

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 62 (1936)
Heft: 22

Artikel: Contribution à l'étude expérimentale et analytique des chambres d'équilibre (suite et fin)
Autor: [s.n.]
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-47606>

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: 01.01.2026

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

BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

ABONNEMENTS :

Suisse : 1 an, 12 francs
Etranger : 14 francs

Pour sociétaires :
Suisse : 1 an, 10 francs
Etranger : 12 francs

Prix du numéro :
75 centimes.

Pour les abonnements
s'adresser à la librairie
F. Rouge & Cie, à Lausanne.

Paraissant tous les 15 jours

Organe de la Société suisse des ingénieurs et des architectes, des Sociétés vaudoise et genevoise des ingénieurs et des architectes, de l'Association des anciens élèves de l'Ecole d'ingénieurs de l'Université de Lausanne et des Groupes romands des anciens élèves de l'Ecole polytechnique fédérale. — Organe de publication de la Commission centrale pour la navigation du Rhin.

COMITÉ DE RÉDACTION. — Président : R. NEESER, ingénieur, à Genève. — Membres : *Fribourg* : MM. L. HERTLING, architecte ; A. ROSSIER, ingénieur ; *Vaud* : MM. C. BUTTICAZ, ingénieur ; E. ELSKES, ingénieur ; EPITAUX, architecte ; E. JOST, architecte ; A. PARIS, ingénieur ; CH. THÉVENAZ, architecte ; *Genève* : MM. L. ARCHINARD, ingénieur ; E. ODIER, architecte ; CH. WEIBEL, architecte ; *Neuchâtel* : MM. J. BÉGUIN, architecte ; R. GUYE, ingénieur ; A. MÉAN, ingénieur cantonal ; *Valais* : MM. J. COUCHEPIN, ingénieur, à Martigny ; HAENNY, ingénieur, à Sion.

RÉDACTION : H. DEMIERRE, ingénieur, 11, Avenue des Mousquetaires,
LA TOUR-DE-PEILZ.

CONSEIL D'ADMINISTRATION DU BULLETIN TECHNIQUE
A. DOMMER, ingénieur, président ; G. EPITAUX, architecte ; M.IMER.

ANNONCES

Le millimètre sur 1 colonne,
largeur 47 mm :

20 centimes.

Rabais pour annonces
répétées.

Tarif spécial
pour fractions de pages.

Régie des annonces :
Annonces Suisses S. A.
8, Rue Centrale (Pl. Pépinet)
Lausanne

SOMMAIRE : Contribution à l'étude expérimentale et analytique des chambres d'équilibre (suite et fin). — Concours restreint pour l'élaboration des plans du Pavillon suisse à l'Exposition internationale « Arts et Techniques dans la vie moderne », Paris 1937 (suite et fin). — Les trolleybus de Lausanne. — Enfin Génissiat ! — 1^{er} Congrès suisse pour le développement de l'utilisation du bois. — NÉCROLOGIE : Edouard Savary (hors-texte). — BIBLIOGRAPHIE. — CARNET DES CONCOURS.

COMMUNICATIONS DU LABORATOIRE D'HYDRAULIQUE
DE L'ÉCOLE D'INGÉNIEURS DE L'UNIVERSITÉ
DE LAUSANNE

Directeur : M. A. STUCKY, professeur.

Contribution à l'étude expérimentale et analytique des chambres d'équilibre.

(Suite et fin)¹

Chap. IV. — Etude analytique.

Comparaison des résultats analytiques et expérimentaux.

A. Généralités.

On pourrait admettre a priori que l'étude complète d'une chambre d'équilibre soit effectuée sur la seule base d'essais sur modèle. Il est indiqué, cependant, de compléter cette étude expérimentale par une étude analytique. Essais et études mathématiques contrôlent mutuellement leurs méthodes : Le calcul étant basé sur un certain nombre d'hypothèses pouvant laisser quelque doute quant aux résultats, les essais sur modèle permettront précisément d'évaluer l'approximation obtenue analytiquement. En outre, il n'est pas exclu que l'observation en laboratoire soit le point de départ d'une conception originale des phénomènes, conduisant elle-même à une interprétation mathématique nouvelle et plus conforme à la réalité, car par les essais on peut saisir avec plus de facilité des finesse qui échappent au calcul.

D'autre part, si l'on doutait des résultats numériques obtenus par l'expérience sur modèle réduit, le calcul fournirait un contrôle.

Nous nous bornerons ici à l'étude des mouvements d'oscillation des masses d'eau contenues dans l'ensemble galerie d'aménée-chambre d'équilibre, pour des manœuvres

vres instantanées de l'obturateur aval, et à l'étude de la stabilité de réglage à puissance constante.

B. Hypothèses à la base de l'étude analytique.

Nous nous placerons d'emblée dans le cas particulier signalé ci-dessus. On peut alors apporter quelques simplifications à l'étude générale des chambres d'équilibre à surfaces libres multiples.

