Les évacuateurs de crues en déversoirs circulaires

Autor(en): **Gardel, André**

Objekttyp: **Article**

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

Band (Jahr): **75 (1949)**

Heft 27

PDF erstellt am: **16.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-56892

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

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

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

75e année 31 décembre 1949 N° 27

BULLETIN TECHNIQUE
DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les 15 jours

ABONNEMENTS :
Suisse : 1 an, 20 francs
Etranger : 25 francs
Pour sociétaires :
Suisse : 1 an, 17 francs
Etranger : 22 francs
Pour les abonnements s'adresser à la librairie **F. ROUGE & Cie** à Lausanne
Prix du numéro : 1 fr. 25

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 polytechnique de l'Université de Lausanne et des Groupes romands des anciens élèves de l'Ecole polytechnique fédérale.

COMITÉ DE PATRONAGE. — Président : R. NEESER, ingénieur, à Genève ; Vice-président : G. EPITAUX, architecte, à Lausanne ; secrétaire : J. CALAME, ingénieur, à Genève. — Membres : *Fribourg :* MM. † L. HERTLING, architecte ; P. JOYE, professeur ; *Vaud :* MM. F. CHENAUX, ingénieur ; E. D'OKOLSKI, architecte ; A. PARIS, ingénieur ; CH. THÉVENAZ, architecte : *Genève :* MM. L. ARCHINARD, ingénieur ; E. MARTIN, architecte ; E. ODIER, architecte, *Neuchâtel :* MM. J. BÉGUIN, architecte ; G. FURTER, ingénieur ; R. GUYE, ingénieur ; *Valais :* MM. J. DUBUIS, ingénieur ; D. BURGENER, architecte.

Rédaction : D. BONNARD, ingénieur. Case postale Chauderon 475, LAUSANNE

TARIF DES ANNONCES
Le millimètre (larg. 47 mm) 20 cts
Réclames : 60 cts le mm (largeur 95 mm)
Rabais pour annonces répétées
ANNONCES SUISSES S.A.
5, Rue Centrale
Tél. 2 33 26
LAUSANNE
et Succursales

CONSEIL D'ADMINISTRATION DE LA SOCIÉTÉ ANONYME DU BULLETIN TECHNIQUE
A. STUCKY, ingénieur, président ; M. BRIDEL ; G. EPITAUX, architecte : R. NEESER, ingénieur.

SOMMAIRE : Communications du Laboratoire d'hydraulique de l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne : *Les évacuateurs de crues en déversoirs circulaires*, par ANDRÉ GARDEL, ingénieur E. P. U. L., lic. ès sc. — BIBLIOGRAPHIE. — SERVICE DE PLACEMENT.

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

Directeur : M. le professeur A. STUCKY. — Directeur-adjoint : M. le professeur D. BONNARD

LES ÉVACUATEURS DE CRUES EN DÉVERSOIRS CIRCULAIRES

par ANDRÉ GARDEL, ingénieur E. P. U. L., lic. ès sc.

Avant-propos

Le Laboratoire d'hydraulique de l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne *a exécuté, en collaboration avec le bureau du professeur* A. Stucky, *auteur des projets, l'étude expérimentale de trois évacuateurs de crues en déversoir circulaire: L'évacuateur du barrage du Hamiz en Algérie en 1933 (fig. 1 et 2) et, plus récemment, celui du barrage de Pracana au Portugal (fig. 3) ainsi que le déversoir circulaire de la dérivation provisoire du barrage de Ben Métir en Tunisie. Pour les deux premiers ouvrages, la maison* Escher Wyss, *à Zurich, participa aux études en qualité de constructeur des vannes.*

Par la suite, le Laboratoire a entrepris l'étude générale et systématique de ce type d'ouvrage et l'examen des résultats obtenus fait l'objet de la présente publication.

D. BRD.

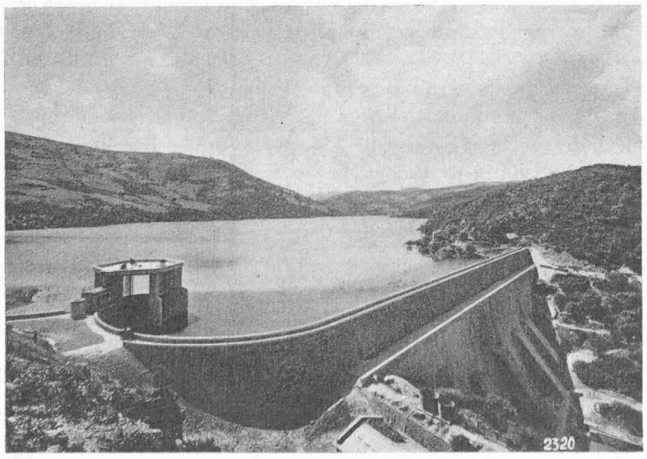


Fig. 1. — Evacuateur de crues et barrage du Hamiz (Algérie).

