originelle Flüssigkeitsbehälter.

Elektroschweisskurs des S.E.V. Eidgen. Techn. Hochschule. Neue Stromlinienwagen am Genfer Automobilsalon. — Wettbewerbe: Erweiterungsplan der Gemeinde Lenzburg. Katholische Kirche in Bruggen-St. Gallen. Wandschmuck in der E. T. H. — Nekrolog: William Martin. — Literatur. — Mitteilungen der Vereine. — Schweizer. Verband für die Materialprüfungen der Technik. — Sitzungs- und Vortrags-Kalender.

## Band 103

Der S. I. A. ist für den Inhalt des redaktionellen Teils seiner Vereinsorgane nicht verantwortlich. Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet.

## Nr. 6

## Note II relative au coup de bélier et à son influence sur le réglage automatique des turbines.

Par CHARLES JAEGER, Ing. dipl. E.P.F., Dr. ès sc. techn.

## INTRODUCTION.

**Généralités.** Toute manœuvre de l'obturateur d'une conduite sous pression provoque dans cette dernière des oscillations de pression connues sous le nom général de *coup de bélier*. L. Allievi<sup>1)</sup> a résolu — d'une façon que l'on peut estimer définitive — le problème du coup de bélier dans une conduite de section constante, débouchant d'un bassin infiniment grand (Fig. 1). Nous avons cherché à généraliser le problème et avons traité dans notre „Théorie générale du coup de bélier“<sup>2)</sup>, le cas des oscillations de pression dans un système complexe quelconque comprenant une conduite de section variable, avec chambre d'équilibre, prismatique ou non (c'est à dire: chambre avec col d'entrée, avec étranglement, avec partie inférieure tubulaire etc.) et galerie de mise en charge (Fig. 2). Nos calculs ont prouvé que le phénomène de coup de bélier intéresse non pas la seule conduite forcée, mais l'ensemble du système décrit, et qu'un calcul complet s'impose si l'on veut éviter de dangereux mécomptes.

Notre „Théorie générale“ permet le calcul des surcharges en un point quelconque du système „conduite forcée — chambre d'équilibre — galerie en charge“ pour une manœuvre quelconque de l'obturateur, situé à la base de la conduite.

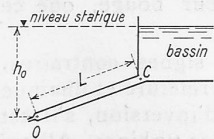


Fig. 1.

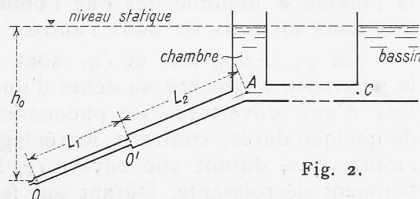


Fig. 2.

Un second problème retiendra aujourd'hui notre attention: nous étudierons l'influence du coup de bélier sur le réglage automatique des groupes hydro-électriques. Le régulateur d'un groupe hydro-électrique a pour mission d'équilibrer le couple moteur de la turbine et le couple résistant, c'est à dire la puissance demandée à la génératrice électrique. Or, les manœuvres de l'obturateur provoquent des surpressions lors de la fermeture et des sous-pressions lors de l'ouverture de l'obturateur. En certains cas, la puissance livrée à la turbine peut, en conséquence, varier en sens contraire de la puissance demandée: le mouvement du régulateur accentue le déséquilibre, et le réglage devient impossible. Nous verrons qu'il en sera parfois ainsi au début des manœuvres de l'obturateur.

<sup>1)</sup> L. Allievi. *Teoria generale del moto perturbato dell'acqua nei tubi in pressione*. Milan 1903. Traduction allemande par Dubs-Bataillard: „Allgemeine Theorie über die veränderliche Bewegung des Wassers in Leitungen“. 1<sup>re</sup> partie. Berlin 1909.

L. Allievi. „Teoria del colpo d'ariete“. Milan 1913. Traduction Gaden: „Théorie du coup de bélier“. Paris 1921.

<sup>2)</sup> Charles Jaeger. „Théorie générale du coup de bélier“. Application au calcul des conduites à caractéristiques multiples et des chambres d'équilibre. Ouvrage publié sous les auspices du Laboratoire de Recherches hydrauliques annexé à l'Ecole Polytechnique Fédérale à Zurich. Paris, Dunod. 1933.

