

**Zeitschrift:** Bulletin technique de la Suisse romande  
**Band:** 63 (1937)  
**Heft:** 11

**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-48449>

### **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

Paraissant tous les 15 jours

**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 & C<sup>ie</sup>, à Lausanne.

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 :** Commission centrale pour la navigation du Rhin. — Expériences sur le mouvement permanent de l'eau dans les canaux découverts, avec apport ou prélèvement le long du courant (suite et fin), par H. FAVRE, Dr ès sc. techn. et F. BRAENDLE, Ing. dipl. — Terrassement des lacs d'accumulation, par G. MATHYS, ingénieur, à Bâle. — Nombre de consommateurs homogènes simultanément admissibles dans une installation centrale à eau chaude, par le Dr W. KUMMER, professeur à l'E. P. F., à Zurich. — Pour l'aménagement du Rhône. — Congrès international de l'habitation et de l'urbanisme. — Congrès international des applications de l'éclairage. — BIBLIOGRAPHIE. — CARNET DES CONCOURS. — NOUVEAUTÉS. — INFORMATIONS.

### COMMISSION CENTRALE POUR LA NAVIGATION DU RHIN

#### Compte rendu de la session d'avril 1937.

La Commission centrale pour la navigation du Rhin a tenu à Strasbourg, sa session de printemps, du 6 au 8 avril 1937 sous la présidence de M. Jean Gout, ministre plénipotentiaire, le Gouvernement allemand n'étant plus représenté au sein de la Commission conformément à sa note du 14 novembre 1936; d'autre part, la Délégation italienne a fait connaître la décision de son Gouvernement de ne plus prendre part dans les circonstances actuelles aux travaux de la Commission.

Dans l'expédition des affaires administratives courantes, il a été communiqué à la Commission que 58 patentes de batelier ont été délivrées en 1936 en Belgique, 19 en France, 453 aux Pays-Bas et 2 en Suisse; en outre 8 dérogations au minimum d'équipage ont été accordées, en 1936, en France, et aucune en Belgique, aux Pays-Bas et en Suisse.

Comme on le sait par les comptes rendus précédents, depuis plusieurs années, un Comité présidé par M. Herold, Commissaire suisse, travaillait activement à l'élaboration d'un nouveau règlement de police pour la navigation du Rhin; le Comité ayant achevé sa tâche, la Commission a pris connaissance du projet qu'il a établi et a renvoyé à la prochaine session la décision sur l'adoption de ce projet.

Il a été décidé d'établir, comme par le passé, le Rapport annuel pour l'année 1936, sur la base des données qui seraient fournies officiellement à la Commission par les administrations intéressées.

La date de la prochaine session a été fixée au jeudi 11 novembre 1937.

### 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.

(Suite et fin.)<sup>1</sup>

c) Expériences sur les mouvements à débit décroissant, avec prélèvement latéral d'un seul côté.

Cette série comprend 8 essais, numérotés de c1 à c8. Dans toutes ces expériences, l'échancrure de rive droite était murée. Celle de rive gauche débitait seule; ses parois avaient comme profil un demi-cercle, sauf celle limitant cette échancrure à l'amont, qui avait la forme indiquée à la vue en plan partielle de la figure 3.

La technique de ces expériences a été la même que celle des essais b), à cette exception près qu'un seul des deux déversoirs était utilisé.

Le tableau III, colonnes 2 à 7, donne les principales caractéristiques des essais et la figure 14, les profils en long de la surface de quatre expériences (c3 à c6).

Les figures 15 à 18 sont des vues de la surface pendant les essais c1 et c2. Les figures 15 et 16 montrent que l'on avait isolé la partie du bassin située à l'amont des déversoirs. Cette isolation a été reconnue nécessaire pour empêcher la naissance dans ce bassin d'oscillations, qui auraient rendu difficile la mesure de la hauteur de la nappe sur le déversoir à contraction latérale situé à l'aval.

<sup>1</sup> Voir Bulletin technique du 24 avril 1937, page 109.

TABLEAU III.  
Expériences sur les mouvements à débit décroissant avec prélèvement latéral par une seule échancrure  
Comparaison des résultats des calculs et des expériences.

