**Zeitschrift:** Bulletin technique de la Suisse romande

**Band:** 63 (1937)

**Heft:** 8

**Artikel:** Expériences sur le mouvement permanent de l'eau dans les canaux découverts, avec apport ou prélèvement le long du courant

**Autor:** Favre, H. / Braendle, F.

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-48440

**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:** 12.07.2025

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

63e année 10 avril 1937 N° 8

# 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.

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

CONSEIL D'ADMINISTRATION DE LA SOCIÉTÉ ANONYME DU BULLETIN TECHNIQUE
A. Dommer, ingénieur, président ; G. Epitaux, architecte ; M. Imer.

SOMMAIRE : *Expériences sur le mouvement permanent de l'eau dans les canaux découverts, avec apport ou prélèvement le long du courant,* par H. Favre, Dr ès sc. techn. et F. Braendle, Ing. dipl. — *Concours pour un projet de Crématoire, à Vevey* (suite et fin). — *Le téléférique Asmara-Massaoua.* — Divers : *Transformation partielle en trolleybus du réseau des Tramways lausonnois.* — *Orthophonie et architectes.* — *Fondation George Montefiore.* — Sociétés : *Société suisse des ingénieurs et des architectes.* — *Société vaudoise des ingénieurs et des architectes.* — Bibliographie. — Service de placement.

# Expériences
## sur le mouvement permanent de l'eau dans les canaux découverts, avec apport ou prélèvement le long du courant,

par H. FAVRE, Dr ès sc. techn. et F. BRAENDLE, Ing. dipl.
Laboratoire de recherches hydrauliques annexé à l'Ecole polytechnique fédérale, à Zurich.

### § 1. Introduction.

Les hydrauliciens ont développé, dans le courant du siècle dernier, des méthodes de calcul pour la détermination des courbes de remous dans les canaux découverts, lorsque le mouvement de l'eau est permanent et à débit constant le long du courant. Dans de très nombreux cas pratiques, cependant, le débit varie d'un profil à l'autre, bien que le mouvement soit permanent (c'est-à-dire à caractéristiques indépendantes du temps). Considérons, par exemple, un canal collectant l'eau de déversoirs disposés latéralement. Il résulte de cet apport latéral que, dans le canal, *le débit ira en croissant de l'amont vers l'aval.* Imaginons, au contraire, un déversoir, destiné à servir de trop plein, placé sur l'un des bords d'un canal. Lorsque ce déversoir débite, il prélève une certaine quantité d'eau dans le canal où *le débit est alors décroissant d'amont vers l'aval.*

Le Laboratoire de recherches hydrauliques annexé à l'Ecole polytechnique fédérale a donné, dans un mémoire paru en 1933, une méthode tout à fait générale pour le calcul des courbes de remous dans les canaux découverts à débits variables [1]. Dans ce mémoire, l'auteur a montré également la bonne concordance entre les résultats donnés par cette méthode et un certain nombre d'expériences sur modèles réduits effectuées dans les laboratoires de Dresde, Brünn et Zurich. En 1934, une nouvelle vérification a été donnée par les études, aussi bien expérimentales que théoriques, entreprises à Zurich pour l'élaboration d'un avant-projet des évacuateurs de crues du « Boulder Dam » [2].

Cependant, à l'exception de la dernière citée, toutes ces vérifications expérimentales ne permettaient pas d'affirmer que les termes introduits dans les équations pour tenir compte de la rugosité des parois étaient exacts. Comme dans certains cas pratiques ces termes peuvent jouer un rôle d'une certaine importance, nous avons jugé utile de faire de nouvelles expériences pour trancher la question.

Le présent mémoire a précisément pour objet de donner un compte rendu de ces expériences. Elles ont été effectuées au Laboratoire de Zurich, sous la haute direction du professeur Dr E. Meyer-Peter.

Dans une courte partie théorique, nous établirons les équations fondamentales régissant le mouvement varié de l'eau dans les canaux découverts à débit variable, en utilisant des développements aussi simples que possible. Puis nous décrirons les diverses expériences dont les résultats seront ensuite comparés à ceux du calcul.

[1] H. Favre : *Contribution à l'étude des courants liquides.* Editions Rascher & Cie, Zurich 1933.