Voir encore: „Le Génie Civil“ du 23 décembre 1933. Nous aborderons, en outre, dans une série de notes complémentaires, divers problèmes en relation avec le coup de bélier. Ces notes seront numérotées I., II., III. ... dans l'ordre chronologique de rédaction.

Allievi a soumis ce problème à une analyse rigoureuse dans une récente étude<sup>3)</sup> qui complète de façon remarquable la théorie du coup de bélier limitée au cas d'une conduite à section constante. Allievi y expose, en outre, de très intéressantes considérations sur les „tubes piézométriques d'extrémité“ et „les chambres d'air“.

Nous avons mis en lumière, dans notre „Théorie générale“, l'influence des variations de section des conduites et le rôle des chambres d'équilibre. Des exemples numériques nombreux nous ont permis de montrer combien le calcul des surcharges est sensible à la présence de pareilles discontinuités. Or, la puissance de l'eau sortant de la conduite est une fonction de la puissance  $\frac{3}{2}$  des pressions. Il est donc a fortiori certain que le réglage des turbines sera influencé par des discontinuités de toute nature. Il importe donc de reprendre l'étude d'Allievi et d'en étendre les résultats aux cas complexes que le technicien rencontre en pratique. Il est évident que nous ferons, au cours de notre travail, de nombreux renvois à notre „Théorie générale“, ainsi qu'à l'étude d'Allievi.<sup>4)</sup>

**Le coup de bélier.** Considérons un système complexe, tel celui de la Fig. 2, et soit  $\mu_1 = \frac{2L_1}{a_1}$  la période d'oscillation dans le tronçon  $OO'$  que nous choisissons comme unité de temps. On montre que le coup de bélier est un phénomène rythmique de période  $\mu_1$  et que la pression de l'obturateur est donnée à chaque instant 1, 2, 3, ... par le système d'équations:

$$\begin{aligned} h_1 - h_0 &= \frac{a_{III}}{g} (c_0 - c_1) \\ [37a]^{5)} \quad a_1 h_1 + h_2 - h_0 (1 + a_1) &= \frac{a_{III}}{g} [a_1 c_1 - c_2 + c_0 (1 - a_1)] \quad (1) \\ a_2 h_2 + h_3 - h_0 (1 + a_2) &= \frac{a_{III}}{g} [a_2 c_2 - c_3 + c_0 (1 - a_2)] \end{aligned}$$

dans lesquelles  $h_k$  et  $c_k$  sont la pression et la vitesse devant l'obturateur et  $a_k$  une fonction de réflexion qu'il s'agit de déterminer de cas en cas.

Dans le cas d'une conduite de section constante débouchant d'un bassin infiniment grand, nous avons réflexion totale au point C (Fig. 2) et  $a_k \equiv 1$ . Nous retrouvons alors les „Séries enchaînées d'Allievi“.

$$\begin{aligned} h_1 - h_0 &= \frac{a_{III}}{g} (c_0 - c_1) \\ [7] \quad h_1 + h_2 - 2h_0 &= \frac{a_{III}}{g} (c_1 - c_2) \quad (2) \\ h_2 + h_3 - 2h_0 &= \frac{a_{III}}{g} (c_2 - c_3) \end{aligned}$$

Nous écrirons à l'avenir les équations (1) et (2) en valeurs relatives, en posant  $\zeta_k^2 = \frac{h_k}{h_0}$  et  $c_k = \eta_k c_0 \zeta_k$ .  $\eta_k$  est le degré d'ouverture relatif de l'obturateur.

<sup>3)</sup> L. Allievi. „Il colpo d'ariete e la regolazione delle turbine“. L'Elettrotecnica, 25 février 1932. Traduction par P. Oguey, dans la Revue générale de l'Electricité, 1<sup>er</sup> juillet 1933. — Voir également le Bulletin Technique de la Suisse Romande, 28 octobre 1933.