Introduction

L'évacuation des crues est souvent le problème hydraulique le plus important posé par la construction d'un grand barrage. Il faut, en effet, assurer le passage de débits exceptionnellement élevés, plus élevés même que ce que les prévisions les plus pessimistes permettraient de craindre. En outre, ces masses d'eau doivent subir une chute égale à la hauteur du barrage, c'est-à-dire fréquemment supérieure à cent mètres.

La difficulté est donc double : tout d'abord créer le passage de l'eau, puis détruire l'énergie cinétique ainsi libérée. On sait que la destruction d'énergie s'opère généralement soit par un ressaut, soit, si les conditions géologiques le permettent, par chute du jet en pleine eau. Le problème du passage de l'eau se concentre sur l'ouvrage d'entrée et le vannage ; la suite, tunnel ou canal à ciel ouvert, présente en règle générale moins de difficulté.

Les très nombreux ouvrages d'évacuation réalisés peuvent se classer en deux types principaux selon qu'ils sont munis d'un déversoir de surface ou d'une prise d'eau à grande profondeur. Et parmi les évacuateurs de surface, nous distinguons deux variantes : déversoir rectiligne, généralement le long du couronnement du barrage, déversoir circulaire (suivi d'un puits et d'une galerie horizontale) placé aux abords du barrage. C'est de ce second type que nous allons exclusivement nous préoccuper dans cette étude [1].

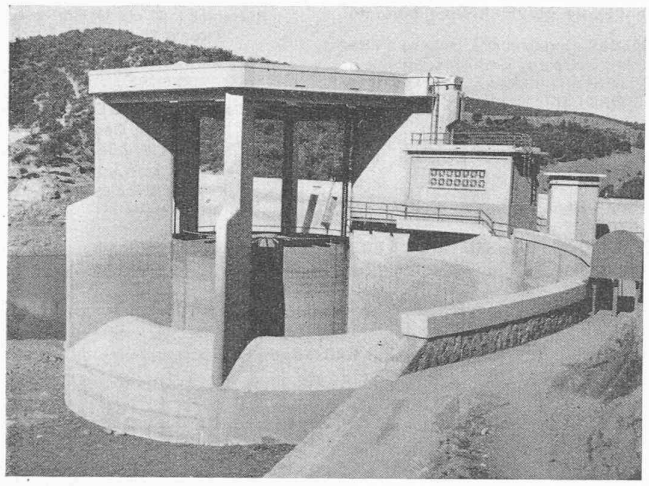


Fig. 2. — Evacuateur de crues en déversoir circulaire du barrage du Hamiz (Débit maximum : 650 m³/sec).

Les évacuateurs de crues en déversoir circulaire (fig. 1 à 3) présentent principalement les avantages suivants :

a) simplicité de l'ouvrage de génie civil dont les formes sont de révolution et de dimensions réduites ;
b) situation hors du barrage : on évite ainsi la diminution de section du couronnement du barrage, ce qui est particulièrement intéressant dans le cas d'un barrage-voûte. En outre, le parement aval et la fondation ne sont plus soumis aux effets de courants déversants importants ;
c) grande simplification du vannage relativement au déversoir rectiligne, tant par la substitution d'une seule vanne à un ensemble de plusieurs que par la légèreté de cette vanne unique travaillant, du point de vue statique, comme un tube ;

