

**Zeitschrift:** Bulletin technique de la Suisse romande  
**Band:** 58 (1932)  
**Heft:** 17

**Artikel:** Note sur l'onde positive de translation dans les canaux d'usines  
**Autor:** Calame, Jules  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-44868>

#### 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:** 26.01.2026

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

# BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

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

Paraissant tous les 15 jours

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

ORGANE DE L'ASSOCIATION SUISSE DE TECHNIQUE SANITAIRE

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

**SOMMAIRE :** Note sur l'onde positive de translation dans les canaux d'usine (suite et fin), par M. Jules CALAME, ingénieur-conseil à Genève. — Concours d'architecture ouvert par la Banque Cantonale Vaudoise, à Lausanne (suite). — CHRONIQUE. — Comparaison d'une cuisinière électrique à accumulation avec une cuisinière à chauffage direct. — Prix de l'énergie électrique pour la cuisson des aliments. — BIBLIOGRAPHIE. — Ecole d'ingénieurs de l'Université de Lausanne.

## Note sur l'onde positive de translation dans les canaux d'usines,

par JULES CALAME, ingénieur-conseil à Genève.  
(Suite et fin.)<sup>1</sup>

### § 6. Montée maximum dans la chambre d'équilibre.

La deuxième phase commence à l'instant où l'onde (qui d'abord s'est propagée librement dans le profil) touche le faîte de la calotte. Étant donnée la très faible pente de la galerie et le front incliné de l'onde, qui dépend de la rapidité de la manœuvre, il est malaisé de déterminer avec exactitude ce point de contact. On admet volontiers — et, dans les conditions ordinaires, l'erreur est infime — que la montée du niveau dans la chambre d'équilibre commence à l'instant où les ordonnées  $Z$  sont supérieures à la différence des cotes  $A-C$  à la tête amont.

Dès l'instant où l'eau monte dans la chambre, le débit  $Q_1$  qui s'écoule par la galerie de fuite est différent du débit  $Q$  qui sort des turbines.

On a affaire alors à la relation de continuité de la chambre d'équilibre, qui s'écrit :

$$Q = FV + f_1 W_1 = F \frac{dZ}{dt} + Q_1$$

ou encore

$$Q = F \frac{dZ}{dt} + \Delta f_1 a_1 \quad (22)$$

si l'on désigne par  $F$  la section horizontale de la chambre d'équilibre (section qui peut d'ailleurs varier avec l'ordonnée  $Z$ ) et par  $V$  la vitesse de la montée du niveau de l'eau dans la chambre.

Cette relation (22) peut se mettre encore sous la forme :

$$dZ = \left\{ \frac{Q}{F} - \frac{\Delta f_1}{F} a_1 \right\} dt \quad (23)$$

dans laquelle  $a_1$  désigne précisément la célérité définie par sa valeur (21).

Il y a peu d'espoir de pouvoir intégrer directement le système constitué par les équations (21) et (23), c'est-à-

dire de pouvoir exprimer explicitement  $Z$  et  $a_1$  en fonction de  $t$ .

Il ne reste dès lors qu'à procéder par intégrations successives, en passant du temps  $t$  au temps  $t + \Delta t$ .

Il suffit d'ailleurs pour cela de choisir l'élément  $\Delta t$  suffisamment court pour qu'on puisse suivre facilement la variation du niveau dans la chambre d'équilibre.

Ainsi au temps

$$t = \sum_0^t \Delta t$$

on admettra par tâtonnement une certaine valeur de  $Z$ , c'est-à-dire aussi de  $\Delta f_1$  et de  $\xi_1$ , ainsi que de l'abscisse correspondante :

$$X = \sum_0^t a_1 \cdot \Delta t$$

et les valeurs obtenues pour  $a_1$  et  $Q$  devront, si elles ont été bien choisies, satisfaire à l'équation (23) mise sous la forme des accroissements finis :

$$\Delta Z = \left\{ \frac{Q}{F} - \frac{\Delta f_1}{F} a_1 \right\} \Delta t$$

Ce système d'équations simultanées (21) et (23) est valable jusqu'au moment où l'onde qui avance a atteint l'extrémité aval de la galerie, ce qui constituera la fin de la deuxième phase.