[2] Dr E. Meyer-Peter and Dr Henry Favre : *Analysis of Boulder Dam Spillways. Made by Swiss Laboratory.* Engineering News-Record. October 25 1934.

*Centenaire de la S. I. A. — 4-5 Septembre 1937, à Berne.*

**§ 2. Equation fondamentale du mouvement permanent graduellement varié dans les canaux découverts, avec apport ou prélèvement le long du courant.**

Considérons un courant liquide dans un canal découvert, recevant sur son parcours un apport d'eau, ou au contraire subissant un prélèvement (Fig. 1). Nous admettons que la perturbation créée par cet apport, ou ce prélèvement, soit suffisamment faible pour que le mouvement dans le canal ait, dans son ensemble, le caractère d'un régime graduellement varié. Cela signifie que l'eau ajoutée ou enlevée ne doit pas avoir un débit trop élevé par unité de longueur du canal, et que la vitesse d'arrivée ou de départ de cette eau ne dépasse pas certaines limites. Dans la pratique, ces deux conditions sont toujours remplies, sauf dans quelques rares cas exceptionnels.

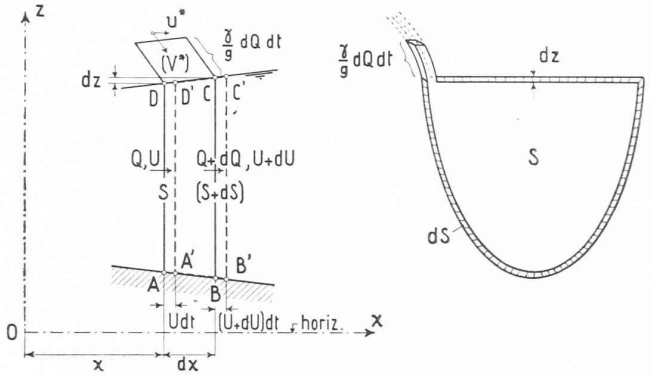



Fig. 1. — Canal découvert à débit variable le long du courant : cas d'un apport latéral (cet apport atteint le courant principal à sa surface libre, mais il pourrait tout aussi bien l'atteindre par des ouvertures percées dans les parois, au-dessous de la surface).

Désignons par $S$ l'aire d'un profil d'abscisse $x$, par $Q$ et $U$ le débit et la vitesse moyenne en ce profil. Les grandeurs correspondantes, relatives au profil d'abscisse $x + dx$, seront $S + dS$, $Q + dQ$, $U + dU$. La variation $dQ$ n'est autre que le débit d'apport d'eau — ou de prélèvement — relatif au secteur $dx$. Cette variation sera comptée positivement dans le premier cas, négativement dans le second. Pour fixer les idées, supposons $dQ$ positif.

Considérons, au temps $t$, la masse d'eau se composant des deux parties suivantes :

1. la masse $ABCD$ comprise, dans le canal, entre les deux profils d'abscisses $x$ et $x + dx$ ;

2. la masse $\frac{\gamma}{g} dQ\, dt$, apport de l'extérieur pour le secteur $dx$ et l'intervalle de temps $dt$.

Au temps $t + dt$, ces deux parties auront fusionné et occuperont ensemble l'espace $A' B' C' D'$ (voir Fig. 1).

Nous allons appliquer à la masse considérée le théorème des projections des quantités de mouvement. Nous projetons sur l'axe horizontal $x$.

La variation, pendant l'intervalle $dt$, de la projection sur l'axe des $x$ de la quantité de mouvement de cette masse, a pour expression :

$$\frac{\gamma}{g} (Q + dQ)(U + dU)\, dt - \frac{\gamma}{g} Q\, U\, dt - \frac{\gamma}{g} u^* \, dQ\, dt,$$

où $u^*$ représente la composante, parallèle à l'axe des $x$, de la vitesse $V^*$ avec laquelle arrive le débit $dQ$ dans le courant principal, $\gamma$ le poids spécifique de l'eau, $g$ l'accélération de la pesanteur.

Les deux premiers termes de cette expression représentent les flux de quantité de mouvement à travers les profils $x + dx$ et $x$, pendant le temps $dt$. Le troisième terme est le flux de quantité de mouvement à travers les surfaces limitant l'écoulement dans le canal et comprises entre les deux profils considérés.