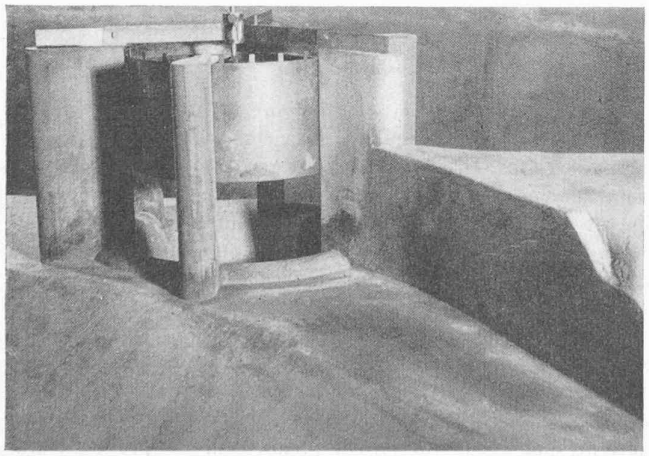


Fig. 3. — Modèle de l'évacuateur de crues du barrage de Pracana (Portugal) (Echelle du modèle : 1 : 39 ; débit maximum en vraie grandeur : 1650 m³/sec).

Quoique l'on ait eu recours assez souvent à ce type d'ouvrage, il subsistait des divergences de vues importantes sur les formes les plus souhaitables pour l'écoulement et sur les méthodes de calcul du débit qui peut être évacué. C'est la raison pour laquelle le *Laboratoire d'hydraulique de l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne* a entrepris des essais systématiques dans le but de mettre en lumière l'influence des différents éléments constitutifs d'un tel ouvrage : diamètre et profil du déversoir, puits, coude, étranglement, aération. Ces essais ont permis d'esquisser une méthode de calcul par laquelle on peut connaître avec une précision suffisante les conditions de fonctionnement. Le but de cette étude est d'exposer les résultats expérimentaux obtenus et la méthode de calcul que nous en avons tirée. Nous essaierons ensuite de dégager quelques principes de construction qui puissent guider l'auteur d'un projet dans le choix des formes [2].

Installation d'essai

L'installation d'essai, représentée schématiquement à la figure 4, était constituée par un modèle d'évacuateur de crues en déversoir circulaire placé dans un bassin. L'alimentation de ce bassin, effectuée sous charge constante, était faite par une adduction avec diaphragme permettant le jaugeage du débit. Un limnimètre servant au repérage de la position du plan d'eau amont complétait l'installation.

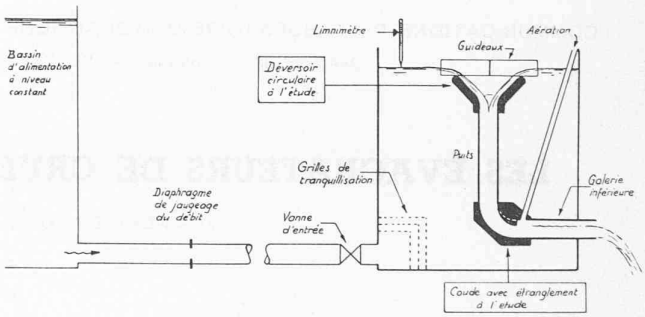


Fig. 4. — Schéma de l'installation utilisée pour les essais.

Différents montages étaient possibles à l'intérieur du bassin à l'aide d'un jeu de déversoirs circulaires de profils et diamètres différents, de coudes de rayons et étranglements variés, la hauteur de chute pouvant elle-même être choisie à volonté dans certaines limites. Les dimensions des modèles seront précisées par la suite ; disons simplement, pour fixer les idées, que le diamètre du puits vertical a été dans tous les cas de 10 cm, la hauteur variant entre 30 cm et 1,20 m.

Tous les modèles étudiés étaient munis de guideaux sur le déversoir et d'une aération inférieure ; nous reviendrons plus loin sur la nécessité de ces précautions. Les guideaux étaient suffisamment minces et lisses (fig. 18) pour que l'on puisse admettre qu'ils ne diminuaient en rien les capacités d'évacuation des modèles.

[1] Ce genre d'ouvrage ne doit pas être confondu avec les puits à écoulement hélicoïdal tels qu'on en a construit récemment en Italie et en France : le but est différent. Dans ces puits il s'agit de perdre le maximum de charge alors que dans l'évacuateur de crues on cherche à réduire ces pertes au minimum, de manière à diminuer les sections. De plus, dans les puits à écoulement hélicoïdal, l'eau est fournie par une galerie où elle circule à grande vitesse, tandis que dans les ouvrages dont nous nous occupons ici l'eau provient d'un plan d'eau immobile.

[2] Les recherches mentionnées ici ont duré près d'une année et ont été faites avec la collaboration de tout le personnel du Laboratoire d'hydraulique et en particulier de MM. H. Mayor et R. Cottier, ingénieurs.