Le débit  $Q_1$  s'il sort à cet instant de la galerie dans un canal à ciel ouvert, provoque à cet endroit une onde dont la hauteur  $Z_1$  (mesurée au-dessus du niveau statique initial) peut dépasser parfois le faîte de la galerie.

A ce même instant, dans la chambre d'équilibre, la pression d'eau atteint une valeur  $Z$  et c'est dès lors sous la pression  $Z - Z_1 = Z_2$  que va se poursuivre l'écoulement à gueule bée par la galerie dans une troisième phase.

Pour examiner cette troisième phase, on a à disposition

1. L'équation de continuité du débit (22) mise sous la forme :

$$\Delta Z = \left\{ \frac{Q}{F} - \frac{f_1}{F} W_1 \right\} \Delta t \quad (24)$$

<sup>1</sup> Voir *Bulletin technique* du 6 août 1932, page 190.

2. l'équation générale du mouvement de Newton qui s'écrit ici :

$$\gamma f_0 Z_2 + \gamma \Delta f_1 \xi_1 \left\{ Z_2 - \frac{1}{2} (A - C) \right\} - \gamma \Psi^2 L \frac{W_1^2}{2g} \cdot f_1 = \\ = \frac{\gamma}{g} L f_1 \frac{dW_1}{dt} \quad (25)$$

ou encore

$$g Z_2 f_0 \left( 1 + \xi_1 \frac{\Delta f_1}{f_0} \right) - \frac{1}{2} g (A - C) \xi_1 \Delta f_1 - \frac{1}{2} \Psi^2 L f_1 W_1^2 = L f_1 \frac{dW_1}{dt}$$

mais comme en général l'onde, à la sortie de la galerie, dépasse le faîte de cette dernière, on a

$$\Delta f_1 = 0 \quad f_0 = f_1$$

d'où

$$g Z_2 f_1 - \frac{1}{2} \Psi^2 L f_1 W_1^2 = L f_1 \frac{dW_1}{dt}$$

équation que nous écrirons en vue de l'intégration partielle :

$$\Delta W_1 = \frac{1}{L} \left( g Z_2 - \frac{1}{2} \Psi^2 L W_1^2 \right) \Delta t \quad (26)$$

On traitera les équations (24) et (26) dans cette 3<sup>e</sup> phase, comme on a traité les équations (21) et (23) dans la phase précédente.

Comme valeur de  $W_1$  dans l'équation (24) on introduira de préférence une valeur moyenne

$$W_1 = \frac{1}{2} (W_{n-1} + W_n)$$

dans laquelle  $W_{n-1}$  et  $W_n$  sont les valeurs obtenues lors de l'intégration graphique aux instants  $t_{n-1}$  et  $t_n$ . En revanche, on peut presque toujours, dans l'équation (26), se borner à introduire pour  $W_1$  la valeur de  $W_{n-1}$ , la faible différence entre ces deux valeurs ne jouant qu'un rôle secondaire dans l'expression du frottement.

Dès l'instant où la galerie débite ainsi à gueule bée, son débit s'accroît très rapidement ; le niveau dans la chambre monte beaucoup moins vite. A l'instant où le débit  $Q_1$  de la galerie est égal au débit  $Q$  des turbines, le niveau cesse de monter dans la chambre d'équilibre.

et atteint précisément son maximum. Pendant quelques minutes,  $Q_1$  dépasse  $Q$  ; puis le niveau redescend dans la chambre et s'abaisse dès lors de nouveau au-dessous du faîte de la galerie.

On pourrait évidemment poursuivre plus loin le phénomène — il suffirait d'écrire les équations qui régissent le mouvement — mais il est en général superflu de le faire, car l'onde qui se propage vers l'aval est emportée, à la restitution, par le cours d'eau lui-même et il n'y a pas lieu alors de se préoccuper de son retour. On peut être assuré de même que si, après avoir fonctionné de nouveau à libre écoulement, la galerie se remettait encore en charge, la nouvelle oscillation dans la chambre ne donnerait jamais lieu à un maximum aussi élevé que le premier dont il a été question plus haut.

Restent réservés certains cas d'interférence, dans lesquels on se proposerait de fermer et d'ouvrir le distributeur des turbines selon un rythme qui pourrait alors provoquer des niveaux extrêmes dans la chambre ou dans la galerie, plus défavorables que ceux examinés jusqu'ici.