Résultats des expériences						Résultats des calculs et leur comparaison aux expériences								
Numéro de l'expérience	$Q_m$ débit dans la rigole à l'amont des échancrures (mesuré)	$Q_d$ débit des deux échancrures = prélèvement latéral (mesuré)	$Q_v$ débit dans la rigole à l'aval des échancrures = $Q_m + Q_d$	$Z_{+400}$ Niveau de la surface au profil + 400 (mesuré)	$Z_{-100}$ Niveau de la surface au profil - 100 (mesuré)	$\Sigma \Delta Z_{mesuré}$ $= Z_{+400} - Z_{-100}$	$\Sigma \Delta Z$ calculé à l'aide de l'équation (6) complète	$\Sigma \Delta Z_{mesuré}$ à l'aide de l'équation (6) complète	$\Sigma \Delta Z$ calculé à l'aide de l'équation (6) privée du terme dû à la rugosité des parois	$\Sigma \Delta Z_{mesuré}$ à l'aide de l'équation (6) réduite	$Q_d$ obtenu par le calcul à l'aide de l'équation (6) complète	$Q_d$ obtenu par le calcul à l'aide de l'équation (6) privée du terme dû à la rugosité des parois	$Q_d$ mesuré - $Q_d$ calculé équation (6) complète	$Q_d$ mesuré - $Q_d$ calculé équation (6) réduite
	$dm^3 : s$	$dm^3 : s$	$dm^3 : s$	cm	cm	cm	cm	cm	cm	$dm^3 : s$	$dm^3 : s$	$dm^3 : s$	$dm^3 : s$	$dm^3 : s$
c1	25,00	-10,00	15,00	24,26	23,68	+0,58	+0,65	-0,07	+0,73	-0,15	-10,08	-9,79	+0,08	-0,21
c2	25,00	-25,00	0,00	25,71	24,87	+0,84	+1,06	-0,22	+1,10	-0,26	-23,85	-23,65	-1,15	-1,35
c3	20,00	-5,00	15,00	23,34	23,14	+0,20	+0,17	+0,03	+0,26	-0,06	-5,15	-5,15	+0,15	-0,11
c4	20,00	-10,00	10,00	24,18	23,71	+0,47	+0,51	+0,04	+0,58	-0,11	-10,10	-9,93	+0,10	-0,07
c5	20,00	-15,00	5,00	24,77	24,17	+0,60	+0,67	-0,07	+0,74	-0,14	-14,95	-14,81	-0,05	-0,19
c6	20,00	-20,00	0,00	25,17	24,63	+0,54	+0,70	-0,16	+0,74	-0,20	-19,50	-19,31	-0,50	-0,69
c7	15,00	-15,00	0,00	24,56	24,29	+0,27	+0,39	-0,12	+0,44	-0,17	-14,50	-14,57	-0,50	-0,43
c8	10,00	-10,00	0,00	23,98	23,84	+0,14	+0,18	-0,04	+0,20	-0,06	-9,95	-9,96	-0,05	-0,04
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Les courbes de remous indiquées à la figure 14 et, d'une façon générale, tous les résultats de cette série d'essais, donnent lieu aux mêmes remarques que celles que nous avons faites en décrivant les essais b.

### § 5. Comparaison des résultats donnés par l'expérience à ceux que l'on obtient par le calcul.

a) *Expériences de la série a* (débit croissant, avec apport latéral par les deux échancrures).

Les courbes de remous ont été calculées en partant du niveau moyen  $Z_{+400}$  et en progressant de l'aval vers l'amont. Le mouvement de l'eau étant, pour un débit