1. Les surfaces libres sont voisines les unes des autres et groupées à l'extrémité aval de la galerie d'aménée, la longueur des galeries secondaires reliant les différents puits étant négligeable par rapport à la longueur totale de la galerie principale ; ce fait permet de négliger les pertes de charge dans les tronçons de galerie secondaire reliant les différents puits et d'admettre que le niveau dynamique de régime dans ces derniers y est le même.

2. L'inertie des volumes d'eau continue dans les chambres est négligeable par rapport à l'inertie de l'eau de la galerie principale ; par contre, dans une étude rigoureuse des mouvements localisés dans les galeries secondaires, il faudrait en tenir compte. Cependant, dans notre cas particulier, l'étude comparative des résultats analytiques et expérimentaux montre que l'on peut encore se permettre de négliger ici ces inerties sans que les conclusions en soient modifiées. C'est ce que nous avons fait dans ce qui suit en annulant les termes correspondants des équations fondamentales.

C. Equations différentielles du mouvement dans le cas de deux surfaces libres.

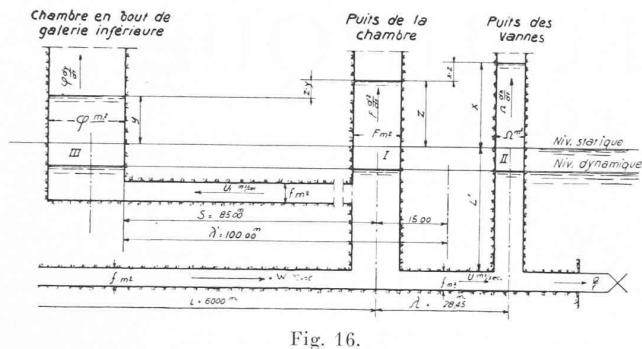
Si l'on se rapporte aux désignations de la fig. 16 les équations du mouvement sont les suivantes :

a) Mouvement dans la galerie principale.

$$(23) \quad \frac{L}{g} \frac{dw}{dt} + Z + P = 0$$

où $P = \delta w^2$.

¹ Voir *Bulletin technique*, du 26 septembre 1936, page 233.



Le signe « plus » convient pour un mouvement d'amont variable, le signe « moins » dans le cas contraire.

b) *Mouvement dans la galerie secondaire reliant les deux puits.*

$$(24) \quad \frac{\lambda}{g} \cdot \frac{dU}{dt} + \frac{L' + x}{g} \cdot \frac{dx}{dt} \cdot \frac{1}{U} \cdot \frac{\Omega}{f} \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{L' + z}{g} \cdot \frac{dz}{dt} \cdot \frac{1}{U} \cdot \frac{F}{f} \cdot \frac{d^2z}{dt^2} + x - z = 0$$

$$\text{où } \frac{L' + x}{g} \cdot \frac{dx}{dt} \cdot \frac{1}{U} \cdot \frac{\Omega}{f} \text{ et } \frac{L' + z}{g} \cdot \frac{dz}{dt} \cdot \frac{1}{U} \cdot \frac{F}{f}$$

sont négligeables devant les autres termes.

Les équations de continuité sont :

$$(25) \quad j_w = F \frac{dz}{dt} + fU$$

$$(26) \quad jU = \Omega \frac{dx}{dt} + Q$$

D. *Oscillation des masses d'eau dans l'ensemble galerie d'aménée chambre d'équilibre pour des manœuvres instantanées de l'obturateur aval dans le cas de deux surfaces libres voisines.*

Les manœuvres étant instantanées, on a

$$(27) \quad \frac{dQ}{dt} = 0$$

pendant le mouvement.

Dans ces conditions, on peut éliminer, dans chacune des équations fondamentales, (23) et (24), en tenant compte des équations de continuité les deux fonctions x et z qui définissent le mouvement des plans d'eau dans la chambre ; on a en effet :

$$(28) \quad \frac{\lambda\Omega}{gf} \cdot \frac{LF}{gj} \cdot \frac{d^4x}{dt^4} + \left[\frac{L(F + \Omega)}{gf} + \frac{\lambda\Omega}{gf} \right] \frac{d^2x}{dt^2} + x + P = 0$$

$$(29) \quad \frac{\lambda\Omega}{gf} \cdot \frac{LF}{gj} \cdot \frac{d^4z}{dt^4} + \left[\frac{L(F + \Omega)}{gf} + \frac{\lambda\Omega}{gf} \right] + \frac{d^2z}{dt^2} + z + P - \frac{\lambda\Omega}{gf} \cdot \frac{d^2P}{dt^2} = 0.$$

On peut apporter quelques simplifications aux équations ci-dessus.

1. Le terme $\frac{\lambda\Omega}{gf}$ peut être négligé devant $\frac{L(F + \Omega)}{gf}$, car λ est négligeable devant L .