<sup>4)</sup> Notre texte primitif a dû être raccourci considérablement pour pouvoir être accueilli par la „Schweizerische Bauzeitung“ — que nous remercions ici pour son obligeance.

<sup>5)</sup> Les chiffres entre crochets [...] se rapportent à notre „Théorie générale“.

Dans le cas général, la fonction  $\alpha_k$  est différente de 1. Le problème général est donc ramené à l'étude de la fonction  $\alpha_k$  et de ses propriétés. Nous avons montré dans notre "Théorie générale" que l'on peut développer explicitement  $\alpha_i$  sous forme de séries. Les formules [33], [60], [77] et [90] de notre ouvrage donnent des expressions caractéristiques de cette fonction, pour divers types de conduites. Nous avons exposé dans une note ultérieure<sup>6)</sup>, une méthode de calcul par récurrence, qui peut être parfois plus avantageuse. (Nous désignerons à l'avenir cette note sous le nom de Note I.)

Dans le cas de basses chutes, il faudra tenir compte des pertes de charge et de la hauteur représentative de la vitesse cinétique, qui ont été négligées, soit par Allievi, soit par nous-même, pour le calcul des formules (1) et (2).

Nous inspirant des travaux de Bergeron<sup>7)</sup>, nous avons développé, dans la Note I, une *méthode graphique générale* qui permet de résoudre le problème du coup de bélier dans le cas complexe où il faut tenir compte des pertes de charge aussi bien que des discontinuités.

Nous sommes donc à même de calculer les variations de pression dues au coup de bélier, dans tous les cas, même les plus complexes.

#### ÉTUDE DU RÉGLAGE DES TURBINES.

*Données générales.* La puissance de l'eau sortant de la conduite est donnée à un instant quelconque en kilogrammètres, en fonction du débit  $Q_k$  en m<sup>3</sup>/sec par :

$$N = 1000 Q_k h_k \quad (3)$$

Nous définissons, en conséquence, la *valeur relative de la puissance de l'eau*, par :

$$w_k = \frac{1000 Q_k h_k}{1000 Q_0 h_0} = \eta_k \zeta_{*k}^2 \quad (4)$$

Le problème du réglage des turbines peut être ramené à l'étude des lois de variation de la fonction  $w_k$ , ou encore à celle du signe de la dérivée  $\frac{\partial w_k}{\partial \eta_k}$ . Lorsque cette dérivée est positive, la puissance de l'eau diminue au cours d'une fermeture et augmente au cours d'une ouverture: le réglage est possible.

Le calcul du  $PD^2$  à donner aux masses de 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 de durée  $\tau = \Theta \mu$ , soit :

$$E = 1000 Q_0 h_0 \mu \int_0^\Theta w dt \quad (5)$$

ou encore, de la *valeur relative* de l'énergie totale débitée :

$$e = \int_0^\Theta w dt = \sum_0^\Theta w_k = K \frac{e_*}{2}, \quad (6)$$

en prenant le battement  $\mu$  comme unité de temps,  $K$  étant un facteur et  $Q_* = \frac{a c_0}{2g h_0}$ . Il sera utile également de connaître le facteur de majoration  $\pi$  qu'il faut introduire dans les formules habituelles du  $PD^2$  pour tenir compte de l'influence du coup de bélier. Or, l'expression de l'énergie relative débitée au cours de la fermeture sans tenir compte du coup de bélier étant  $\frac{\Theta}{2}$ , on a :

$$\pi = K \frac{e_*}{2} : \frac{\Theta}{2} = K \frac{e_*}{\Theta} \quad (7)$$

La méthode générale que nous préconisons est le calcul rigoureux, point par point, de  $\zeta_{*k}^2$  au moyen de (1) ou (2), de  $w_k$  au moyen de (4), et de l'intégrale représentant l'énergie totale débitée  $E$  au moyen de (5) ou de (6). En effet, le réglage des turbines sera particulièrement

délicat dans le cas des basses chutes pour lesquelles, le frottement n'étant pas négligeable, la méthode de calcul générale s'impose.