La dérivée, par rapport au temps, de la projection sur l'axe des $x$ de la quantité de mouvement, s'obtiendra en divisant par $dt$ l'expression ci-dessus :

$$\frac{1}{dt}\left[\frac{\gamma}{g} (Q + dQ)(U + dU)\, dt - \frac{\gamma}{g} QU\, dt - \frac{\gamma}{g} u^* \, dQ\, dt\right].$$

Cette dérivée s'écrit, après quelques simplifications et en négligeant un infiniment petit du second ordre :

$$\frac{\gamma}{g} [Q\, dU + (U - u^*)\, dQ].$$

D'autre part la somme des projections, sur l'axe des $x$, des forces extérieures agissant sur la masse considérée dans l'intervalle $dt$, se compose :

1. d'un terme $-\gamma S dz$, où $dz$ représente la variation du niveau de la surface entre les deux profils considérés (Fig. 1). — $\gamma S dz$ n'est autre que la composante, parallèle à $x$, des pressions normales agissant sur les surfaces limitant la masse $ABCD$ (aux infiniment petits du second ordre près) ;

2. d'un terme provenant des efforts tangentiels agissant sur la masse considérée au contact avec les parois du canal. Le choix de ce terme nécessite quelques remarques.

*Dans le cas du mouvement uniforme*, les différentes grandeurs caractérisant le canal et l'écoulement sont liées par une relation. De toutes celles qui ont été proposées nous choisirons celle de Gauckler-Strickler, exprimée par la formule

$$U = k R^{2/3} J^{1/2}, \qquad (1)$$

de plus en plus en usage aujourd'hui, et dans laquelle

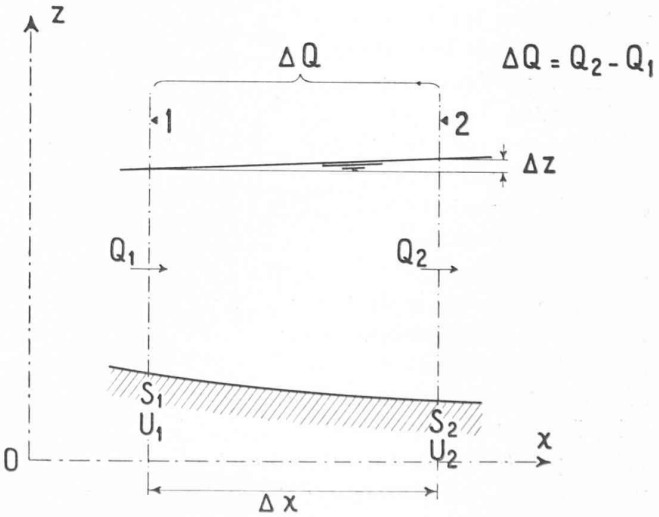



Fig. 2. — Canal découvert à débit variable le long du courant.