2. D'autre part, le terme $\frac{d^2P}{dt^2}$ est très voisin de 0 pendant tout le mouvement.

3. Le coefficient des termes du quatrième ordre est très grand par rapport aux coefficients des autres termes si la longueur de la galerie est grande par rapport aux amplitudes maxima du mouvement. Si cette condition est réalisée, on peut alors scinder chaque équation différentielle du quatrième ordre en deux équations du second ordre. On a pour x

$$(30) \quad \frac{L(F + \Omega)}{gf} \cdot \frac{d^2x_I}{dt^2} + x_I + P = 0$$

$$(31) \quad \frac{d^2x_{II}}{dt^2} + \frac{F + \Omega}{F \cdot \frac{\lambda\Omega}{gf}} x_{II} = 0.$$

La solution de l'équation du quatrième ordre est alors :

$$(32) \quad x = x_I + x_{II}.$$

On peut déterminer z en fonction de x en tenant compte des simplifications ci-dessus introduites.

$$(33) \quad z = x + \frac{\lambda\Omega}{gf} \cdot \frac{d^2x}{dt^2}.$$

Les équations (30) à (33) définissent le mouvement du plan d'eau dans la chambre. Nous remarquons que l'équation (31) est celle d'un mouvement oscillatoire entretenu.

Si l'on pose :

$$(34) \quad \beta^2 = \frac{F + \Omega}{F \cdot \frac{\lambda\Omega}{gf}}$$

on a, en définitive

$$x = x_I + x_{II} = x_I + A \sin \beta t + B \cos \beta t$$

$$(35) \quad z = x_I + \frac{\lambda\Omega}{gf} \cdot \frac{d^2x_I}{dt^2} + A \left(1 - \beta^2 \cdot \frac{\lambda\Omega}{gf} \right) \sin \beta t + B \left(1 - \beta^2 \cdot \frac{\lambda\Omega}{gf} \right) \cos \beta t.$$

Les constantes d'intégration A et B ainsi que celles contenues implicitement dans la fonction x_I , également au nombre de 2, sont définies par les conditions initiales du mouvement.

Conditions initiales du mouvement.

Au moment d'une manœuvre instantanée de l'obturateur aval, instant choisi pour origine des temps, le niveau dynamique du régime est $-P_0$ et le débit varie instantanément de ΔQ (ΔQ étant positif si la manœuvre est une ouverture). Cette variation instantanée de débit correspond au temps $T = 0$ à un appel ou à un reflux d'eau dans le premier volume libre rencontré à partir de l'obturateur. Ce fait qui paraît évident a été effectivement observé au laboratoire. Les conditions initiales seront donc

$$\left(\frac{dx}{dt} \right)_{t=0} = - \frac{\Delta Q}{\Omega}$$

$$\left(\frac{dz}{dt} \right)_{t=0} = 0$$

$$z_{t=0} = x_{t=0} = -P_0$$

Ces quatre conditions entraînent en tenant compte que $\frac{d^2x_I}{dt^2} \approx 0$ au début du mouvement

$$(36) \quad A = - \frac{\Delta Q}{\Omega \beta} \cdot \frac{F}{F + \Omega} \quad B = 0$$

$$(37) \quad \frac{dx_I}{dt} = \frac{dz_I}{dt} = -\frac{Q}{F + \Omega}$$

$$(38) \quad x_{I=0} = z_{I=0} = -P.$$

Ces égalités (36) à (38) définissent entièrement les quatre constantes d'intégration.

L'examen des équations (30) et (31) ainsi que les valeurs des constantes d'intégration résultant des conditions initiales nous permettent de déduire ce qui suit :

Le mouvement des plans d'eau dans une chambre d'équilibre à deux surfaces libres voisines est une combinaison de deux mouvements.

1. Le mouvement principal dans la galerie d'amenée est identique à celui qui se produirait dans une chambre d'équilibre fictive de section horizontale équivalente à la somme des deux surfaces libres. En effet, l'équation (30) et les conditions initiales (37) et (38) sont identiques à celles que l'on rencontrerait pour la chambre fictive considérée ci-dessus.

2. Le mouvement secondaire, qui se greffe sur le mouvement principal, ne se produit que dans la galerie réunissant les deux surfaces libres.

Ces conclusions sont générales pour toute chambre dont les surfaces libres sont voisines.

Il n'y a pas lieu de poursuivre ici l'analyse de l'oscillation principale. Les méthodes de calcul habituelles peuvent s'appliquer sans autre pour l'étude de ce mouvement, quelles que soient les dispositions de la chambre (chambre à épanouissements multiples, déversante ou autre).

Le mouvement secondaire est caractérisé par une oscillation définie par

$$(39) \quad x_{II} = -\frac{\Delta Q}{\Omega \beta} \cdot \frac{F}{F + \Omega} \sin \beta t$$

$$(40) \quad z_{II} = +\frac{\Delta Q}{\beta} \cdot \frac{1}{F + \Omega}$$

dont la période est

$$(41) \quad T_{II} = \frac{2\pi}{\beta} = 2\pi \sqrt{\frac{\lambda \Omega}{g f} \cdot \frac{F}{F + \Omega}}$$

En réalité, par suite des frottements, cette oscillation secondaire sera certainement amortie. Il est difficile jusqu'à maintenant d'estimer analytiquement le degré de cet amortissement, sans introduire une grande part d'arbitraire. Les essais, spécialement en cas de manœuvre de fermeture, font apparaître cette oscillation secondaire pendant les premiers instants du phénomène ; elle est étouffée dès que le point de culmination est atteint.