Cependant, Allievi a estimé, avec raison, qu'il était utile de développer une méthode de calcul par valeurs limites, méthode de beaucoup plus rapide que le calcul point par point, et qui permet d'obtenir très vite des résultats exacts, à condition de négliger les pertes par frottements et la vitesse cinétique. Nous avons nous-même développé, dans notre "Théorie générale", des méthodes analogues.

Nous chercherons à connaître d'une part la valeur  $e = \sum w_k$ , d'autre part, le battement  $j$  pour lequel le produit  $\eta_k \zeta_{*k}^2 = w_k$ , d'abord supérieur à l'unité, est à nouveau égal à 1, c'est à dire le moment à partir duquel le réglage de la turbine commence réellement à fonctionner.

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

Au cours de la première phase ( $t < \frac{2L}{a}$ ), tout se passe comme si la conduite était infinie.

Un calcul simple conduit Allievi à l'équation :

$$\frac{\partial w_1}{\partial \eta_1} = \frac{\zeta_{*1} - 2Q_* \eta_1}{\zeta_{*1} + Q_* \eta_1} \zeta_{*1}^3, \quad (8)$$

équation qui exprime la loi de variation de la puissance  $w_1$  pendant la phase de coup direct. Au début de la manœuvre, on a donc :

$$\left(\frac{\partial w_1}{\partial \eta_1}\right)_0 = \frac{1 - 2Q_*}{1 + Q_*} \quad (9)$$

d'où l'on déduit que :

Si  $Q_* < 0,5$ ,  $\partial w_1$  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; le réglage de la turbine est aisé.

Si  $Q_* = 0,5$ , 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  $Q_* > 0,5$ ,  $\partial w_1$  et  $\partial \eta_1$  sont de signes contraires, la puissance augmente au début d'une fermeture et diminue lors d'une ouverture. Ce phénomène d'inversion, s'il est de quelque durée, contrarie le réglage des turbines. Allievi montre que, durant une ouverture, la puissance est constamment décroissante. Durant une fermeture, elle croît jusqu'à un maximum, puis décroît, en repassant par la valeur  $w_0 = 1$ .

*Puissance de l'eau sortant d'une conduite quelconque, à caractéristiques multiples.*

La "Théorie générale" et la "Note I" nous permettent de calculer sans difficulté, soit analytiquement (équation (1)), soit graphiquement, la valeur de la charge relative  $\zeta_{*k}^2$  et, par le fait, la valeur relative de la puissance de l'eau à un instant quelconque, ainsi que l'énergie totale débitée durant la fermeture, en remplaçant l'intégrale (6) par une sommation des valeurs  $w_k$ , aux instants de rythme entier 0, 1, 2, ...  $k-1$ ,  $k$ ,  $k+1$ , ... (l'indice  $k$  étant affecté aux battements dans le secteur  $OO'$  (Fig. 2).

Nous avons longuement exposé dans notre "Théorie générale" les méthodes de calcul point par point, tant analytiques que graphiques, pour les cas les plus divers. On ne saurait donc rencontrer aucune difficulté à donner des valeurs numériques correctes aux expressions (4) et (6) en passant par le calcul point par point.

Nous allons illustrer notre exposé de quelques exemples numériques que nous traiterons, non par le calcul direct, mais par un calcul de valeurs limites, analogue à celui proposé par Allievi. Nous tiendrons compte des discontinuités des conduites, mais non des pertes de charge, en sorte que nos valeurs numériques seront entièrement comparables à celles données par Allievi pour une conduite à section constante.<sup>8)</sup>

<sup>8)</sup> L. Allievi, "Il colpo d'ariete e la regolazione delle turbine".

<sup>6)</sup> Charles Jaeger, Note I sur la théorie générale du coup de bélier. Exposé d'une méthode graphique générale. Cette note est encore inédite.

<sup>7)</sup> Bergeron, "Variations de régime dans les conduites d'eau". Revue générale de l'Electricité, du 14 mai 1932.