Dans l'application du calcul à des usines hydrauliques, on n'envisage cependant pas des cas plus défavorables que ceux qui résultent de l'ouverture ou de la fermeture complète du distributeur dans le plus court temps de manœuvre possible et la pratique a montré qu'en faisant une telle hypothèse on reste dans les limites de la réalité.

#### § 7. Chambre d'équilibre de l'Usine de Wettingen.

Alors que l'idée de mettre la galerie de fuite des turbines complètement en charge aurait conduit à une chambre d'équilibre de  $2000 \text{ m}^2$  environ de section horizontale, l'idée de M. le professeur E. Meyer-Peter fut, au contraire, de relever légèrement le radier de la galerie et d'augmenter un peu la hauteur du profil de manière que, pour tous les régimes d'exploitation à puissance constante, la galerie de fuite puisse débiter à libre écoulement. Il devait s'ensuivre quand même, lors de l'ou-

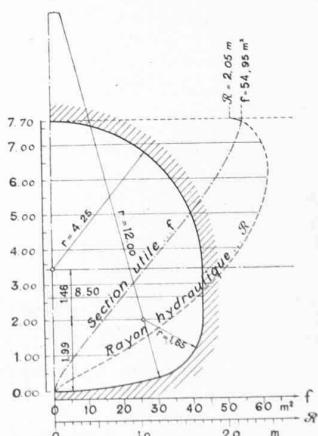
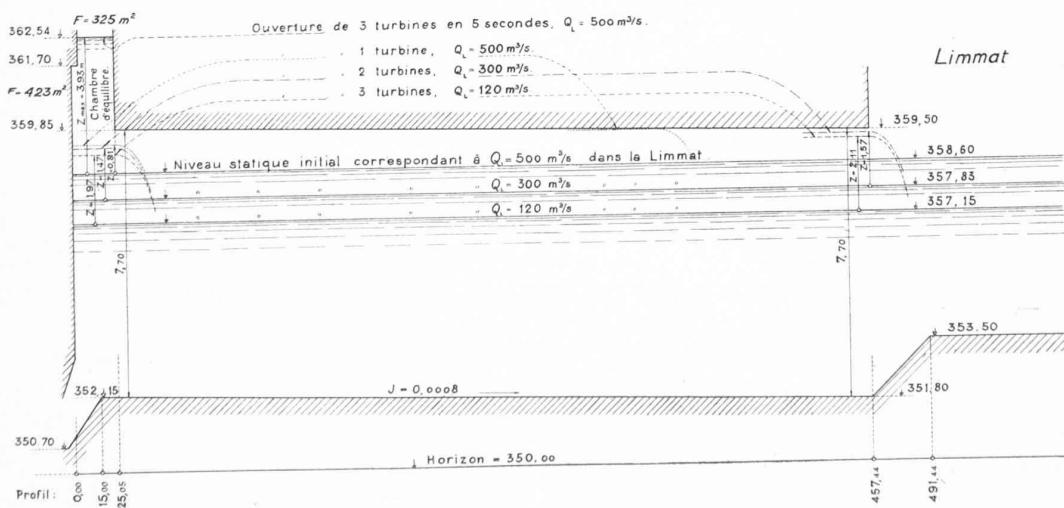


Fig. 12.

verture en plein des turbines et pour certains débits de la Limmat en période de hautes eaux, le régime mixte qui fait l'objet des §§ 5 et 6 de cette note. Le résultat intéressant à signaler, c'est que des variations acceptables du niveau dans la chambre ont pu être obtenues dès lors avec une section moyenne de la chambre d'équilibre voisine de  $400 \text{ m}^2$  seulement. On comprend tout l'intérêt que présentait un calcul de ces phénomènes transitoires et son contrôle par des essais exécutés sur un modèle à échelle réduite dont il sera question plus loin.

La figure 12 reproduit schématiquement le profil en long déformé et le profil en travers de la galerie de fuite de Wettingen d'une longueur de 432,4 m.

Sur la gauche, on a représenté en bas la sortie des tuyaux d'aspiration des turbines et en haut la chambre d'équilibre dont la section, pour des raisons d'ordre constructif, ne pouvait pas être supérieure à  $423 \text{ m}^2$  au-dessous de la cote 361,70 et à  $325 \text{ m}^2$  au-dessus de la même cote.

