

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

Autor(en): **Jaeger, Charles**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **103/104 (1934)**

Heft 6

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-83156>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

INHALT: Note II relative au coupe de béliet et à son influence sur le réglage automatique des turbines. — Linsebhil-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. — Nekrologe: 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 béliet 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 béliet*. L. Allievi¹⁾ a résolu — d'une façon que l'on peut estimer définitive — le problème du coup de béliet 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 béliet“²⁾, 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 béliet 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.

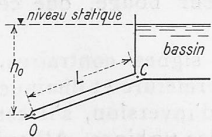


Fig. 1.

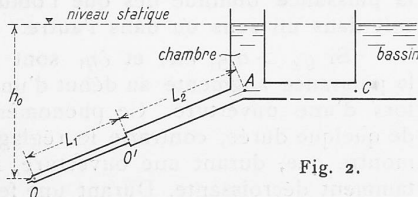


Fig. 2.

Un second problème retiendra aujourd'hui notre attention: nous étudierons l'influence du coup de béliet 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.

¹⁾ 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^{re} partie. Berlin 1909.

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

²⁾ Charles Jaeger. „Théorie générale du coup de béliet“. 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 béliet. 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 étude³⁾ qui complète de façon remarquable la théorie du coup de béliet 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 ³/₂ des pressions. Il est donc à 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.⁴⁾

Le coup de béliet. 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 béliet est un phénomène rythmique de période μ_1 et que la pression de l'obturateur est donnée à chaque instant 1, 2, 3, ... par le système d'équations:

$$h_1 - h_0 = \frac{a_{III}}{g} (c_0 - c_1)$$

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

$$a_2 h_2 + h_3 - h_0 (1 + a_2) = \frac{a_{III}}{g} [a_2 c_2 - c_3 + c_0 (1 - a_2)]$$

.....

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“.

$$h_1 - h_0 = \frac{a_{III}}{g} (c_0 - c_1)$$

$$[7] \quad h_1 + h_2 - 2h_0 = \frac{a_{III}}{g} (c_1 - c_2) \quad (2)$$

$$h_2 + h_3 - 2h_0 = \frac{a_{III}}{g} (c_2 - c_3)$$

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

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

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

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

Dans le cas général, la fonction α_k est différente de 1. Le problème général est donc ramené à l'étude de la fonction α_k et de ses propriétés. Nous avons montré dans notre „Théorie générale“ que l'on peut développer explicitement α_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 ultérieure⁶⁾, 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 Bergeron⁷⁾, 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 m³/sec par :

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

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

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

$$w_k = \eta_k \zeta_{*k}^3 \quad \dots \quad (4)$$

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 $\frac{\partial w_k}{\partial \eta_1}$. 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 :

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

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

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

en prenant le battement μ comme unité de temps, K étant un facteur et $\varrho_* = \frac{a c_0}{2g h_0}$. Il sera utile également de connaître le facteur de majoration π 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 :

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

La méthode générale que nous préconisons est le calcul rigoureux, point par point, de ζ_{*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 $\eta_k \zeta_{*k}^3 = w_k$, 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 :

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

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 :

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

d'où l'on déduit que :

Si $\varrho_* < 0,5$, ∂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; le réglage de la turbine est aisé.

Si $\varrho_* = 0,5$, 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 $\varrho_* > 0,5$, ∂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 ζ_{*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, ... $k - 1, k, k + 1, \dots$ (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.⁸⁾

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

⁷⁾ Bergeron. „Variations de régime dans les conduites d'eau“. Revue générale de l'Electricité, du 14 mai 1932.

⁸⁾ L. Allievi. „Il colpo d'ariete e la regolazione delle turbine“.

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

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

Θ étant le temps de fermeture complète, exprimé en battements de la conduite. On sait que la série des valeurs successives $\zeta_{11}^2, \zeta_{21}^2, \zeta_{31}^2, \dots$ satisfaisant aux séries enchaînées d'Allievi (2), tendent vers une valeur limite ζ_m^2 , atteinte assez rapidement, et donnée par l'équation:

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

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 ζ_{*m} vers laquelle tend ζ_{*k}^2 dans le cas de conduites avec discontinuités. On trouve:

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

d'où encore:

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

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

Réglage 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 ζ_k^2 est déjà très voisine de la limite ζ_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:

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

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

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 ζ_{*i}^3 puisse être représentée (Fig. 3) avec une approximation suffisante par les ordonnées d'une parabole de degré p , de sommet B (ordonnée ζ_{*m}^3) et dont l'inclinaison à l'origine A doit être satisfaisante à la première des équations (1); cette parabole est définie par l'équation:

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

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

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

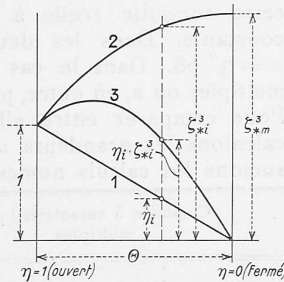


Fig. 3.
1. Courbe donnant le degré d'ouverture η_i .
2. Courbe des ζ_{*i}^3 (parabole de degré p).
3. Courbe des puissances $\eta_i \zeta_{*i}^3$.