Cette installation a donné entière satisfaction. Tout au plus peut-on regretter qu'il n'ait pas été possible de construire des modèles plus grands : la similitude avec les phénomènes de vraie grandeur y eût probablement gagné en précision. Malheureusement, le grand nombre d'évacuateurs étudiés (plus de cinquante) et le fait que le coût d'un modèle croît avec le cube de l'échelle ont rendu prohibitif le choix de dimensions plus élevées. Remarquons toutefois qu'une échelle petite conduit généralement à conclure à des capacités d'évacuation moindres et constitue donc une sécurité.

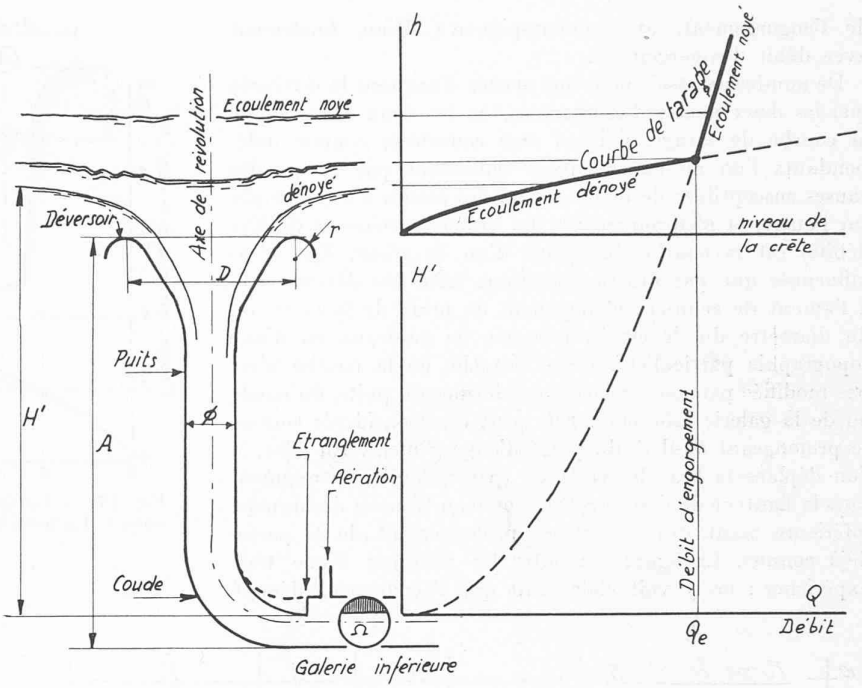


Fig. 5. — Schéma de fonctionnement et définition de la courbe de tarage.

Etude qualitative du fonctionnement

Avant d'entrer dans le détail de l'étude quantitative, il convient de donner un aperçu qualitatif du fonctionnement et de mettre en évidence quelques faits importants.

La première constatation qui s'impose dans l'étude de l'évacuateur de crues en déversoir circulaire est l'existence de deux modes d'écoulement entièrement différents et correspondant l'un aux faibles débits, l'autre aux débits élevés.

Dans le premier cas, l'eau tombe librement le long des parois du puits, laissant au centre un espace vide. Une légère surélévation du plan d'eau amont permet le franchissement du déversoir. Dans la galerie inférieure, l'écoulement est en nappe libre et ne présente pas de particularité. Le coude est naturellement le siège de remous violents, les filets d'eau s'y heurtant pour repartir horizontalement.

Pour les gros débits, le déversoir est complètement noyé ; il y a un plan d'eau continu au-dessus de l'ouvrage. Le puits est entièrement sous charge et débite à gueule bée dans la galerie ou à écoulement libre (ou en charge). Il faut une forte surélévation du plan d'eau amont pour créer une augmentation, même faible, du débit. Nous dirons alors que l'évacuateur est *noyé*. Il peut, dans ce cas, se produire un virolet (vortex) et nous reviendrons plus loin sur cette éventualité.

Pour avoir une représentation précise du phénomène, le mieux est de considérer le débit comme fonction de la charge amont, mesurée par rapport à la crête du déversoir. Reportée en un graphique, cette fonction nous donne la courbe caractéristique de tarage de l'évacuateur. La figure 5 montre, à droite en haut, l'allure générale d'une telle courbe. Elle est double. La branche inférieure, peu inclinée, correspond au premier mode d'écoulement envisagé ci-dessus, c'est-à-dire *dénoyé*. Cette branche est peu différente de la courbe caractéristique classique d'un déversoir rectiligne. La branche supérieure, très inclinée, définit les écoulements noyés ; elle se confond avec la partie supérieure de la courbe que donnerait un orifice placé au bas de l'ouvrage.