Les équations établies ci-dessus nous ont permis d'étudier par le calcul de nombreuses manœuvres effectuées en laboratoire. Il ne nous paraît pas utile d'en reproduire le détail ici. Nous donnons ci-après les résultats pour les cas principaux et nous les comparons aux résultats des essais.

Comparaison des résultats des essais et du calcul (pour le cas de la solution proposée en définitive).

Nous avons reproduit ci-devant les diagrammes expérimentaux de deux manœuvres, l'une correspondant à une fermeture complète instantanée de $48 \text{ m}^3/\text{sec.}$ à 0, l'autre, à une ouverture partielle instantanée de $24 \text{ m}^3/\text{sec.}$ à $48 \text{ m}^3/\text{sec.}$ Sur les mêmes diagrammes on a figuré les résultats du calcul. (Voir fig. 7 et fig. 9, chap. III.)¹

¹ Bulletin technique du 26 septembre 1936.

Remarques sur l'influence de la multiplicité des surfaces libres de la chambre sur la détermination de l'échelle.

Les principes généraux exposés au cours du chap. II, ne sont rigoureusement applicables que pour une chambre d'équilibre à une seule surface libre. Pour une chambre du genre de celle qui fait l'objet de cette étude où les surfaces libres multiples sont voisines les unes des autres et font partie de ce que nous avons appelé précédemment la chambre *proprement dite*, les résultats expérimentaux sont encore valables, moyennant deux conditions :

1. La surface libre à adopter dans le calcul de l'échelle est la somme des surfaces libres.

2. Les oscillations secondaires, qui prennent naissance dans les galeries de faible longueur réunissant les surfaces libres, ne doivent pas être interprétées à la même échelle des temps que l'oscillation principale, mais à une échelle découlant de la loi de similitude de Froude soit

$$(22) \quad t_{ms} = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot t$$

où t_{ms} et t sont les temps mesurés respectivement au modèle et en réalité pour les oscillations secondaires.

Etant donné que le mouvement dans la chambre d'équilibre résulte de la combinaison d'un mouvement principal et des oscillations secondaires entre les surfaces libres, et que ces deux systèmes d'oscillations ne se superposent pas au modèle comme en réalité, il pourrait en résulter dans certains cas sur le modèle une déformation du mouvement réel.

Dans le cas particulier, faisant l'objet de cette communication, les résultats expérimentaux ne sont pas affectés dans leur ensemble, car, comme on a pu le voir, les oscillations secondaires entre les surfaces libres ne jouent pas un rôle important pour les variations extrêmes du plan d'eau. Ce n'est que dans le problème de la stabilité de réglage qu'il y a lieu de les considérer et dans ce cas, ce qui intervient principalement, au point de vue expérimental, c'est la période de l'oscillation secondaire ; l'échelle des temps définie par la formule (22) ci-dessus permet alors d'interpréter les résultats des essais.

a) Manœuvre de fermeture de $48 \text{ m}^3/\text{sec.}$ à 0.

L'examen du diagramme (fig. 7, chap. III) conduit aux constatations suivantes :

1. Le diagramme a nettement l'allure de celui d'une chambre différentielle. Après une montée rapide, le niveau de la chambre reste étale pendant tout le premier quart de période. L'effet de freinage produit donc son efficacité maximum.

2. On observe, pendant la montée, l'oscillation secondaire, qui se greffe sur le mouvement principal. Comme le calcul le fait prévoir, cette oscillation secondaire a une amplitude plus grande dans le puits des vannes que dans la chambre, par suite de la grande différence des surfaces horizontales. L'essai montre en outre que cette oscillation secondaire s'amortit rapidement.

3. La période de cette oscillation doit être mesurée à une échelle des temps différente de celle du mouvement principal, soit $1 \text{ cm} = \frac{6}{8,95} \times 44$ (voir paragraphe D, chap. IV). On trouve, d'après l'essai, une période de 13 secondes, tandis que le calcul fait prévoir 12,5 secondes. Ce résultat est donc satisfaisant.

4. La montée maximum est plus grande d'après le calcul que d'après les essais. A ce point de vue, le calcul offre une sécurité supplémentaire. Ce fait doit être attribué aux pertes de charge à la base de la chambre provenant du

changement brusque de la direction, pertes dont on n'a pas tenu compte dans le calcul.

5. Le temps du point de culmination est de 343 secondes, d'après le calcul, contre 318 secondes d'après les essais ; ceci confirme l'idée que le freinage sur le modèle est plus énergique que ne l'admet le calcul.