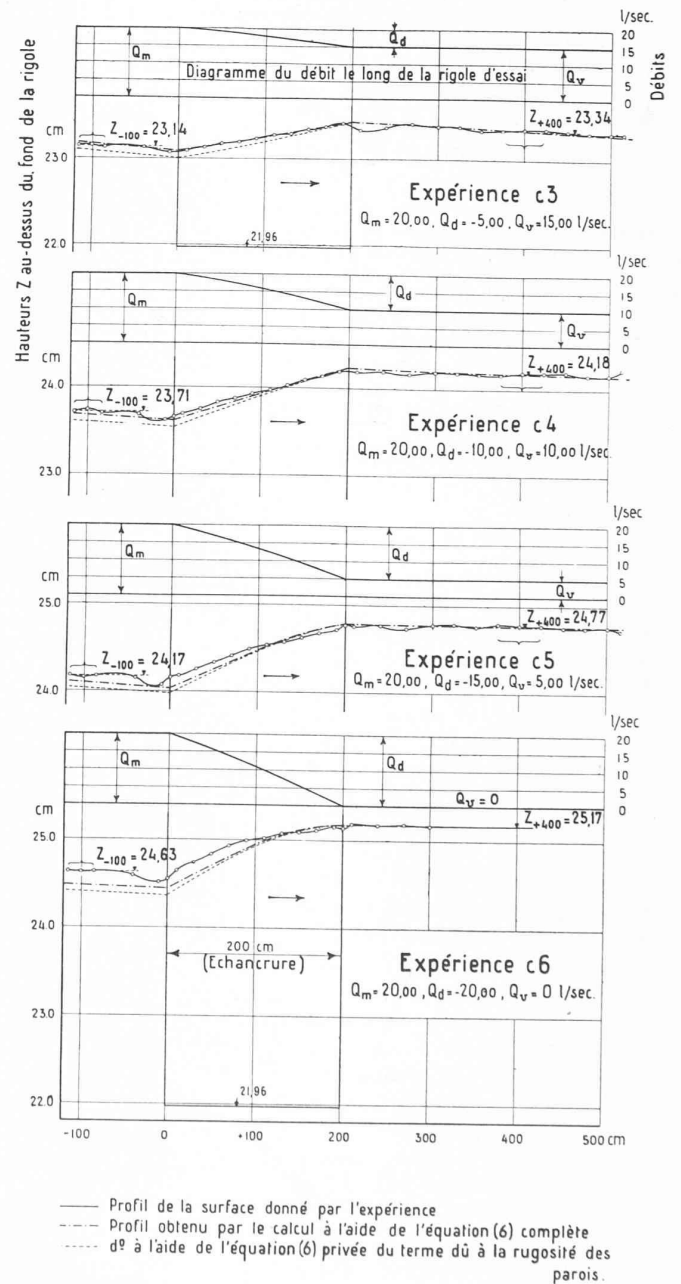


Fig. 14. — Expériences sur les mouvements à débit décroissant, avec prélèvement latéral d'un seul côté (série c). Profils en long de la surface donnés par quelques expériences et profils correspondants obtenus par le calcul.

donné, sous l'influence de l'aval (mouvement tranquille), il était, en effet, indiqué de faire le calcul dans le même sens qu'il serait nécessaire de le faire dans un cas pratique analogue.

Dans le secteur situé à l'aval des déversoirs, nous avons utilisé l'équation (3) spécifiée pour  $Q_1 = Q_2$ , c'est-

à-dire l'équation ordinaire des mouvements graduellement variés à débit constant :

$$-\Delta z = \frac{U_m^2}{k^2 R_m^{4/3}} \Delta x + \frac{U_2^2 - U_1^2}{2g}. \quad (4)$$

Nous avons divisé ce secteur, limité à l'aval par le profil + 400 (point de départ du calcul) et à l'amont

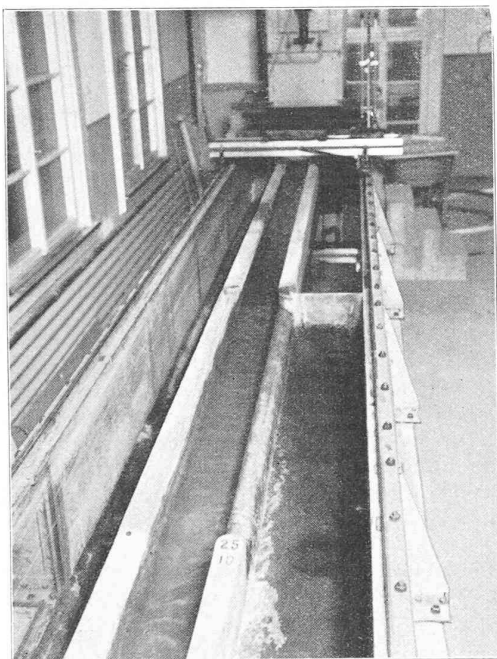


Fig. 15. — Vue de la rigole pendant l'essai *c1*.

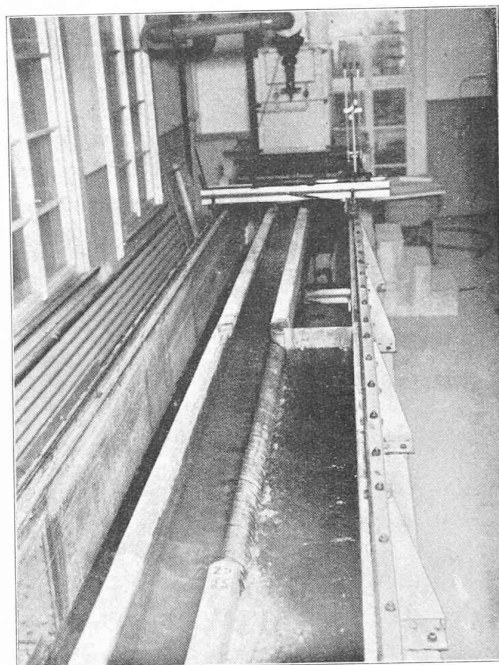


Fig. 16. — Vue de la rigole pendant l'essai *c2*.