L'extrémité aval de ladite galerie débouche dans un ouvrage conique à ciel ouvert dont le radier s'elevait obliquement de 1,70 m, au moment du calcul, sur 34 m environ de longueur.

L'équipement principal de cette usine comporte 3 groupes turbo-générateurs à axe vertical; chaque turbine, d'une puissance de 9600 ch, est construite pour absorber  $40 \text{ m}^3/\text{s}$  sous une chute nette de 21,10 m.

Le débit de la Limmat varie au cours de l'année entre un étage voisin de  $42 \text{ m}^3/\text{s}$  et des crues qui, dans l'état futur de l'aménagement du bassin versant, ne dépasseront guère à vues humaines  $500 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Avant de rechercher la variation des niveaux extrêmes, il a paru intéressant de calculer aussi pour quel régime de la Limmat l'ouverture des turbines pourrait avoir lieu, sans que la chambre d'équilibre soit mise à contribution.

Ainsi qu'on le voit sur la fig. 12, il serait possible d'opérer dans ces conditions l'ouverture brusque de 3 turbines, soit d'environ  $120 \text{ m}^3/\text{s}$ , quand le débit de la Limmat atteint précisément la même valeur.

Si le débit de la Limmat grossit à  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ , c'est 2 unités seulement qu'on pourra mettre en marche sans que l'onde touche le faîte de la galerie; quand le débit grossit jusqu'à  $500 \text{ m}^3/\text{s}$ , il ne semble pas qu'on puisse compter pouvoir mettre en marche, même une unité complète, sans que la chambre d'équilibre entre en jeu.

Mais c'est évidemment pour le cas le plus défavorable d'un démarrage de 3 groupes simultanément, lors d'un service exceptionnel de pointe, que la chambre d'équilibre jouera son rôle complet, en cas de crue de la Limmat s'élevant jusqu'à  $500 \text{ m}^3/\text{s}$  et c'est dans ce cas

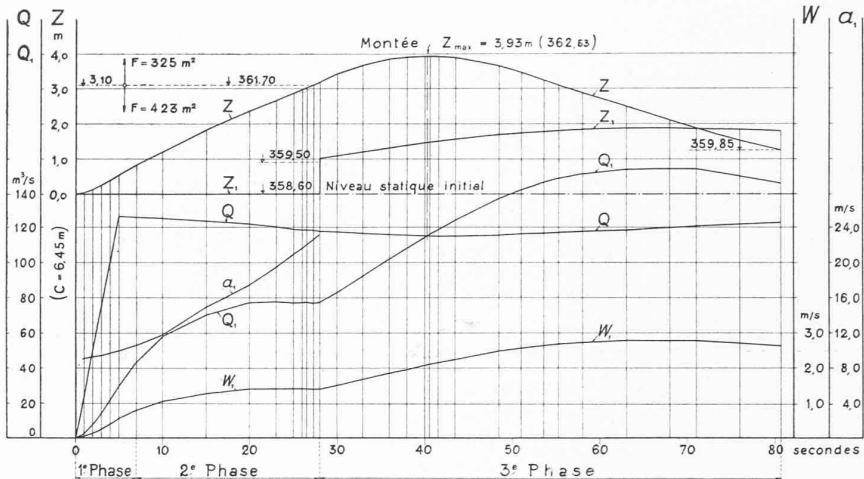


Fig. 13.

extrême que le calcul a été fait d'une manière détaillée.

L'oscillation sera alors effective dans la chambre et le calcul montre que le plus haut niveau atteint sera voisin de la cote 362,53, correspondant ainsi à une montée  $Z = 3,93 \text{ m}$ .

Il est instructif de suivre au cours du phénomène la variation des diverses grandeurs. Celles-ci sont reportées, à partir du début de la manœuvre et en fonction du temps, sur la figure 13.

Rappelons que

$Q$  ... désigne, à chaque instant, le débit provenant des turbines.

$Q_1$  ... le débit qui s'écoule par la galerie à la vitesse moyenne  $W_1 = Q_1 : f_1$ .

$a_1$  ... la vitesse de propagation de l'onde le long de la galerie de fuite.

$Z$  ... l'ordonnée du niveau de l'eau dans la chambre d'équilibre au-dessus du niveau statique initial admis à la cote 358,60 de la Limmat à la restitution, avant le démarrage des groupes.