6. Pendant la culmination, on constate que le niveau oscille autour d'une position moyenne. Ce fait est dû à l'interférence des ondes de translation qui voyagent dans les deux galeries de 110 m de longueur constituant les épanouissements supérieurs de la chambre.

b) *Manœuvre d'ouverture de 24 m³/sec. à 48 m³/sec.*
(Voir fig. 9, chap. III.)

7. La descente est plus rapide que ne le laisse prévoir le calcul. Elle s'amorce dans le puits des vannes tandis que, dans la chambre proprement dite, elle se produit avec un certain décalage. Ceci est en accord avec les conditions initiales admises dans le calcul.

8. Le niveau minimum est le même d'après le calcul que d'après les essais (385,28 contre 385,25). Il se produit également à la même époque soit au bout de 244 secondes. Il semble donc qu'au cours d'une manœuvre d'ouverture, les effets de freinage sur modèle ne sont pas plus grands que ne le laisse prévoir le calcul.

9. Les irrégularités au cours de la descente sont dues aux ondes de translation dans la galerie inférieure. La vidange de cette dernière, dont la longueur est de 80 m environ, se fait par ondes successives et non régulièrement, comme le suppose le calcul.

E. Etude succincte de la stabilité de réglage dans le cas d'une chambre à deux surfaces libres voisines.

Nous suivrons, ici, une voie parallèle à celle qui est développée dans la « Théorie des chambres d'équilibre de MM. Calame et Gaden », en étudiant la stabilité de réglage dans le cas où la manœuvre automatique du régulateur est destinée à établir une puissance constante correspondant au débit de régime.

Nous supposerons que le rendement de la conduite forcée et du groupe reste constant pendant le réglage. Notre étude aura principalement un caractère qualitatif ; elle se bornera à déterminer le degré d'amortissement d'oscillation de faible amplitude.

Autour de la position de régime, correspondant au débit Q_o et à la chute nette H_o , la condition de réglage s'exprimera par

$$(42) \quad Q_o H_o = QH = Q(H_o + \xi)$$

où ξ représente la variation du niveau dans la chambre autour de sa position de régime pour la première surface libre rencontrée au-dessus des conduites forcées. Il paraît en effet évident que la pression au bas de la conduite forcée est influencée uniquement par le niveau de la première surface libre au-dessus de l'obturateur.

L'amplitude ξ de l'oscillation étant petite, le débit variable peut aussi s'exprimer par

$$(43) \quad Q = \frac{Q_o H_o}{H_o + \xi} = Q_o \cdot \left(1 - \frac{\xi}{H_o}\right)$$

on en tire

$$(44) \quad \frac{dQ}{dt} = -\frac{Q_o}{H_o} \frac{d\xi}{dt}$$

Si l'on convient de mesurer les variations de niveau des deux surfaces libres de la chambre d'équilibre, par rapport au niveau dynamique de régime, on a

$$(45) \quad \begin{aligned} x &= \xi - P_o & z &= \eta - P_o \\ \frac{d\xi}{dt} &= \frac{dx}{dt} & \frac{d\eta}{dt} &= \frac{dz}{dt} \\ \frac{d^2\xi}{dt^2} &= \frac{d^2x}{dt^2} & \frac{d^2\eta}{dt^2} &= \frac{d^2z}{dt^2}. \end{aligned}$$

Les équations de continuité deviennent :

$$(46) \quad \begin{aligned} f\omega &= F \frac{d\eta}{dt} + \Omega \frac{d\xi}{dt} - \frac{\xi}{H_o} Q_o + Q_o \\ fU &= \Omega \frac{d\xi}{dt} - \frac{\xi}{H_o} Q_o + Q_o \end{aligned}$$

et la perte de charge est égale à

$$(47) \quad \delta\omega^2 = P_o + \frac{2P_o}{Q_o} \left[F \frac{d\eta}{dt} + \Omega \frac{d\xi}{dt} - \frac{\xi}{H_o} Q_o \right].$$

On peut alors écrire les équations du mouvement des plans d'eau dans la chambre

$$(48) \quad \begin{aligned} \frac{LF}{gf} \frac{d^2\eta}{dt^2} + \frac{L\Omega}{gf} \frac{d^2\xi}{dt^2} + \left(\frac{2P_o}{Q_o} \Omega - \frac{Q_o}{H_o} \frac{L}{g} \frac{1}{f} \right) \frac{d\xi}{dt} + \\ + \frac{2P_o F}{Q_o} \frac{d\eta}{dt} + \eta - \frac{2P_o}{H_o} \xi = 0 \end{aligned}$$

$$(49) \quad \frac{\lambda\Omega}{gf} \frac{d^2\xi}{dt^2} - \frac{\lambda}{gf} \cdot \frac{Q_o}{H_o} \frac{d\xi}{dt} + \xi - \eta = 0.$$