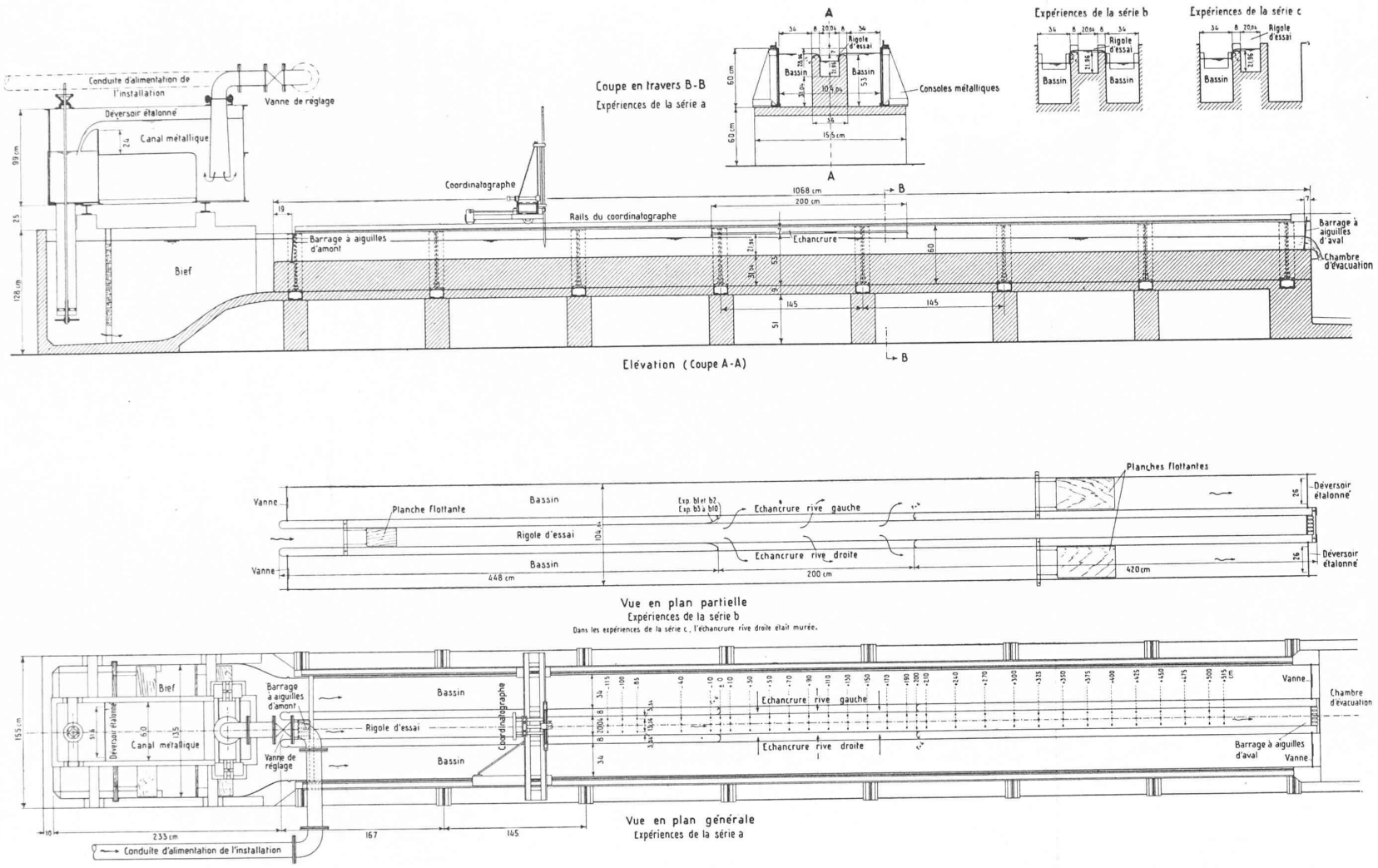



Fig. 3. — Elévation et plan de l'installation d'essai.

$U$ représente la vitesse moyenne du courant, $k$, un coefficient dépendant de la rugosité des parois du canal, $R$, le rayon moyen du profil, $J$, la pente de la surface. Dans ces conditions, les efforts tangentiels au contact des parois ont pour valeur

$$-\gamma \frac{U^2}{k^2 R^{4/3}} S dx.$$

On sait également que *si le régime est graduellement varié mais le débit constant*, les efforts tangentiels ont sensiblement la même valeur que dans le cas du régime uniforme [1].

*Dans notre cas, le débit est variable* mais ayant supposé que la perturbation créée par la variation du débit est assez faible pour que le régime puisse être considéré comme graduellement varié, il nous paraît indiqué de faire l'hypothèse que dans ce cas encore les efforts tangentiels conservent la même valeur que pour le mouvement uniforme. Nous supposerons donc que ces efforts soient représentés par l'expression

$$-\gamma \frac{U^2}{k^2 R^{4/3}} S dx.$$

Nous verrons plus loin que cette manière de voir a été complètement confirmée par les expériences.

Ecrivons maintenant que la dérivée par rapport au temps, de la projection sur l'axe des $x$ de la quantité de mouvement de la masse considérée, est égale à la somme des projections, sur le même axe, des forces extérieures agissant sur cette masse. Nous obtenons la relation suivante :

$$\frac{\gamma}{g}[QdU + (U - u^*)\,dQ] = -\gamma S dz - \gamma \frac{U^2}{k^2 R^{4/3}} S dx.$$

Résolvons cette équation par rapport à $-dz$ :

$$-dz = +\frac{U^2}{k^2 R^{4/3}} dx + \frac{UdU}{g} + \left(1 - \frac{u^*}{U}\right) \frac{QdQ}{g \cdot S^2}. \quad (2)$$