*Charge relative limite.* Admettons une fermeture linéaire, définie par la loi:

$$\eta_1 = 1 - \frac{k}{\Theta},$$

$\Theta$  étant le temps de fermeture complète, exprimé en battements de la conduite. On sait que la série des valeurs successives  $\zeta_{*1}^2, \zeta_{*2}^2, \zeta_{*3}^2, \dots$  satisfaisant aux séries enchaînées d'Allievi (2), tendent vers une valeur limite  $\zeta_m^2$ , atteinte assez rapidement, et donnée par l'équation:

$$[15] \quad \zeta_{*m}^2 - \frac{Q_*}{\Theta} \zeta_{*m} - 1 = 0. \quad (10)$$

Nous avons montré dans notre „Théorie générale“ que c'est là un fait général pour la fermeture linéaire de l'obturateur. Nous avons pu calculer également la limite  $\zeta_m$  vers laquelle tend  $\zeta_{*k}$  dans le cas de conduites avec discontinuités. On trouve:

$$[122] \quad (\alpha_{m-1} + 1) (\zeta_{*m}^2 - 1) = 2Q_* \left( \zeta_{*m}^{\alpha_{m-1}} + 1 - \alpha_{m-1} \right) \quad (11)$$

d'où encore:

$$[122a] \quad \zeta_{*m} = \frac{Q_*^{\alpha_{m-1}} + \sqrt{(Q_*^{\alpha_{m-1}})^2 + (1 + \alpha_{m-1})[1 + \alpha_{m-1} + 2Q_*(1 - \alpha_{m-1})]}}{1 + \alpha_{m-1}} \quad (12)$$

équations dans lesquelles  $\alpha_{m-1}$  est la limite de  $\alpha_k$ . Nous avons exposé en détail, dans notre „Théorie générale“, le calcul, parfois complexe, de  $\alpha_{m-1}$ .

*Régulation pendant la marche de la turbine.* Le temps, ou, si l'on préfère, le nombre de rythmes durant lesquels, en manœuvre de fermeture, l'on a  $w_k > 1$ , peut donner une indication sur la plus ou moins grande facilité de réglage de la turbine.

A la suite d'Allievi, nous déterminons ce nombre de rythmes comme suit:

Nous admettons que, lorsque  $w_k$  reprend la valeur de régime  $w_0 = 1$ , la charge  $\zeta_k^2$  est déjà très voisine de la limite  $\zeta_m^2$  calculée d'après (10) ou (12), (ou donnée à priori). Cette hypothèse est admissible puisqu'il suffit, en pratique, de connaître le battement cherché  $j$  à une unité près. On peut donc poser:

$$\eta_k \zeta_{*m} = \left(1 - \frac{j}{\Theta}\right) \zeta_{*m}^3 = 1$$

et:

$$j = (1 - \zeta_{*m}^{-3}) \Theta \quad (13)$$

*Energie débitée pendant une fermeture totale.* Nous allons exposer un mode de calcul approximatif de l'intégrale  $e = \int w dt$ , qui évite le calcul fastidieux de la somme  $\sum w_i$  par voie directe. Il est évident que le calcul approché ne saurait être appliqué indistinctement à tous les cas, et qu'un calcul direct de contrôle sera indiqué dès qu'on peut craindre que l'influence des pertes de charge n'est plus négligeable.

Cette réserve étant faite, nous supposons que la série des valeurs  $\zeta_{*i}^3$  puisse être représentée (Fig. 3) avec une approximation suffisante par les ordonnées d'une parabole de degré  $p$ , de sommet  $B$  (ordonnée  $\zeta_{*m}^3$ ) et dont l'inclinaison à l'origine  $A$  doit satisfaire à la première des équations (1); cette parabole est définie par l'équation:

$$\zeta_{*i}^3 = \zeta_{*m}^3 - (\zeta_{*m}^3 - 1) \eta^p \quad (14)$$

On trouve, en posant  $\eta = 1 - \frac{k}{\Theta}$ :

$$\int_0^\Theta w dt = \zeta_{*m}^3 \int_0^\Theta \eta dt - (\zeta_{*m}^3 - 1) \int_0^\Theta \eta^{p+1} dt$$

$$\int_0^\Theta w dt = \left( \frac{\zeta_{*m}^3}{2} - \frac{\zeta_{*m}^3 - 1}{p+2} \right) \Theta = \frac{p \zeta_{*m}^3 + 2}{p+2} \frac{\Theta}{2} \quad (15)$$

$\zeta_m$  et  $\Theta$  sont en outre liés par les relations (10) ou (11).