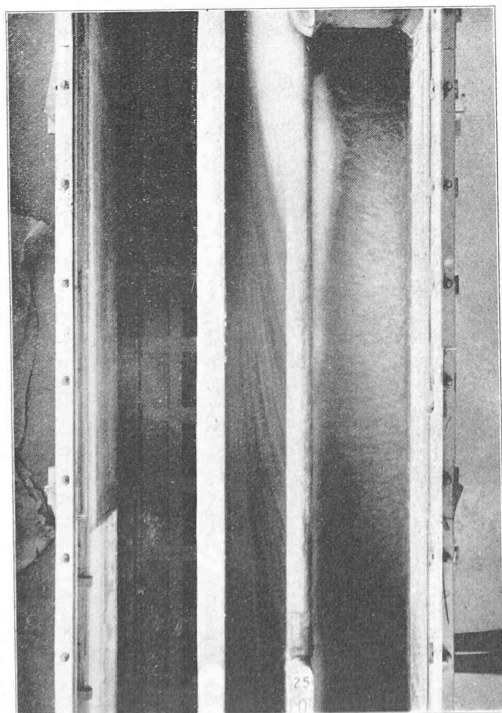
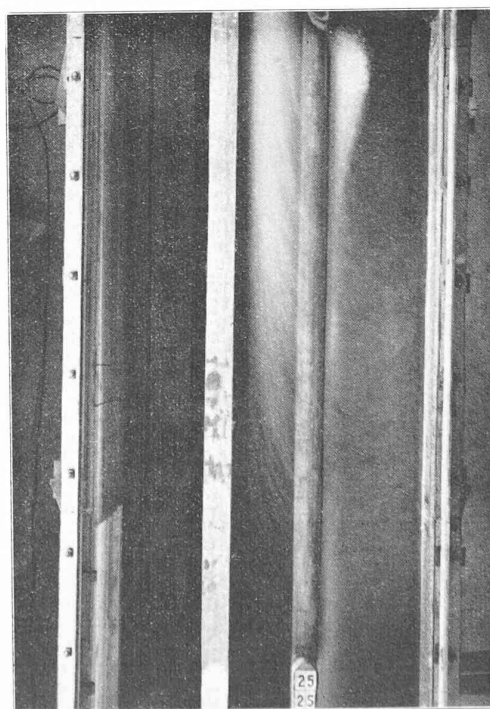


Fig. 17. — Vue en plan des filets liquides voisins de la surface. Essai *c1*.



Art. 18. — Vue en plan des filets liquides voisins de la surface. Essai *c2*.

par le profil + 200 (extrémité aval des échancrures), en deux éléments de longueur  $\Delta x = 100 \text{ cm}^1$ .

Pour chaque élément, le calcul a été fait par approximations successives, en choisissant tout d'abord arbitrairement une valeur de  $\Delta z$ , ce qui permettait de déterminer toutes les grandeurs figurant au membre de droite de (4) et d'obtenir ainsi, à l'aide de cette équation, une valeur de première approximation pour  $\Delta z$ . Cette approximation permettait de déduire de meilleures valeurs pour les grandeurs figurant au membre de droite (4) et d'obtenir une seconde approximation pour  $\Delta z$ . On continuait ainsi jusqu'à ce que la différence de deux valeurs consécutives  $\Delta z$  soit de l'ordre de quelques centièmes de mm. De cette façon on était certain que la dernière valeur  $\Delta z$  était exacte à moins d'un dixième de mm près.

Dans le secteur correspondant aux échancrures, compris entre les profils + 200 et  $\pm 0$ , secteur où le débit variait, nous avons utilisé l'équation (3) spécifiée pour  $u^* = 0$ :

$$-\Delta z = \frac{U_m^2}{k^2 R_m^{4/3}} \Delta x + \frac{U_2^2 - U_1^2}{2g} + \frac{Q_2^2 - Q_1^2}{2g \cdot S_m^2}, \quad (5)$$

car la vitesse  $V^*$  étant, comme nous l'avons vu, dans un plan vertical perpendiculaire à l'axe de la rigole, sa composante parallèle au courant  $u^*$  était nulle.

Ce secteur a été divisé en quatre éléments de longueur  $\Delta x = 50 \text{ cm}$ .

Le débit dans la rigole variant linéairement entre les limites  $Q_v$  (profil + 200) et  $Q_m$  (profil  $\pm 0$ ), nous avons pu facilement calculer les débits  $Q_1$  et  $Q_2$  aux extrémités de chaque élément  $\Delta x$ .

Pour chaque élément, le calcul a été fait par approximations successives, à l'aide de l'équation 5, en procédant comme nous l'avons indiqué ci-dessus pour l'équation (4).