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

ζ_m et Θ 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:

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

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

$$\left(\frac{d\zeta_{*i}^3}{dt} \right)_0 = \frac{Q_*}{Q_* + 1} \frac{1}{\Theta}$$

On trouve aisément:

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

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 Θ , j et k pour diverses valeurs de Q_* et de la charge ζ_{*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 $a \equiv 1$. 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 transmission⁹⁾:

$$r_1 = 0,333 \quad s_1 = 0,667$$

$$r_2 = -0,333 \quad s_2 = 1,333$$

Nous prenons comme unité de temps le battement

$\mu_1 = \frac{\mu}{2} = \frac{L}{a}$ dans le tronçon inférieur. Θ_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 τ , 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'Allievi¹⁰⁾, nous prendrons donc la moitié de $\sum_1 w_k$. On trouve:

Q_*	=	1	3	5	7
Θ_1	=	10	30	50	70
α_{m-1}	=	0,9444	0,983	0,990	0,993
ζ_{*m}	=	1,075	1,073	1,073	1,073
ζ_{*m}^2	=	1,158	1,151	1,151	1,151
ζ_{*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.

⁹⁾ Charles Jaeger. „Théorie générale“, pages 44 et 45.

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



Abb. 4. Front an der Linsebühlstrasse.

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

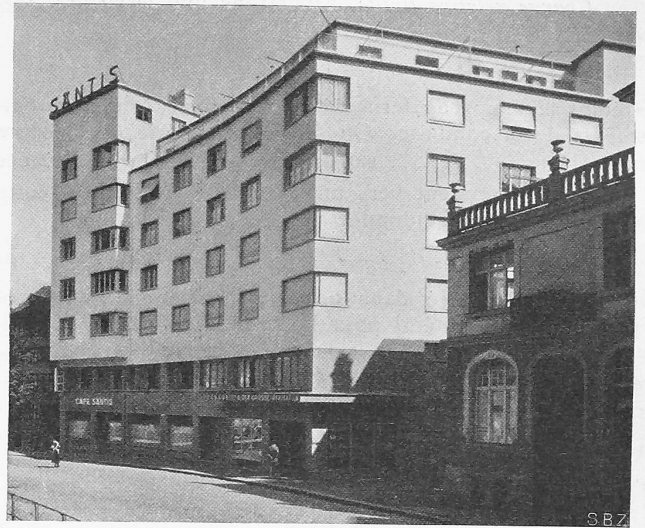


Abb. 5. Front Lämmlisbrunnstrasse.

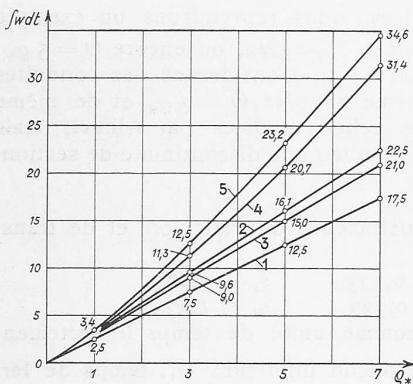


Fig. 4. Valeur de l'intégrale $\epsilon = \int_0^\Theta w dt$ pour $\Theta = 5 Q_*$.
 1. Courbe $\frac{1}{2} \Theta$; 2. Conduites de section constante calculées par Allievi;
 3. Conduites avec une discontinuité; 4. Conduites avec chambres d'équilibre $\alpha_m = 0,9$; 5. Conduites avec chambre d'équilibre $\alpha_m = 0,8$.

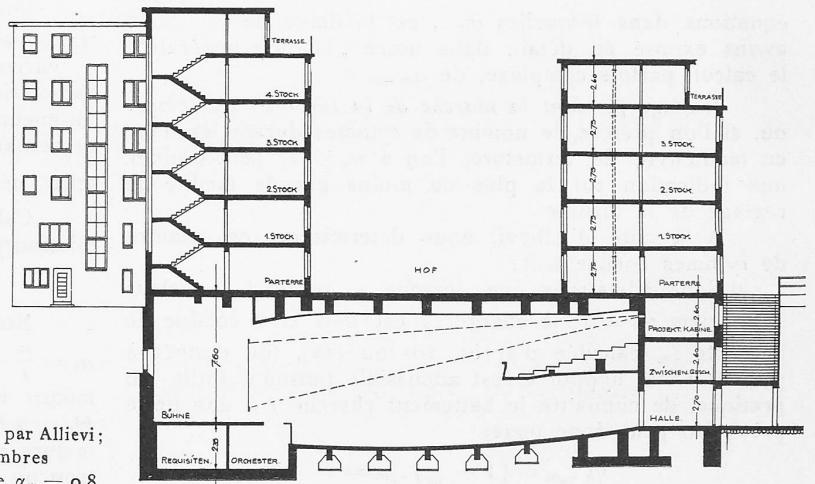


Abb. 3. Längsschnitt 1 : 400 in der Axe des Kinosaal.

On constate que les valeurs ζ_{*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) $\frac{i}{Q_*} = 1,298$, alors que pour des conduites à caractéristiques multiples, la formule (13) donne $\frac{i}{Q_*}$ 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 question¹¹⁾ est constituée par un tronçon supérieur de 3,00 m de diamètre,

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 $\mu \sum w_k$ au lieu de $\sum w_i$. Nous résumons les calculs numériques dans le tableau suivant¹²⁾:

	Conduite à caractéristiques multiples			Conduite à caractéristique unique		
	5''	10''	20''	5''	10''	20''
τ						
B_{*m}	1,161	0,440	0,196	1,335	0,543	0,243
ζ_{*m}	1,4712	1,200	1,094	1,527	1,242	1,115
ζ_{*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)

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

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