Pour déterminer  $p$ , nous différencions l'équation (14); il vient, en posant  $t=0$ ,  $\zeta_{*0} = 1$  à l'origine  $A$  de la courbe:

$$\left( \frac{d\zeta_{*i}}{dt} \right)_0 = \frac{\zeta_{*m}^3 - 1}{3} \frac{p}{\Theta}.$$

Différencions également la première des équations (1), en posant  $t=0$ ,  $\eta_0 = 1$  et  $\zeta_{*0} = 1$ :

$$\left( \frac{d\zeta_{*i}}{dt} \right)_0 = \frac{Q_*}{Q_* + 1} \frac{1}{\Theta}.$$

On trouve aisément:

$$p = \frac{3Q_*}{(Q_* + 1)(\zeta_{*m}^3 - 1)} \quad (16)$$

Les équations (15) et (16) résolvent le problème.

Allievi a dressé, pour le cas particulier d'une conduite à caractéristique unique un *abaque général*, donnant  $\Theta$ ,  $j$  et  $k$  pour diverses valeurs de  $Q_*$  et de la charge  $\zeta_{*m}^2$  du coup de bélier. Il y a trop de types différents de conduites à caractéristiques multiples pour faire de même dans le cas général.

Pour fixer les idées, nous reprendrons un exemple traité par Allievi. Il admet  $\zeta_{*m}^2 = 1,22$ , ou encore  $\Theta = 5 Q_*$ ;  $Q_*$  variant de 1 à 7, et  $\alpha \equiv 1$ . Considérons des conduites caractérisées par le même rapport  $\Theta = 5 Q_*$  et de même longueur absolue que celles étudiées par Allievi, mais présentant en leur point milieu une discontinuité de section, telle que  $Q_2 = \frac{1}{2} Q_1$ .

Calculons les coefficients de réflexion et de transmission<sup>9)</sup>:

$$\begin{aligned} r_1 &= 0,333 & s_1 &= 0,667 \\ r_2 &= -0,333 & s_2 &= 1,333 \end{aligned}$$

Nous prenons comme unité de temps le battement  $\mu_1 = \frac{\mu}{2} = \frac{L}{a}$  dans le tronçon inférieur.  $\Theta_1$ , temps de fermeture relatif par rapport à ce tronçon, sera donc tel que  $\Theta_1 = 2 \Theta$ ; c'est à dire que pour un même temps de fermeture  $\tau$ , il y aura deux fois plus d'oscillations dans le tronçon qu'il y en avait dans la conduite d'Allievi entière. Par contre, la durée de chaque oscillation sera réduite de moitié. Pour pouvoir comparer nos résultats avec ceux d'Allievi<sup>10)</sup>, nous prendrons donc la moitié de  $\sum_1 w_k$ . On trouve:

$Q_*$	1	3	5	7
$\Theta_1$	10	30	50	70
$\alpha_{m-1}$	0,9444	0,983	0,990	0,993
$\zeta_{*m}^2$	1,075	1,073	1,073	1,073
$\zeta_{*m}^3$	1,158	1,151	1,151	1,151
$\zeta_{*m}^3$	1,248	1,236	1,236	1,236
$p$	6,18	9,54	10,59	11,11
$\frac{1}{2} \sum_1 w_k$	2,96	8,95	14,99	21
$\sum w_i^{10)}$	3,207	9,643	16,09	22,537
$\frac{1}{2} \Theta$	2,5	7,5	12,5	17,5

Pour permettre une comparaison utile, nous avons reproduit aux deux dernières lignes, d'une part, la  $\sum w_i$  pour des conduites à caractéristique unique et la valeur  $\frac{1}{2} \Theta$ , correspondant à un coup de bélier nul.