Telle est l'équation différentielle régissant le mouvement de l'eau. Elle n'est en général pas intégrable, sauf dans certains cas particuliers [2]. Mais nous pouvons l'utiliser en l'écrivant sous forme de différences finies, en considérant, non plus deux profils très voisins distants de $dx$, mais deux profils *1* et *2* distants de $\Delta x$ (Fig. 2). La relation (2) s'écrit alors, après quelques transformations :

$$-\Delta z = +\frac{U_m^2}{k^2 R_m^{4/3}} \Delta x + \frac{U_2^2 - U_1^2}{2g} + \left(1 - \frac{u^*}{U_m}\right) \frac{Q_2^2 - Q_1^2}{2 g S_m}. \quad (3)$$

Dans cette équation :

$U_1$, $U_2$, $Q_1$, $Q_2$ représentent les vitesses et les débits relatifs aux profils *1* et *2* ;

$U_m$, $R_m$, $S_m$ les valeurs moyennes de la vitesse, du rayon moyen et de l'aire du profil, entre *1* et *2* ;

$u^*$ la projection sur l'axe des $x$ de la vitesse de l'apport ou du prélèvement d'eau relatif au secteur $\Delta x$ ; [3]

[1] Ce fait est démontré principalement par certaines expériences de Bazin (voir Darcy et Ba in, Paris, 1865, Dunod. 1re partie, p. 35, 268 et suiv.)

[2] H. Favre : *Contribution à l'étude des courants liquides*. Aux p. 39 et suiv. de ce mémoire est donné un exemple d'intégration.

[3] Dans le cas de courants à forte pente, il sera préférable de prendre la projection sur l'axe moyen du courant.

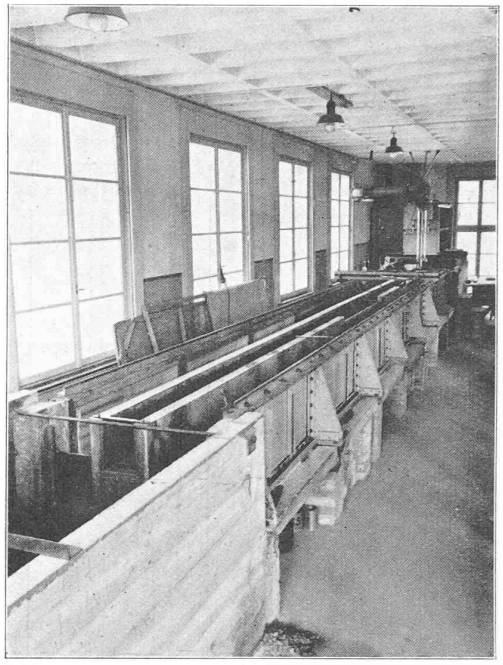


Fig. 4. — Vue de l'installation d'essai.

$\Delta z$ la différence des niveaux aux profils *1* et *2* ;

$\Delta x$ la distance de ces deux profils ;

$k$ le coefficient de rugosité des parois du canal.

L'équation (3) permet de calculer de proche en proche la courbe de remous d'un mouvement à débit variable. Elle s'applique aussi bien au cas d'un apport d'eau extérieur ($Q_2 - Q_1 = \Delta Q > 0$) que d'un prélèvement ($\Delta Q < 0$).

Comme nous l'avons déjà dit dans l'introduction, l'objet des essais que nous allons décrire a principalement été de reconnaître si le troisième terme de l'équation (3) est bien exact. Dans le choix de ce terme réside en effet la seule hypothèse quelque peu arbitraire de nos calculs [1].

### § 3. Description de l'installation d'essai.

Les figures 3 et 4 montrent cette installation. Elle comprenait :