L'intersection des deux branches nous permet de définir le *point d'engorgement*. A ce point correspond un *débit d'engorgement* qui est la limite pratique des possibilités d'évacuation de l'ouvrage ; en effet, au-delà de ce point, l'écoulement est noyé et l'augmentation de la charge amont due à la surélévation du plan d'eau ne se traduit que par un accroissement de débit insignifiant.

Le passage d'un mode d'écoulement à l'autre se fait d'une manière progressive par des formes un peu moins stables, sans toutefois qu'il apparaisse de phénomènes brutaux ou irréversibles. Un « champignon » d'eau bouillonnante se forme dans le puits et monte jusqu'à la surface. A ce moment, le déversoir se noie, avec formation d'une nappe ondulée analogue à celle d'un déversoir rectiligne. Les figures 6 à 8 sont des photographies d'un tel ouvrage avec tout d'abord un écoulement nettement dénoyé, puis, dénoyé au voisinage

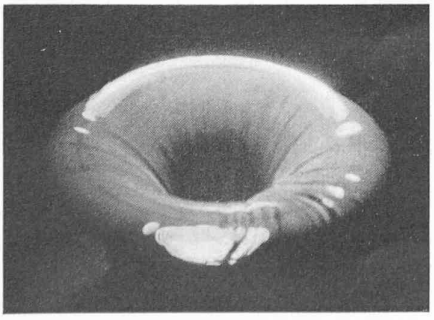


Fig. 6. — Ecoulement dénoyé.

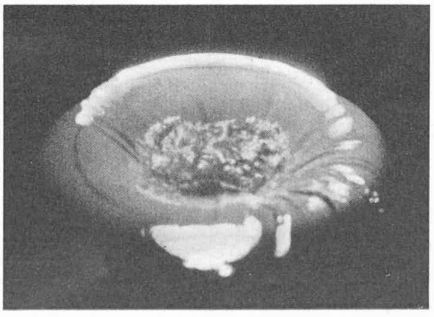


Fig. 7. — Ecoulement dénoyé; débit légèrement inférieur au débit d'engorgement.

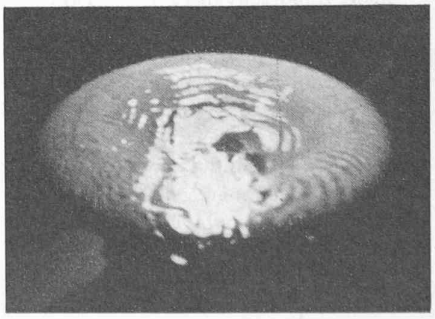


Fig. 8. — Ecoulement noyé ; débit légèrement supérieur au débit d'engorgement.

de l'engorgement, avec « champignon » d'eau, finalement avec débit d'engorgement.

De nombreux essais nous ont permis d'acquérir la certitude que les deux modes d'écoulement, ou les deux branches de la courbe de tarage, doivent être considérés comme indépendants l'un de l'autre. Nous entendons par là que les causes susceptibles de modifier l'un des modes n'agissent pas sur l'autre, et réciproquement. La branche inférieure (faibles débits) est la courbe de tarage d'un déversoir. Elle n'est influencée que par des modifications faites au déversoir ou à l'amont de celui-ci : changement de profil de la crête, ou du diamètre du déversoir, présence de guideaux ou d'une topographie particulière. Cette branche de la courbe n'est pas modifiée par une variation des formes du puits, du coude ou de la galerie inférieure. Elle peut être considérée comme se prolongeant au-delà du point d'engorgement. En effet, si l'on déplace la branche verticale (par exemple, en augmentant la hauteur de l'ouvrage), le nouveau tronçon de branche inférieure vient exactement en prolongement de la partie déjà connue. La figure 9 montre les résultats d'une telle expérience ; on y voit clairement que l'écoulement dénoyé