L'élimination de la fonction η de l'une des équations ci-dessus conduit à l'équation différentielle du quatrième ordre suivante :

$$(50) \quad \begin{aligned} \frac{LF}{gf} \cdot \frac{\lambda\Omega}{gf} \frac{d^4\xi}{dt^4} + \left[\frac{2P_o F}{Q_o} \cdot \frac{\Omega\lambda}{gf} - \frac{LF}{gf} \cdot \frac{\lambda}{gf} \cdot \frac{Q_o}{H_o} \right] \frac{d^3\xi}{dt^3} + \\ + \left[\frac{L(F + \Omega)}{gf} + \frac{\lambda\Omega}{gf} - \frac{2P_o F\lambda}{H_o gf} \right] \frac{d^2\xi}{dt^2} + \\ + \left[\frac{2P_o}{Q_o}(F + \Omega) - \frac{Q_o}{H_o} \cdot \frac{L + \lambda}{gf} \right] \frac{d\xi}{dt} + \left(4 - \frac{2P_o}{H_o} \right) \xi = 0. \end{aligned}$$

L'intégrale de cette équation à coefficients constants dépend des solutions de l'équation algébrique associée. Ces solutions étant de la forme

$$r_k = \alpha_k + i\beta_k$$

l'intégrale générale de l'équation (44) pourra s'écrire

$$(51) \quad \xi = \sum_1^4 A_k e^{\alpha_k t} \sin \beta_k t + B_k e^{\alpha_k t} \cos \beta_k t.$$

Le mouvement est de caractère oscillatoire si la valeur de r_k est imaginaire. La période d'oscillation est alors

$$(52) \quad T_k = \frac{2\pi}{\beta_k}.$$

Le coefficient d'amortissement ou d'amplification pendant une période est donné par

$$(53) \quad \Delta = \frac{\xi_{t+T}}{\xi_t} = e^{\alpha_k T} = e^{2\pi \frac{\alpha_k}{\beta_k}}.$$

On voit que si α_k est plus grand que 0 , le coefficient Δ est plus grand que 1 ; il y a amplification. Au contraire, si α_k est plus petit que 0 , le coefficient Δ est plus petit que 1 ; il y a amortissement.

Comparaison des résultats des essais et des calculs.

Nous ne reproduirons ici que les résultats importants pour un réglage à puissance constante autour du débit utile de $35 \text{ m}^3/\text{sec}$. ; le niveau dynamique de régime est légèrement au-dessus du plafond de la galerie inférieure ($P_o = -5,10 \text{ m}$).

Pour les trois solutions envisagées, les valeurs des différents termes contenus dans l'équation (50) sont les suivantes :

	Ancienne chambre	Nouvelle chambre	Avant-projet
(voir fig. 16)			
L	6000 m	6000 m	6000 m
λ	28,45 m	28,45 m	100 m
Ω_o	20 m^2	240 m^2	180 m^2
Ω	25 m^2	25 m^2	45 m^2
P_o	5,10 m	5,10 m	5,10 m
Q_o	$35 \text{ m}^3/\text{sec}$	$35 \text{ m}^3/\text{sec}$	$35 \text{ m}^3/\text{sec}$
H_o	31,90	31,90	31,90

Le mouvement du plan d'eau autour du niveau dynamique du régime étant caractérisé par la formule (51) on trouve les valeurs numériques suivantes pour les différents coefficients :

	Ancienne chambre		Nouvelle chambre		Avant-projet	
	Calcul	Essai	Calcul	Essai	Calcul	Essai
$\beta_1 \text{ sec.}^{-1}$	$20,8 \times 10^{-3}$	$23,2 \times 10^{-3}$	$8,81 \times 10^{-3}$	$8,81 \times 10^{-3}$	$9,2 \times 10^{-3}$	$9,17 \times 10^{-3}$
$\beta_2 \text{ sec.}^{-1}$	731×10^{-3}	p. obser.	511×10^{-3}	p. obser.	0,215	0,205
$T_1 \text{ sec.}$	302	270	750	750	682	685
$T_2 \text{ sec.}$	8,6	p. obser.	12,2	p. obser.	29,2	30,5
$a_1 \text{ sec.}^{-1}$	$5,4 \times 10^{-3}$	—	$-1,8 \times 10^{-3}$	—	$-1,6 \times 10^{-3}$	—
$a_2 \text{ sec.}^{-1}$	$6,49 \times 10^{-3}$	—	$19,26 \times 10^{-3}$	—	$19,35 \times 10^{-3}$	—
Δ_1	—	6,9 > 1	—	0,27 < 1	—	0,335 < 1
Δ_2	—	—	—	1,25	—	1,77 > 1

Il découle de ce calcul que la stabilité de réglage n'était pas assurée dans l'ancienne chambre. L'effet du régulateur avait pour conséquence de provoquer une oscillation entretenue soit l'oscillation principale de 300 secondes de période, soit l'oscillation secondaire entre puits de 8,6 secondes de période. Au laboratoire, cette imperfection de l'ancienne chambre est apparue d'emblée. C'est ce que l'on peut voir sur la figure 12, chap. III. La période d'oscillation sur la chambre réelle et au laboratoire a été mesurée et trouvée égale à 270 secondes, contre 302 secondes par le calcul.