[1] Si l'on utilisait, pour la formule du régime uniforme, non pas la relation de Strickler (1), mais l'équation générale préconisée par les hydrodynamiciens

$$J = \frac{1}{2g} \cdot \lambda \cdot \frac{U^2}{R}, \quad (1 \text{ bis})$$

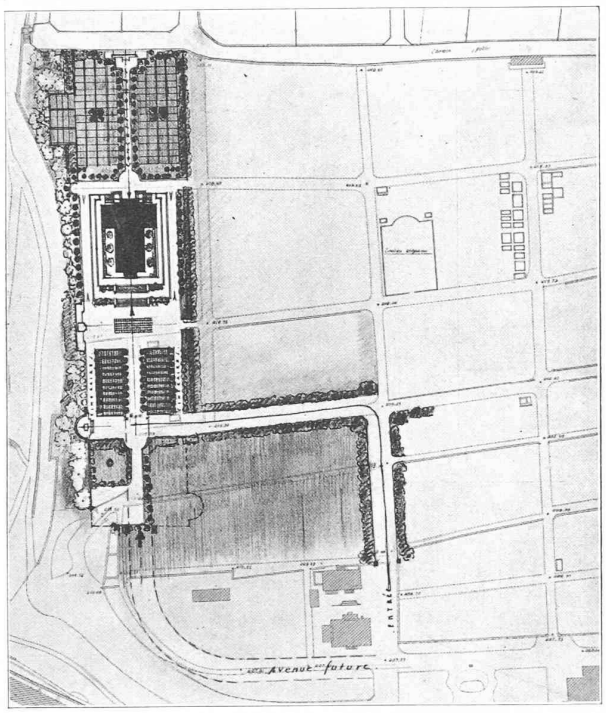
dans laquelle $\lambda$ est un nombre dépendant de la rugosité relative $\frac{\epsilon}{R}$ et du nombre de Reynolds $\frac{U.R}{\nu}$ (où $\epsilon$ est une longueur figurant la rugosité absolue des parois et du fond, $\nu$ la viscosité cinématique de l'eau), on obtiendrait à la place de (2) la relation suivante :

$$-dz = +\frac{\lambda}{2g} \cdot \frac{U^2}{R} dx + \frac{UdU}{g} + \left(1 - \frac{u^*}{U}\right) \frac{QdQ}{g.S^2}, \quad (2 \text{ bis})$$

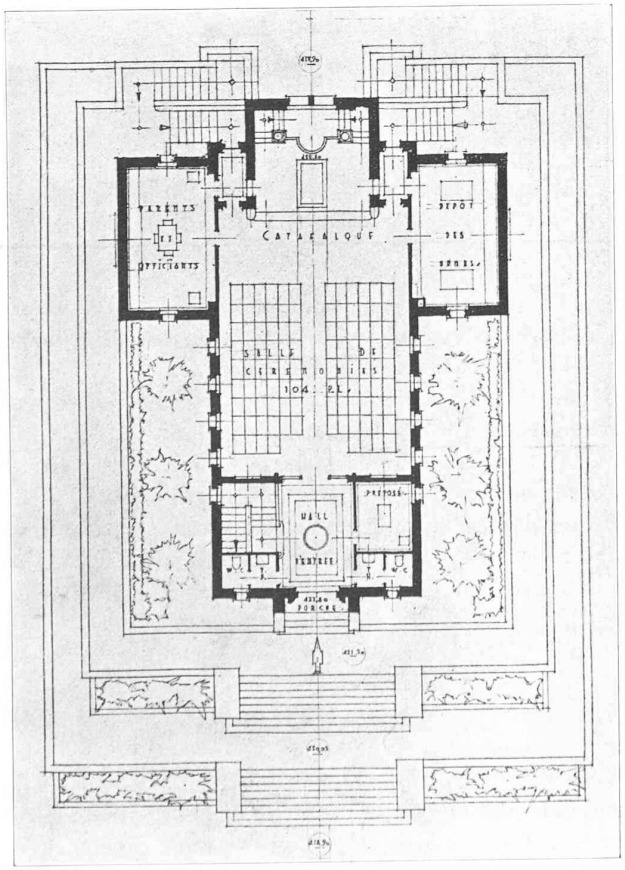
tandis que (3) deviendrait :

$$-\Delta z = +\frac{\lambda}{2g} \frac{U_m^2}{R_m} \Delta x + \frac{U_2^2 - U_1^2}{2g} + \left(1 - \frac{u^*}{U_m}\right) \frac{Q_2^2 - Q_1^2}{2 g S_m}. \quad (3 \text{ bis})$$

On pourrait de même établir les équations correspondant aux formules de Bazin, Ganguillet et Kutter, etc. Toutes les équations ainsi obtenues sont équivalentes, en ce sens qu'elles supposent que l'influence de la rugosité des parois est la même que dans le cas du régime uniforme. C'est pourquoi nous nous sommes contentés de vérifier expérimentalement l'une d'elles seulement l'équation (3).