Enfin dans le secteur situé à l'amont des échancrures, on a calculé à l'aide d'un seul élément  $\Delta x = 100 \text{ cm}$  le niveau au profil - 100 à l'aide de l'équation (4).

Chaque essai a donné lieu à deux calculs. Le premier a été fait en utilisant, dans le secteur où le débit variait, l'équation (5) complète, en prenant pour le coefficient de rugosité  $k$  les valeurs données par le diagramme de la figure 5. Quelques-unes des courbes de remous ainsi calculées, celles relatives aux essais a1, a3, a4, a5, sont indiquées en trait mixte à la figure 7. On constate que le profil obtenu par trait mixte à la figure 7. On constate que le profil obtenu par l'expérience, aux irrégularités locales près. Ceci est tout à fait compréhensible, car les irrégularités de la surface dépendent en première ligne des composantes verticales de l'accélération des particules d'eau, composantes que nous avons négligées dans nos calculs. Leur mise en équation aurait en effet conduit à des résultats si compliqués qu'ils auraient certainement rendu prohibitive l'application de la théorie à des problèmes concrets, sans pour cela augmenter l'exactitude d'une quantité appréciable pour le praticien.

<sup>1</sup> Pour compléter la courbe de remous à l'aval du profil + 400, on a encore calculé le niveau au profil + 500 en partant de  $Z_{+400}$ .

Dans la colonne 8 du tableau I, nous avons reporté, pour tous les essais de cette série, les valeurs  $\Sigma \Delta z = Z_{+400} - Z_{-100}$  obtenues par le calcul avec l'équation (5) complète. Les différences entre les valeurs  $\Sigma \Delta z$  mesurées, données à la colonne 7, et celles dont nous venons de parler, sont indiquées à la colonne 9. On constate que ces différences, si elles sont en général négatives, n'atteignent en moyenne que l'ordre du millimètre, ce qui ne représente que quelques pour cent des valeurs  $\Sigma \Delta z$  qui sont ici de l'ordre de quelques centimètres. Théorie et expérience donnent donc des résultats tout à fait concordants.

Afin de nous rendre compte du rôle joué par le terme  $\frac{U_m^2}{k^2 R_m^{4/3}} \Delta x$  de l'équation (5), nous avons fait également tous les calculs en supposant ce terme égal à zéro dans le secteur où le débit variait (équation (5) réduite). Les courbes obtenues en négligeant ce terme sont dessinées en trait interrompu à la figure 7. On voit immédiatement qu'elles s'écartent beaucoup plus des profils donnés par les expériences que les courbes à trait mixte correspondant au calcul avec l'équation (5) complète.

Dans le tableau I, colonne 10, nous avons indiqué les valeurs  $\Sigma \Delta z$  calculées au moyen de l'équation (5) réduite, et à la colonne (11), les différences entre les valeurs  $\Sigma \Delta z$  mesurées et celles dont nous venons de parler. On constate qu'en général ces différences sont de l'ordre de plusieurs millimètres, tandis qu'en utilisant l'équation (5) complète elles ne sont que de l'ordre du millimètre (colonne 9).

Nous pouvons donc conclure que les expériences dans lesquelles le débit était croissant confirment la validité de l'équation (5), qui n'est autre que (3) spécifiée pour  $u^* = 0$ , y compris le terme dû à la rugosité des parois

$\frac{U_m^2}{k^2 R_m^{4/3}} \Delta x$ , dans lequel  $k$  est le coefficient ordinaire de la formule de Strickler. En d'autres termes: l'influence de la rugosité des parois sur le mouvement de l'eau est la même que dans le cas du régime uniforme ou encore du régime graduellement varié à débit constant.

b) *Expériences de la série b* (débit décroissant, avec prélèvement latéral par les deux échancrures).

Les courbes de remous ont été calculées en partant du niveau moyen  $Z_{+400}$  et en progressant d'aval vers l'amont. Le mouvement était en effet, comme pour la série a, sous l'influence des conditions d'aval. Les profils limitant les secteurs où nous avons appliqué les équations par différences finies étaient les mêmes que précédemment. Dans les secteurs à l'aval et à l'amont des échancrures, le calcul a été fait à l'aide de l'équation ordinaire (4).

Dans le secteur où le débit variait, nous avons utilisé l'équation (3) spécifiée pour  $u^* = U_m$ :

$$-\Delta z = \frac{U_m^2}{k^2 R_m^{4/3}} \Delta x + \frac{U_2^2 - U_1^2}{2g}, \quad (6)$$

car la composante  $u^*$  de la vitesse de prélèvement  $V^*$  était égale à la vitesse  $U_m$  dans la rigole. En effet, au moment où une particule d'eau quittait la rigole, elle ne subissait aucune accélération parallèle au courant d'un ordre tel que sa composante  $u^*$  pût être sensiblement différente de  $U_m$ .