La nouvelle chambre est dimensionnée précisément de manière à amortir rapidement cette oscillation principale. Ce fait qui découle du calcul, a été confirmé par les essais (voir fig. 13, chap. III) : l'oscillation principale s'amortit rapidement. Sa période est de 750 secondes, valeur trouvée égale par le calcul et par les essais.

Le calcul laissait prévoir en outre l'apparition probable d'une oscillation secondaire non amortie de la période 12,2 secondes, oscillation qui avait sa correspondante dans l'ancienne chambre. Au laboratoire, cette oscillation n'a pas été observée : ce fait peut s'expliquer si l'on constate que le degré d'amplification est voisin de 1, exactement 1,25, et qu'il suffirait que cette valeur devienne inférieure à l'unité (ce qui est plausible compte tenu des frottements non envisagés dans le calcul) pour que l'amortissement soit rapide étant donné la fréquence élevée de ces oscillations secondaires.

Conclusions.

La chambre d'équilibre transformée est en exploitation depuis quelques mois et donne entière satisfaction.

Les constatations faites sur place, qu'il s'agisse des amplitudes d'oscillations principales ou de la stabilité de réglage, n'ont pas apporté au sujet du fonctionnement de l'ouvrage d'éléments qui n'avaient pu être prévus, soit par le calcul, soit par l'expérience en laboratoire.

Il fut possible d'enregistrer sur la chambre elle-même, lors de quelques manœuvres importantes, les oscillations du plan d'eau. Les diagrammes ainsi relevés ont été comparés aux résultats obtenus en pareilles conditions au modèle.

La figure 17 donne précisément l'allure de l'oscillation en réalité, au modèle et telle que l'avait fait prévoir le calcul, dans le cas de deux fermetures partielles.

Dans l'interprétation de ces diagrammes, il faut tenir compte du fait que le modèle fut construit en prenant pour base de son dimensionnement une perte de charge dans la galerie d'aménée plus forte qu'elle ne fut en réalité constatée sur place, étant donné que les parois de la

galerie se couvrent d'incerustations et doivent périodiquement être curées. Ce fait explique que le maximum atteint au modèle soit légèrement inférieur à la cote observée. Partant du même niveau dynamique au début de la manœuvre, nous avions pour ce faire au modèle un débit légèrement plus faible qu'en réalité.

D'autre part, au cours des observations effectuées sur place, il n'a pas été possible de jauger les débits au sortir de l'usine parallèlement à l'enregistrement des oscillations dans la chambre d'équilibre. La loi de variation du débit dans le temps a été tirée après coup du diagramme du wattmètre enregistreur. Pour cette dernière raison nous n'avons pu reproduire au laboratoire de façon absolument rigoureuse les manœuvres effectuées à l'usine.

Compte tenu de ces divers facteurs, les cotes extrêmes du plan d'eau atteintes lors de la mise en service de la nouvelle chambre confirment les résultats tant analytiques qu'expérimentaux. De son côté, la stabilité de réglage s'est avérée aussi assurée.

L'étude dont nous avons donné dans cette communication l'essentiel conduit donc aux conclusions suivantes :

1. L'étude des chambres d'équilibre peut être réalisée

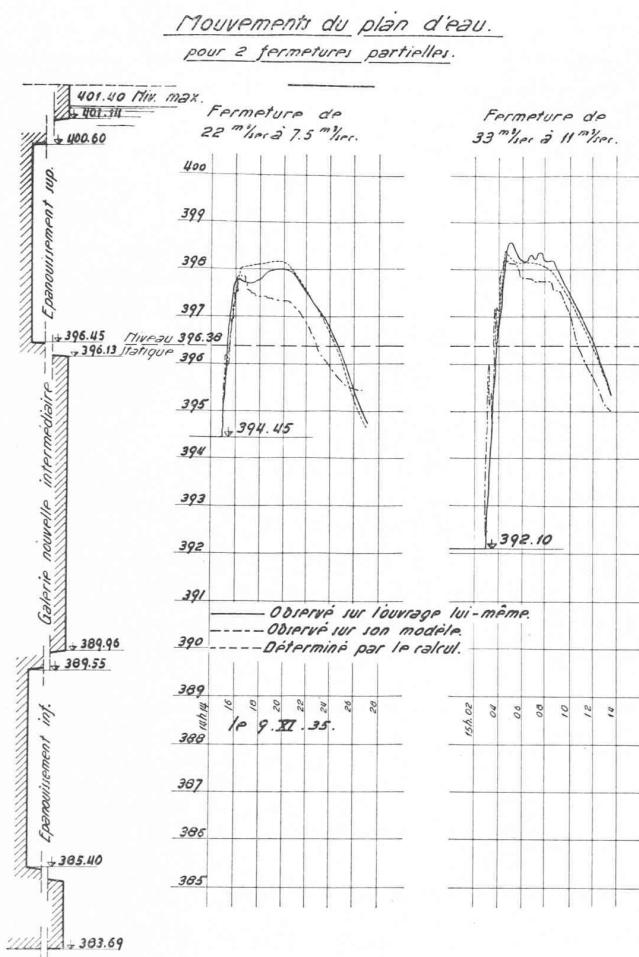


Fig. 17. — Diagramme comparatif des oscillations obtenues en réalité au modèle et par le calcul dans le cas de deux fermetures partielles.

sur modèles réduits, moyennant certaines précautions dans le dimensionnement du modèle (voir chap. II).