<sup>9)</sup> Charles Jaeger. „Théorie générale“, pages 44 et 45.

<sup>10)</sup> Calculé par Allievi. „Il colpo d'ariete e la regolazione delle turbine“.

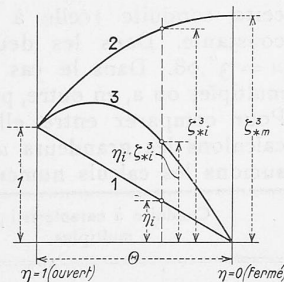


Fig. 3.

1. Courbe donnant le degré d'ouverture  $\eta_i$ .
2. Cour



Abb. 4. Front an der Linseühlstrasse.

Der Linseühlbau in St. Gallen. Arch. M. Hauser, St. Gallen und Zürich.

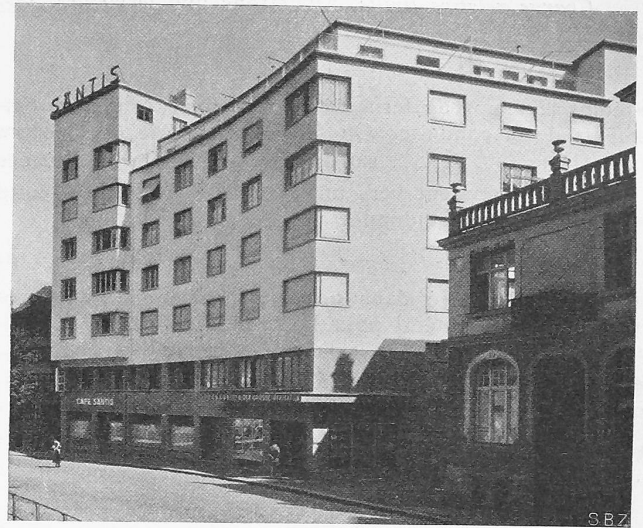
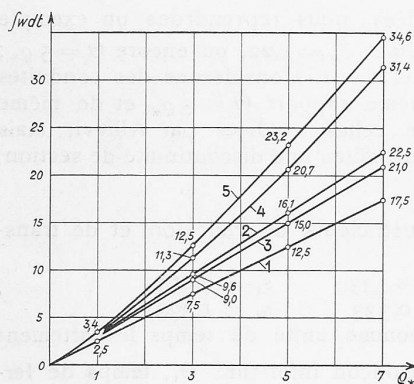


Abb. 5. Front Lämmlisbrunnstrasse.

Fig. 4. Valeur de l'intégrale  $\varepsilon = \int_0^\Theta w dt$  pour  $\Theta = 5 Q_*$ .

1. Courbe  $\frac{1}{2} \Theta$ ; 2. Conduites de section constante calculées par Allievi; 3. Conduites avec une discontinuité; 4. Conduites avec chambres d'équilibre  $\alpha_m = 0,9$ ; 5. Conduites avec chambre d'équilibre  $\alpha_m = 0,8$ .

On constate que les valeurs  $\zeta_{*m}^2$  sont plus petites que 1,22, valeur dont était parti Allievi. De plus, les sommes  $\frac{1}{2} \sum w_k$ , que nous avons calculées, restent comprises entre  $\frac{1}{2} \Theta$  et la  $\sum w_i$  d'une conduite à caractéristique unique. Pour plus de clarté, nous avons reporté sur la Fig. 4, courbes 1, 2 et 3, les valeurs  $\frac{1}{2} \Theta$ ,  $\sum w_i$  (conduite d'Allievi) et  $\frac{1}{2} \sum w_k$  (conduite avec discontinuité).

Pour  $\zeta_m^2 = 1,22$  (conduite d'Allievi) on trouve aisément (formule 13)  $\frac{j}{Q_*} = 1,298$ , alors que pour des conduites à caractéristiques multiples, la formule (13) donne  $\frac{j}{Q_*}$  compris entre 0,9475 et 0,9875.