$Z_1$  ... l'ordonnée du niveau de l'eau dans l'ouvrage de fuite à la sortie de la galerie, au-dessus du même niveau statique initial à la cote 358,60.

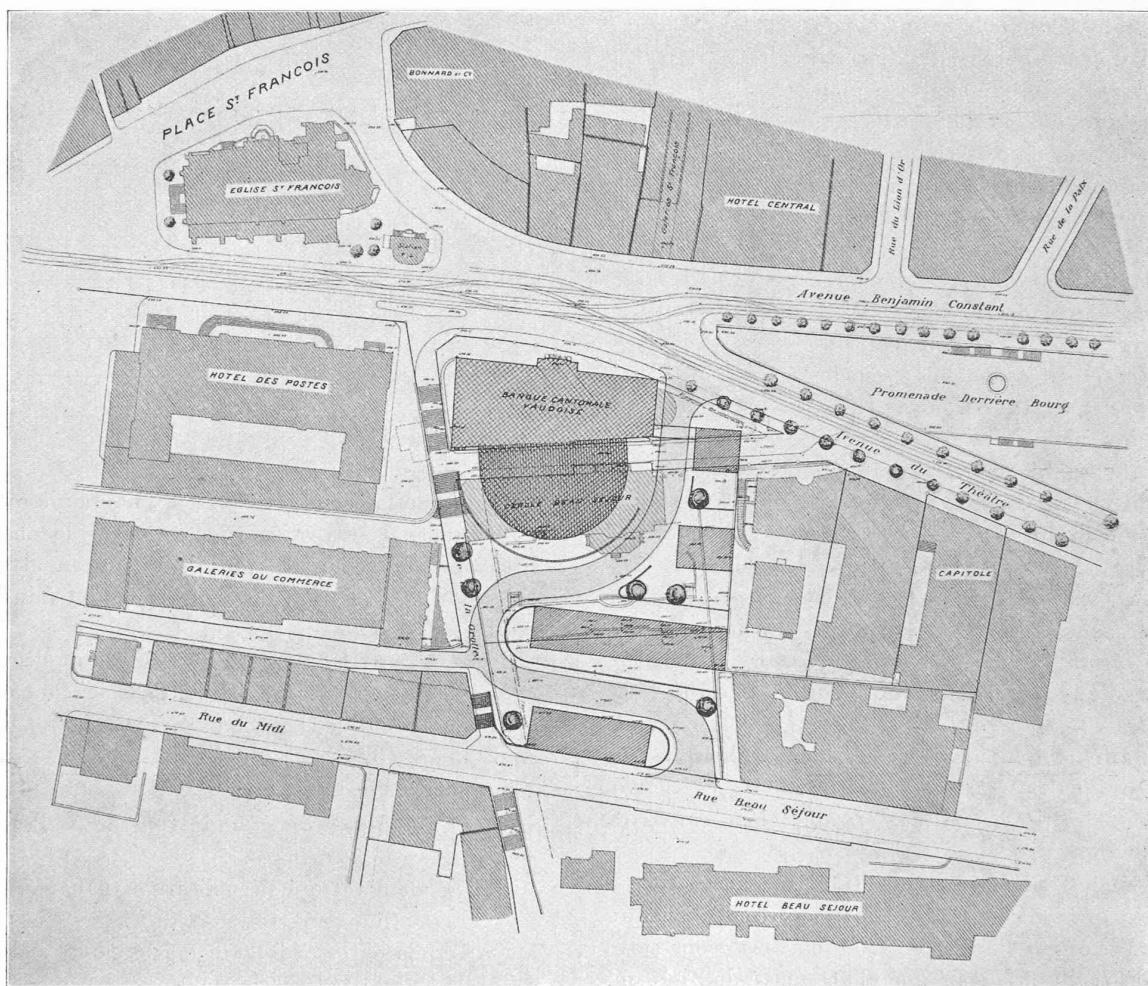
ces diverses valeurs ayant pour unités respectives le mètre et la seconde.

On remarquera que, dans ce calcul de Wettingen, la première phase a une durée voisine de 7 secondes, la seconde phase une durée de 21 secondes et que c'est enfin un peu plus de 52 secondes plus tard que le niveau de l'eau dans la chambre d'équilibre, après avoir atteint son maximum, est redescendu au niveau du faîte de la galerie.