2. Le modèle pourra être construit sans que sa galerie d'aménée soit d'une longueur prohibitive.

3. Les observations faites au laboratoire auront non seulement la valeur d'un contrôle des calculs, mais pourront être le point de départ d'une conception originale des phénomènes et, par suite, être à la base du développement de méthodes analytiques.

4. Le laboratoire permet d'observer quantité de phénomènes secondaires et annexes qui ordinairement échappent à l'étude strictement analytique, quoique étant souvent suffisamment importants pour troubler de manière appréciable le fonctionnement de la chambre.

5. Dans tous les cas où la complexité de l'ouvrage le rend inaccessible au calcul, le laboratoire sera à même d'orienter le constructeur vers la solution la meilleure. La facilité avec laquelle on peut observer successivement diverses solutions constructives présente à ce point de vue un grand intérêt.

Concours restreint pour l'élaboration des plans du Pavillon suisse à l'Exposition internationale « Arts et Techniques dans la vie moderne », Paris 1937.

(Suite et fin).¹

Conformément au programme le jury décide de primer 5 projets et d'attribuer au 1^{er} rang un prix de Fr. 1200

2 ^e	"	"	1100
3 ^e	"	"	1000
4 ^e	"	"	900
5 ^e	"	"	800

A l'issue des opérations de classement, le jury prend note d'une réserve de M. Thiessing qui exprime sa conviction qu'aucun des projets primés ne contient, dans sa forme actuelle, une proposition satisfaisante pour la représentation du tourisme. M. Thiessing croit devoir attirer dès maintenant l'attention du jury sur le fait que tous les projets et en particulier le premier rang devraient être remaniés pour tenir compte, dans une mesure suffisante, des besoins du tourisme, et pour ne pas remettre en question la participation représentative prévue pour cette branche.

Le jury constate par ailleurs qu'aucun des projets présentés ne peut être réalisé sans remaniements importants selon les indications qui seront données ultérieurement.

L'ouverture des enveloppes contenant les noms des participants au concours donne pour les 5 projets primés les noms d'auteurs suivants :

1 ^{er} rang, N° 18	MM. Bräuning, Leu et Dürig, à Bâle.
2 ^e rang, N° 24 « P 37 »	Karl Egender, à Zurich.
3 ^e rang, N° 16 « Rive »	Albert Zeyer, à Lucerne.
4 ^e rang, N° 5 « CH »	Carl Päder, à Berne.
5 ^e rang, N° 8 « Blau Kubus »	Denis Honegger, à Paris.

A l'unanimité, le jury décide de recommander à la Commission suisse d'exposition de confier l'exécution du travail au concurrent classé en premier rang : Bureau d'architectes Bräuning, Leu et Dürig, à Bâle.

Berne, le 5 août 1936.

Les trolleybus de Lausanne.

Dans un intéressant article de la revue française « Le véhicule électrique », M. S. Payot, ingénieur, chef du Service technique des Tramways lausannois, décrit l'organisation présente et les perspectives de la « trolleybusation » (néologisme barbare, mais significatif) de Lausanne. Nous empruntons à cette étude les passages suivants, illustrés de deux croquis dont nous devons les originaux à l'obligeance de M. Payot.

Réd.

Dans une ville accidentée comme Lausanne, où les rues présentent des déclivités allant jusqu'à 18 %, les transports par autobus et par tramways se sont révélés, dans certains cas, peu pratiques et fort coûteux.

Le tramway à simple adhérence ne peut pas gravir des pentes supérieures à 12 %. A partir de 5 %, l'exploitation exige déjà des précautions spéciales et le service de remorque n'est plus possible sur les rampes supérieures à 9 %. Quant à l'autobus, son prix de revient au kilomètre devient excessivement élevé lorsqu'il s'agit d'effectuer des démarriages fréquents sur les fortes rampes.

Les trolleybus, mis en service le 1^{er} novembre 1932, ont donné, jusqu'à maintenant, de bons résultats, au point de vue technique. L'usure du matériel est faible et l'entretien des véhicules, peu onéreux. La durée moyenne des pneus est de 40 000 km. Les déraillements, après mise au point de la ligne aérienne, sont presque nuls (environ 1 par 500 km parcourus). La pression de la prise de courant sur le fil aérien est réglée à 11 kg, à la hauteur moyenne de 6,25 m.

L'usure des lignes aériennes est minime. Après 10 mois de

¹ Voir *Bulletin technique* du 10 septembre 1936, page 249.