L'équation (6) a exactement la même forme que (4). Toutefois, ces deux équations sont essentiellement différentes ; la première est relative à des mouvements à débit constant, la seconde à un cas particulier des mouvements à débit variable<sup>1</sup>.

Pour chacun des quatre éléments de ce secteur, nous avons déterminé le débit du prélèvement latéral en tenant compte de la courbe d'étalonnage des déversoirs donnée à la figure 6.

Le calcul se faisait pour un élément  $\Delta x$  de la façon suivante. On choisissait arbitrairement la valeur  $\Delta z$ , ce qui permettait de déterminer la hauteur moyenne de la nappe déversante relative à cet élément. La courbe d'étalonnage de la figure 6 donnait ensuite le débit prélevé correspondant. On déduisait alors toutes les grandeurs figurant au membre de droite de l'équation (6) dont l'application donnait une valeur de première approximation pour  $\Delta z$ . On recommençait le calcul en partant de cette valeur, ce qui donnait une seconde approximation pour  $\Delta z$ . On continuait ainsi jusqu'à ce que la différence de deux valeurs consécutives  $\Delta z$  soit de l'ordre de quelques centièmes de mm.

Comme pour la série *a*, nous avons fait deux calculs : le premier en utilisant l'équation (6) complète dans le secteur où le débit variait, le second en supposant, dans ce secteur, le terme dû à la rugosité des parois égal à zéro (équation (6) réduite). Quelques-unes des courbes de remous ainsi calculées, celles relatives aux essais b2, b3, b5 à b8, sont indiquées à la figure 9. Les valeurs calculées  $\Sigma \Delta z = Z_{+400} - Z_{-100}$ , relatives à tous les essais de cette série, sont indiquées aux colonnes 8 et 10 du tableau II. Les colonnes 9 et 11 donnent les différences entre les valeurs  $\Sigma \Delta z$  mesurées et calculées dans les deux hypothèses.

La figure 9 montre que les courbes calculées au moyen de l'équation (6) complète (trait mixte) correspondent avec une bonne approximation aux résultats des expériences, principalement pour les essais b3, b5 et b6. La courbe de remous donnée par l'expérience b2 (trait continu) s'écarte, au voisinage du profil  $\pm 0$ , notablement de celle du calcul (trait mixte). Cela est dû à la perturbation apportée par le profil en demi-cercle de la paroi limitant à l'amont les déversoirs. L'essai b3, fait dans les mêmes conditions que b2, mais après modification du profil mentionnée (voir la vue en plan partielle de la fig. 3) montre que la forme défectueuse du profil était la cause de cette divergence, toute locale d'ailleurs, entre le calcul et l'expérience. Les légères divergences systématiques entre les courbes à trait continu et celles à trait mixte des essais b7 et b8 peuvent s'expliquer par la trop forte variation du débit par unité de longueur.

La figure 9 montre que les courbes calculées en utilisant, le long des déversoirs, l'équation (6) privée du terme dû à la rugosité des parois (trait interrompu) correspondent moins bien aux expériences que les précédentes.

La comparaison des colonnes (9) et (11) montre également que la différence des valeurs  $\Sigma \Delta z$  calculées et mesurées est en général plus faible et moins systématique lorsque le calcul a été fait à l'aide de l'équation (6) complète que lorsqu'on a utilisé cette équation réduite. Dans le cas de l'équation (6) complète (colonne 9) la différence entre la théorie et l'expérience est de l'ordre du millimètre,

comme pour les essais de la série *a*. Cette différence est donc très faible<sup>1</sup>.

Une autre comparaison intéressante est celle des débits  $Q_d$  mesurés et calculés. Les valeurs de  $Q_d$  obtenues lors du calcul fait à l'aide de l'équation (6) complète sont indiquées à la colonne 12 du tableau II. Celles relatives à l'utilisation de l'équation (6) réduite le sont à la colonne 14. Les différences avec l'expérience de ces deux groupes de valeurs sont données aux colonnes 13 et 15. On voit qu'elles sont petites, de l'ordre de quelques pour cent de la valeur de  $Q_d$  correspondante. Elles sont plus faibles pour le calcul fait avec l'équation complète.

Nous pouvons donc conclure que les expériences dans lesquelles le débit de l'eau était décroissant par suite de prélèvements latéraux symétriques, confirment la validité, y compris le terme dû à la rugosité des parois, de l'équation (6), qui n'est autre que (3) spécifiée pour  $u^* = U_m$ .