Le maximum lui-même serait atteint dans ce cas au bout de 40 secondes environ à partir du début de la manœuvre d'ouverture brusque complète des 3 turbines, laquelle a été fixée à une durée de 5 secondes.

Il ne paraît pas utile d'insister ici sur le détail du calcul qui, pour être assez long, ne présente pas de

## CONCOURS BANQUE CANTONALE VAUDOISE



Plan de situation. — 1 : 2000.

III<sup>me</sup> prix : projet « Pas d'angle », de M. R. Chapallaz, architecte, à La Chaux-de-Fonds.

difficulté particulière, ni sur la subtilité qui permet, pendant la mise en charge, de tenir compte de l'influence de la variation de la chute sur le débit des turbines.

#### § 8. Conclusion.

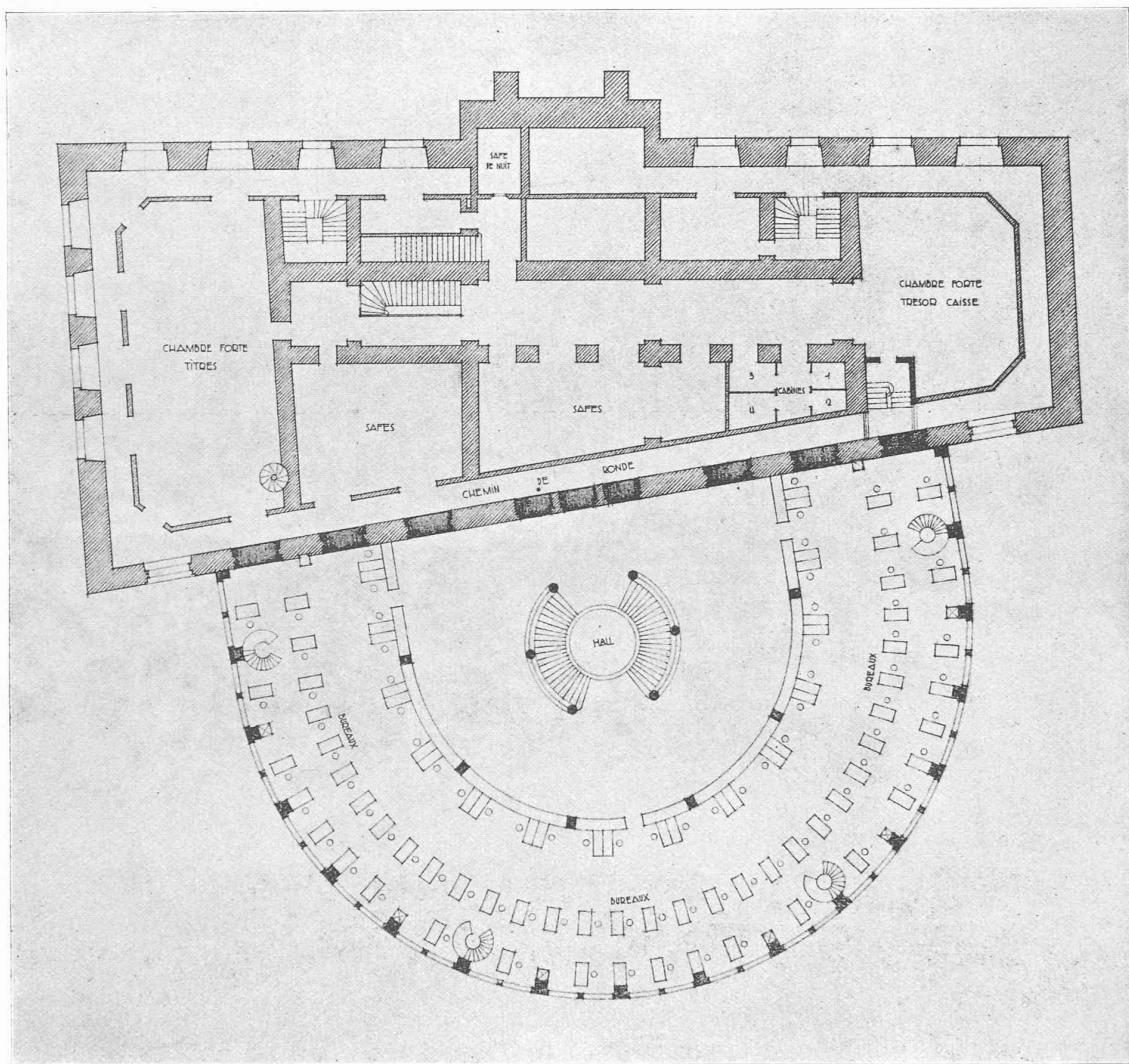
Dans un canal à *nappe libre*, les premières formules développées ici indiquent la hauteur de l'onde et sa vitesse de propagation (sa vitesse relative et sa vitesse absolue).