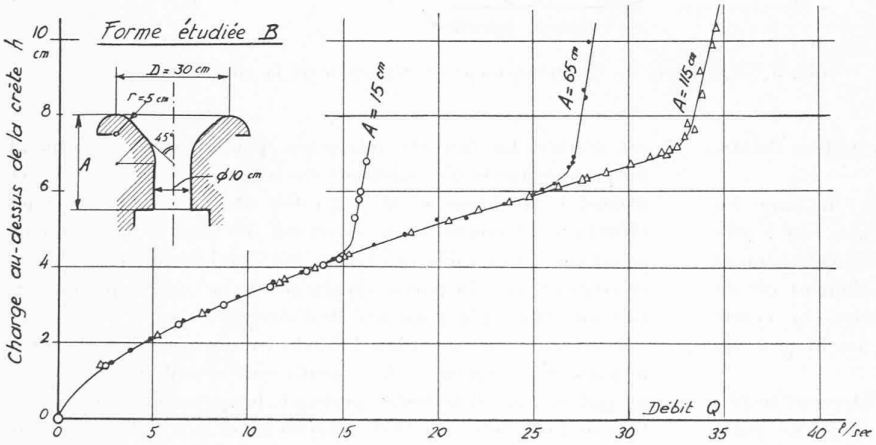


Fig. 9. — Indépendance de l'écoulement dénoyé quant aux conditions aval. L'augmentation du débit d'engorgement par modification des formes aval (ici accroissement de la hauteur) ne modifie pas la branche inférieure de la courbe.

n'est aucunement modifié par la proximité du point d'engorgement.

D'autre part, la branche supérieure — écoulement noyé — est déterminée par les conditions d'écoulement sous charge : perte d'énergie dans le coude, section au débouché (aval coude ou aval galerie), rugosité des parois, etc. Une modification de la crête du déversoir ne change rien à ce mode d'écoulement, ainsi que le montre le graphique de la figure 10 ; le débit d'engorgement n'a pas varié à la suite d'un changement important des formes d'entrée (tout au plus la forme A donne-t-elle en écoulement noyé des débits très légèrement plus élevés pour une même charge, les pertes de charge y étant moins fortes par le fait de la plus grande section).

Nous insistons sur cette indépendance, qui ne paraît pas évidente à première vue ; ainsi on pourrait être tenté, pour accroître le débit d'engorgement d'un tel évacuateur, d'augmenter le diamètre du déversoir ; ce qui serait inutile.

Cette indépendance des deux modes d'écoulement nous permet de les étudier séparément. Nous débuterons par le cas de l'écoulement noyé, plus important du point de vue de la capacité d'évacuation de l'ouvrage, la position de la branche supérieure étant déterminante pour la valeur du débit d'engorgement.

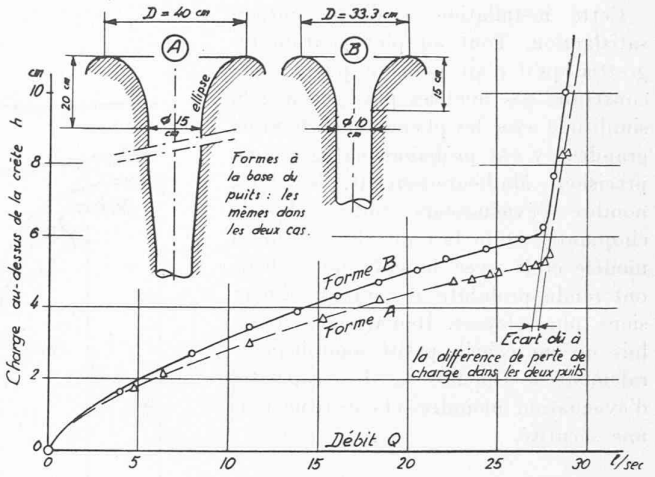


Fig. 10. — Indépendance de l'écoulement noyé quant aux formes amont. La modification des formes du déversoir ne change pas le débit d'engorgement.

Ecoulement noyé

Deux séries de formes ont été étudiées ; elles se différencient par la position de l'aération et sont précisées à la figure 11. Nous nous occuperons d'abord de la série caractérisée par une aération placée à l'aval du coude, celui-ci formant étranglement progressif de la veine liquide. Le résultat en est une lame d'eau stabilisée dans la galerie inférieure grâce à la contraction. De plus, la section allant en augmentant vers l'amont, la pression moyenne croît et permet de combattre les dépressions dues à la courbure.