Plan de situation. — 1 : 2000.




Plan du rez-de-chaussée. — 1 : 300.

## CONCOURS POUR UN CRÉMATOIRE, A VEVEY

IIIe rang, projet « Olympe », de M. *André Barth*, architecte, à Lausanne.

**Jugement du jury :**

La qualité essentielle de ce projet réside dans une disposition concentrée. L'accès direct du corbillard devant la halle des fours, ce qui est un avantage certain, a obligé l'auteur à établir des terrasses et des escaliers de proportion exagérée. Pour accentuer l'architecture de son projet, l'auteur a été entraîné à exagérer la hauteur de la salle et des annexes, ces dernières ayant une hauteur de 8 m, alors que moins de la moitié suffirait. Pas de relation entre les services.

Coût de construction très élevé.

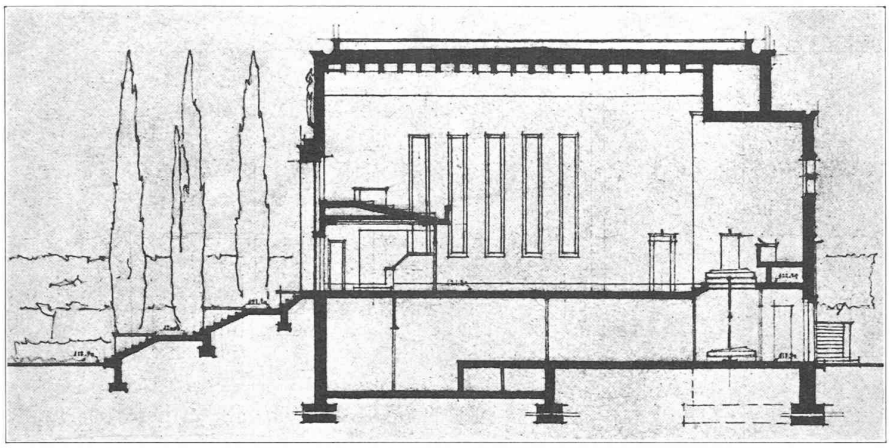
---

1. Une rigole d'essai de 10, 68 m de longueur, 20,04 cm de largeur et 28,96 cm de profondeur. Les parois de ce petit canal étaient, à partir d'un point situé à 4,48 m de l'entrée, arasées à 21,96 cm au-dessus du fond, sur une longueur de 2 m. Elles formaient ainsi deux échancrures symétriques par rapport à l'axe de la rigole. Pour une partie des expériences, le profil en travers des parois limitant ces échancrures était un demi-cercle de 4 cm de rayon (voir la vue en plan générale et la coupe en travers de l'installation, Fig. 3). Pour une autre partie, les parois limitant à l'amont les ouvertures avaient, en plan, un profil spécial (voir la vue en plan partielle, Fig. 3). Dans certaines expériences, l'une des échancrures, celle de la rive droite, a été murée. Un petit barrage à aiguilles, situé à l'entrée de la rigole, permettait de régler le débit. Un autre barrage à aiguilles, situé à l'autre extrémité, réglait le niveau aval. Le fond de la rigole était horizontal. Il reposait, ainsi que les parois, sur un socle de 36 cm de largeur et 31,04 cm de hauteur. Toute cette construction était en maçonnerie, recouverte d'un enduit de ciment lissé.

2. La rigole que nous venons de décrire était située à l'intérieur d'un canal d'environ même longueur qu'elle, mais dont le profil en travers, beaucoup plus grand, avait 1,04 m de largeur et 0,60 m de profondeur. De cette façon, on avait de chaque côté de la rigole et tout le long de celle-ci, deux bassins de 34 cm de largeur et 60 cm de profondeur. Comme nous le verrons plus loin, ces bassins servaient, soit à créer dans la rigole un mouvement à débit croissant, en déversant dans celle-ci une certaine quantité d'eau par les échancrures, soit au contraire à collecter l'eau ayant passé par ces échancrures, dans les cas où celles-ci, fonctionnant comme trop plein, créaient dans la rigole un mouvement à débit décroissant.