Ces expériences montrent en outre, qu'un déversoir, où l'eau arrive avec une vitesse faisant, en plan, un angle sensible avec la normale à la paroi le délimitant, se comporte, au point de vue du débit, comme un déversoir ordinaire où cet angle est nul. Nous ne pouvons évidemment considérer ce résultat comme établi que dans les cas où la hauteur déversante peut être considérée comme très petite par rapport à la longueur de la crête et à la profondeur de l'eau dans le canal.

c) *Expériences de la série c* (débit décroissant, avec prélèvement latéral par une seule échancrure).

Nous avons fait l'application de la théorie à cette série d'expériences exactement dans les mêmes conditions que celles de la série *b*, en utilisant les équations (4) et (6). Les résultats du calcul, fait en utilisant l'équation (6) complète dans le secteur à débit variable, sont indiqués en trait mixte à la figure 14 et aux colonnes 8 et 12 du tableau III. Ceux du calcul utilisant l'équation (6) réduite le long des échancrures sont donnés en trait interrompu à la figure 14 et aux colonnes 10 et 14 du même tableau. Les colonnes 9, 11, 13 et 15 montrent les différences entre les calculs et l'expérience.

On voit immédiatement que les conclusions que l'on peut tirer de cette série d'expériences sont les mêmes que celles de la série *b* : validité, y compris le terme dû à la rugosité des parois, de l'équation (6), qui n'est autre que (3) spécifiée pour  $u^* = U_m$  et vérification de la règle d'après laquelle un déversoir, où l'eau arrive avec une vitesse faisant en plan un angle sensible avec la normale à la paroi le délimitant, se comporte, au point de vue du débit, comme un déversoir ordinaire où cet angle est nul, pourvu que la hauteur déversante soit très petite par rapport à la longueur de la crête et à la profondeur de l'eau dans le canal.

## § 6. Conclusions générales.

Les expériences que nous avons décrites et leur comparaison aux résultats de la théorie montrent que l'équation générale (3) complète, du mouvement graduellement varié dans les canaux découverts, avec débit variable le

<sup>1</sup> La surface et le périmètre mouillé introduits dans les calculs ont été ceux d'un rectangle dont le côté inférieur coïncidait avec le fond de la rigole, les côtés latéraux, avec la partie verticale des parois, et le côté supérieur, avec la partie horizontale de la surface de l'eau.

<sup>1</sup> Il serait ici illusoire, pour obtenir l'erreur relative du calcul, de diviser par  $\Sigma \Delta z$  les différences  $\Sigma \Delta z$  mesuré —  $\Sigma \Delta z$  calculé, car cette dernière grandeur est petite, d'après la nature même de la courbe de remous, qui descend entre les profils — 100 et 0, remonte entre 0 et + 200, et redescend de + 200 à + 400.

long du courant, est valable avec une très bonne approximation. Ces expériences concernent, il est vrai, deux cas extrêmes de cette équation : celui d'un débit croissant, produit par un apport latéral dont la composante  $u^*$  parallèle au courant principal est égale à zéro, et celui d'un débit décroissant, produit par un prélèvement latéral dont la vitesse a une composante  $u^*$  sensiblement égale à la vitesse moyenne  $U$  de l'eau dans le canal. Mais si nous tenons compte des résultats de nos expériences pour un avant-projet des évacuateurs de crues du Boulder-Dam, dont une partie a été publiée, expériences où le courant était à débit croissant, avec apport latéral d'un seul côté et composante  $u^*$  comprise entre zéro et  $U$ <sup>1</sup>, tout nous porte à croire que l'équation (3) est bien la loi qui régit, dans toute leur généralité, les mouvements graduellement variés de l'eau dans les canaux découverts à débit variable.

En outre, nos expériences confirment la loi suivante : un déversoir, où l'eau arrive avec une vitesse faisant, en plan, un angle sensible avec la normale à la paroi le délimitant, se comporte, au point de vue du débit, comme un déversoir ordinaire où cet angle est nul. Cette loi n'est applicable que lorsque la hauteur de la nappe déversante est très petite par rapport à la longueur du déversoir et à la profondeur de l'eau dans le canal.

Ces conclusions donnent à l'ingénieur un moyen utile pour la résolution de toute une classe de problèmes.