Il est certains cas d'écoulement en galerie, dans lesquels l'onde, si elle est assez haute pour remplir le profil, peut conduire momentanément à *mettre la galerie en charge*, mais le calcul des ouvrages ne serait pas satisfaisant si on se bornait à considérer une simple succession alternée des deux modes classiques de l'écoulement.

Le *régime mixte* apporte un élément nouveau dans le calcul des conduites en galerie et des chambres d'équilibre, à savoir : une réduction considérable du volume de ces dernières, sous la réserve toutefois que les conditions locales se prêtent à envisager tantôt la mise sous pression de l'écoulement en galerie, tantôt la nappe libre.

Ce qui fait sans doute que le régime mixte ait toujours été jusqu'ici rejeté, c'est probablement le fait qu'on ne croyait pouvoir s'astreindre à un calcul qui n'était ni l'un, ni l'autre des calculs classiques des conduites en charge et des conduites à libre écoulement. On attribuait aussi à l'emmagasinage de l'air dans la galerie, du fait du changement de régime, un rôle qu'il n'a pas dans la réalité. Quand l'onde avance ainsi progressivement, dans une galerie même longue et dont la pente est très faible, l'air s'échappe par les extrémités d'une manière complète. Les inquiétudes qu'on avait au sujet de *poches d'air* et qui sont très réelles dans les conduites sous pression fortement inclinées, ne paraissent pas avoir de bases sérieuses dans le cas présent. Il n'a pas été possible en tous cas d'obtenir à cet égard le résultat d'une seule expérience défavorable et les essais de Wetttingen sur un modèle à échelle réduite n'ont pas démontré, aux environs des têtes amont et aval, la formation de remous exceptionnels qui auraient pu être attribués à une poche d'air intérieure.

## CONCOURS BANQUE CANTONALE VAUDOISE



Plan du rez-de-chaussée. — 1 : 400.  
III<sup>me</sup> prix : M. R. Chapallaz, architecte.

Dans l'adoption du régime mixte, comme d'ailleurs dans celui des galeries à libre écoulement, il convient enfin de s'assurer toujours que les conditions imposées au débit de la galerie par le *réglage automatique* peuvent être dans tous les cas satisfaites sans qu'une rentrée d'air se produise dans les turbines.

Genève, le 10 juin 1931.

**Concours d'architecture ouvert par la Banque Cantonale Vaudoise, à Lausanne.**  
(Suite)<sup>1</sup>

N<sup>o</sup> 2. *Pas d'angle*. — Bonne implantation générale ; nouvelle artère bien disposée. Bonne composition de l'annexe en hémicycle ; mais l'escalier central important n'est pas à sa place ; il est grandement critiquable. L'entrée au sud n'est pas désirable. Bon arrangement du Service de titres. Les

<sup>1</sup> Voir *Bulletin technique* du 6 août 1932, page 194.

modifications prévues au rez-de-chaussée existant ne seraient pas sans inconvénients. Faible volume de construction.

N<sup>o</sup> 4. *B. C. V.* — Solution défavorable pour la nouvelle voie. L'annexe, de dimensions peu modestes, possède un hall bien conditionné. Le Service des titres est favorable. Modifications importantes du rez-de-chaussée actuel. Les modifications prévues au 1<sup>er</sup> étage sont superflues et sans intérêt. Manque d'étude et de caractère dans l'indication de l'architecture extérieure.

(A suivre.)

## CHRONIQUE

### Construction en béton armé.

*Nouvelle ordonnance fédérale.*  
Vendredi, 29 juillet, s'est tenue à Lausanne une séance de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes qui discuta, pour la dernière fois, le projet d'ordonnance fédérale et de règlement de la Société suisse des ingénieurs et des architectes concernant les constructions en béton et béton armé.