Chaque bassin possédait à l'amont deux rainures verticales, situées dans les parois, dans lesquelles on pouvait placer une vanne et à l'aval, deux rainures semblables, servant à fixer soit un déversoir à contraction latérale, soit une vanne.

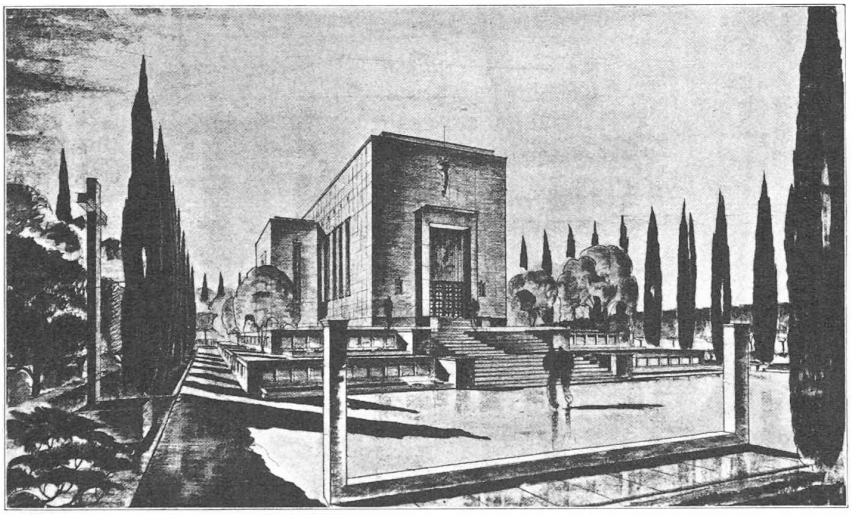
3. La rigole d'essai et les deux bassins étaient alimentés par un bief de 1,35 m × 2,33 m recevant lui-même l'eau d'un déversoir à contraction latérale étalonné placé dans un canal métallique de 60 cm de largeur, alimenté par une conduite dont on réglait le débit à l'aide d'une vanne.



Coupe longitudinale. — 1 : 300.

CONCOURS
POUR UN CRÉMATOIRE,
A VEVEY

III^me rang :
projet de M. *André Barth.*



Perspective.

4. A l'aval, rigole et bassins déversaient dans une chambre d'évacuation.

5. Ajoutons que sur les parois métalliques, distantes de 1,04 m et limitant à l'extérieur les bassins, était posé le chemin de roulement d'un coordinatographe, appareil précieux qui servit aussi bien à la pose des gabarits pour la construction de la rigole d'essai qu'à faire les pointés de la surface de l'eau pendant les expériences. La tige verticale de cet appareil était terminée à sa partie inférieure par une pointe dont la position était lue à une échelle graduée en millimètres permettant une bonne évaluation du dixième de millimètre.

*(A suivre.)*

# Le téléférique Asmara-Massaoua[1].

En vue de décongestionner le trafic de la route camionnable et du chemin de fer qui relient le port de Massaoua à Asmara, le Gouvernement italien a établi un troisième moyen de communication rapide : le téléférique.

[1] Nous devons la communication de cette note à l'obligeance de M. le Consul du Royaume d'Italie et de l'Empire d'Ethiopie à Lausanne. — *Réd.*

Cet appareil de transport a une longueur totale de 75 km environ et comprend quatre tronçons principaux, divisés à leur tour en diverses sections.

Il part de Godaif (Faubourg d'Asmara, relié directement aux grandes routes camionnables du sud, altitude 2377 m) et atteint les environs de Massaoua, aux deux endroits indiqués ci-dessous. (Voir la vue à la page 101.)

Etant donnée la configuration du terrain, on a choisi un tracé s'écartant sensiblement de la ligne droite. La plus grande longueur du trajet, ainsi obtenue, est toutefois largement compensée par les avantages d'ordre technique qui en découlent, avantages qui sont surtout appréciables du point de vue de la sécurité.

Les quatre tronçons principaux de la ligne sont les suivants :

1. *Godaif—Guinda*, en passant par Wéfasit, où la ligne fait un coude et où se trouve une station de raccordement. Longueur du tronçon : 27 km ; différence de niveau : 1531 m.

2. *Guinda—Mai-Atal*, comportant deux stations de