*Remarques :* I. Dans un intéressant article, M. le professeur de Marchi a développé une théorie du mouvement de l'eau dans les canaux à débit variable, mais valable seulement dans le cas d'un prélèvement latéral<sup>2</sup>. Cette théorie est fondée sur une hypothèse purement arbitraire. Elle revient à admettre que, dans le secteur où le débit varie, la pente de la ligne d'énergie est parallèle à celle du fond du canal. Il est facile de voir que la théorie de M. de Marchi revient à notre équation particulière (6), mais dans laquelle le terme dû à la rugosité des parois aurait une valeur qui dépend de la pente du fond du canal. Par exemple, dans le cas où cette pente est nulle, ce terme devrait être nul également. Or nos expériences, faites avec un canal de pente nulle, montrent précisément que le terme dû à la rugosité des parois est loin d'avoir une valeur nulle.

II. M. Velatta a donné récemment une formule, purement empirique, pour le calcul des mouvements à débit décroissant, basée sur une série d'expériences faites au laboratoire de Padoue<sup>3</sup>. Cette formule, si intéressante soit-elle, ne rend à notre avis qu'imparfaitement compte du phénomène. En effet, les points représentant les expériences de M. Velatta couvrent une surface très large de son diagramme principal (Fig. c). Ces points s'écartent en général sensiblement de la droite représentant les valeurs calculées d'après sa seconde équation fondamentale, qui ne peut donc représenter le phénomène que très grossièrement.

Si M. Velatta, comme il le dit à la page 10 de son mémoire, n'a pas trouvé, en comparant notre théorie à ses expériences, une concordance satisfaisante, cela nous

semble dû au fait qu'il s'est contenté de repérer la surface de l'eau en un nombre de points beaucoup trop faible. Les valeurs isolées qu'il indique pour ses niveaux sont alors influencées par les irrégularités locales dont nous avons parlé, ce qui explique les énormes perturbations de ses résultats. Pour se rendre compte du caractère exact du phénomène, il nous paraît indispensable de dessiner les profils en long de la surface, ce qui nécessite un très grand nombre de pointés<sup>1</sup>.

III. Pour ne pas augmenter la longueur de ce mémoire, nous avons dû renoncer à publier les nombreuses mesures des vitesses au tube de Pitot que nous avons faites au cours des expériences. Pour la même raison, il nous a fallu renoncer à faire une description systématique des profils en travers de la surface de l'eau, qui ont d'ailleurs accusé des perturbations locales moins fortes que les profils en long.

Zurich, le 17 novembre 1936.

**Erratum :** Bulletin technique du 10 avril 1937, page 96, équations (3) et 3 bis), remplacer  $S_m$  par  $S_m^2$ .

## Terrassement des lacs d'accumulation

par G. MATHYS, ingénieur, à Bâle.

D'une note récente, parue ici-même<sup>2</sup>, il résulte que, pour assurer d'une façon certaine la continuité de la fourniture d'énergie électrique suisse en hiver, nous devons équiper de nouvelles usines à accumulation, sans trop tarder. Nous allons examiner tout d'abord à quel prix maximum il eût fallu réaliser les terrassements de quelques-unes de nos retenues pour concurrencer la construction de barrages. Nous établirons ensuite le prix auquel reviendrait le terrassement d'une retenue bien définie exécuté à l'aide de différents engins modernes et pour finir nous étudierons la possibilité d'effectuer de tels terrassements à l'eau sous pression.

Pour une retenue, formée en partie par l'élévation d'un mur barrage et en partie par excavation, la limite du prix unitaire du terrassement peut être établie comme suit si on néglige le fait que l'eau accumulée par excavation agira sur les turbines d'une hauteur un peu moindre que celle accumulée en surélevant le barrage.

Soit :

- $O$ , le volume utile de la retenue sans terrassement, exprimé en  $m^3$  ;
- $V$ , le volume du terrassement à établir, en  $m^3$  ;
- $e$ , le prix unitaire de ce terrassement, en Fr. par  $m^3$  ;
- $k$ , le nombre de kWh produits en moyenne par  $1 m^3$  d'eau accumulée ;
- $D$ , le capital de premier établissement de l'installation totale, sans le terrassement ;
- $C$ , les dépenses annuelles par Fr. de capital de premier établissement ;

<sup>1</sup> Ajoutons que le canal étudié était à forte pente et à profil variable.

<sup>2</sup> GIULIO DE MARCHI : *Saggio di teoria del funzionamento degli Stramazzi laterali*. Energia Elettrica, novembre 1934.

<sup>3</sup> MASSIMO VELATTA : *Contributo sperimentale allo studio degli sfioratori laterali*. Energia Elettrica, Luglio 1934.

<sup>1</sup> Ajoutons, pour compléter, qu'une étude expérimentale sur les mouvements de l'eau à débit décroissant a été faite récemment à Vienne par M. Ehrenberger qui l'a publiée dans la revue « Die Wasserwirtschaft », Nos 11-15, 1934.

<sup>2</sup> Bulletin technique du 8 mai 1937, page 124.