Le calcul montre donc — ce qui était à prévoir — qu'une discontinuité du type envisagé facilite le réglage des turbines. Les calculs que nous venons d'effectuer se rapportent à des familles de conduites définies par la condition  $\zeta_m^2 = 1,22$ , soit  $\Theta = 5 Q_*$ ,  $Q_*$  variant de 1 à 7. Ce sont des conduites de hauteur de chute moyenne ou basse.

Nous allons envisager le problème sous un autre aspect et examiner rapidement, non plus un groupe de conduites, mais une conduite déterminée, le temps de fermeture étant choisi comme variable indépendante.

Nous reprenons à cet effet le cas d'une conduite que nous avons examinée en détail dans notre „Théorie générale du coup de bélier“. La conduite en question<sup>11)</sup> est constituée par un tronçon supérieur de 3,00 m de diamètre,

<sup>11)</sup> Voir: Charles Jaeger. „Théorie générale“, pages 131 à 167 et fig. 23.

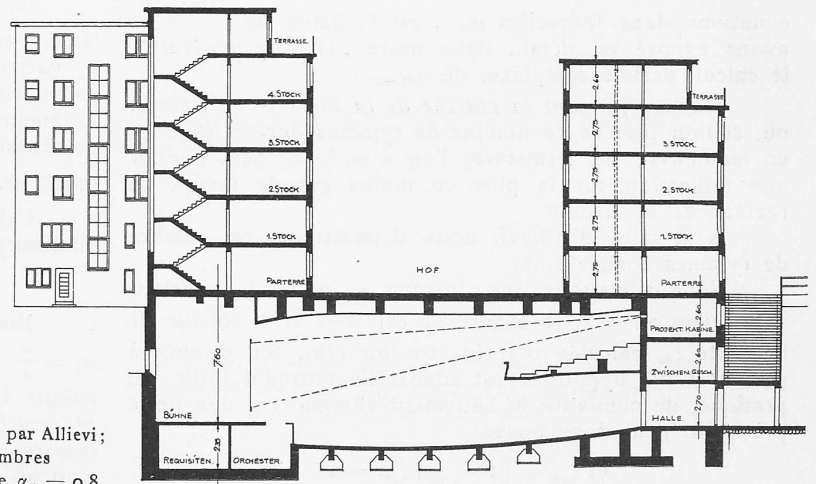


Abb. 3. Längsschnitt 1:400 in der Axe des Kinosaaes.

exécuté en béton armé, et d'un tronçon en tôle d'acier de 2,10 m de diamètre. Les longueurs respectives des deux tronçons sont de 1634 m et de 508 m. La hauteur de chute totale est de 142,80 m, la pression au point de discontinuité s'élève à 51,80 m. Nous allons comparer cette conduite réelle à une conduite fictive de section constante. Dans les deux cas, nous avons  $Q_* = 1,1$  et  $\mu = 3'',98$ . Dans le cas de la conduite à caractéristiques multiples on a, en outre, pour le tronçon inférieur  $\mu_1 = 1'',14$ . Pour comparer entre elles les valeurs numériques, nous calculons les grandeurs  $\mu \sum w_i$  au lieu de  $\sum w_i$ . Nous résumons les calculs numériques dans le tableau suivant<sup>12)</sup>:

	Conduite à caractéristiques multiples			Conduite à caractéristique unique		
	5''	10''	20''	5''	10''	20''
$\tau$						
$B_{*m}$	1,161	0,440	0,196	1,335	0,543	0,243
$\zeta_{*m}$	1,4712	1,200	1,094	1,527	1,242	1,115
$\zeta_{*m}^3$	3,18	1,728	1,308	3,565	1,918	1,387
$p$	0,72	2,158	5,1	0,613	1,712	4,06
$\mu \sum w_k$	3,95	6,28	12,23	4,00	7,12	12,6

En ce cas également, l'influence de la discontinuité se fait sentir, quoique de façon inégale. (à suivre)

<sup>12)</sup> Voir: Charles Jaeger. „Théorie générale“, pages 138 à 141.