Le débit en régime noyé est le produit de la section Ω de l'étranglement par la vitesse de passage. Or, cette vitesse est déterminée par l'énergie disponible à la sortie du coude. L'expression du débit doit donc être de la forme suivante :

$$Q = \Omega \sqrt{2gH_0}$$

Le problème est de déterminer la valeur de H_0. Nous appellerons A la hauteur géométrique entre la crête du déversoir et le radier à la sortie du coude ; de même, nous désignerons

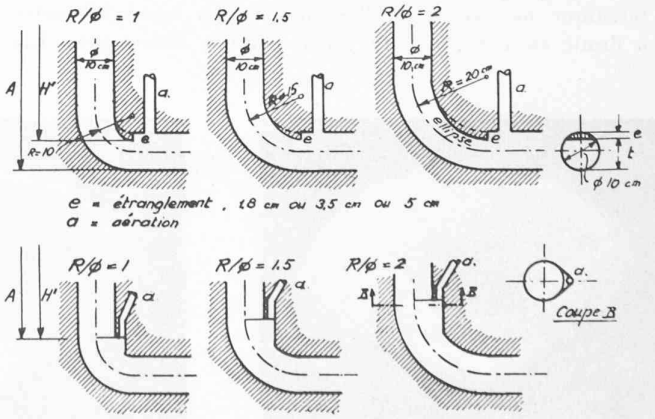


Fig. 11. — Formes des coudes étudiés : aération à la sortie ou à l'entrée du coude.

par H' la chute brute entre le plan de charge amont et le filet d'eau supérieur, à pression nulle, à la sortie de l'étranglement (voir fig. 5). C'est la hauteur d'aspiration. Nous pouvons poser :

$$H' = A - t + h$$

où t désigne la profondeur de la lame d'eau à la sortie du coude (profondeur égale à la hauteur libre de l'étranglement en ce point) ; h est la surélévation du plan d'eau amont nécessitée par le passage du débit Q sur le déversoir ; t est connu géométriquement s'il n'y a pas de décollement dans le coude ; h peut être évalué et dans les essais il a été mesuré directement.

Il y a lieu de tenir compte des pertes de charge par frottement le long du déversoir, du puits et du coude. Ces pertes d'énergie dépendent de la rugosité des parois ; elles sont plus importantes dans les essais sur modèle que dans la réalité et c'est pourquoi nous devons en tenir compte séparément. Nous les désignerons par h_r et admettrons qu'elles sont égales à $\int i_L \, dL$, intégrale étendue à la longueur du parcours déversoir-étranglement. La perte de charge par unité de longueur i peut être évaluée à l'aide de la formule de Strickler (par exemple) :

$$i = \frac{v^2}{K^2 \, R^{4/3}}$$

v = vitesse en m/sec.
R = rayon hydraulique en m.
= Ø/4 si section circulaire pleine.
K = coefficient de rugosité.
= 70 pour béton brut de décoffrage.

Si

$$H = A - t + h - h_r = H' - h_r$$

H ne différera de H_0 cherché que par des pertes d'énergie dues principalement à la courbure des filets sur la crête et dans le coude.

Nous avons cherché par nos essais à connaître séparément la valeur de la perte de charge par courbure due au passage sur la crête. A l'aide de la disposition de la figure 9, nous déterminons une position du plan d'eau amont et le débit correspondant. La section de sortie, à tangente verticale, sans contraction, permet le calcul de la vitesse, donc de l'énergie cinétique $V^2/2g$. La différence entre l'énergie potentielle $H = A + h$ et l'énergie cinétique est la perte de charge. Etant la différence de deux grands nombres, il est difficile de la connaître avec précision. Néanmoins, des essais nous ont conduits aux conclusions suivantes : après soustraction de la perte par frottement qui peut être évaluée, il subsiste une perte par courbure qui est faible, inférieure à 4 % de l'énergie cinétique dans le puits, généralement de l'ordre de 2 %.

L'effet principal de la courbure se fait sentir dans le coude. Pour déterminer la perte de charge par courbure dont il est le siège, nous avons procédé d'une manière analogue à celle utilisée pour la crête : mesure de l'énergie H disponible à la sortie du coude si celui-ci ne donnait lieu à aucune perte ; puis calcul de l'énergie cinétique à la sortie [1].

Ces pertes de charge par courbure, importantes dans le coude, dont la détermination fut l'un des objets principaux de nos essais, nous les introduisons dans la formule du débit par un coefficient de rendement :

$$\eta = \frac{Ho}{H} < 1.$$

Dans ces conditions :

$$Q = \Omega \sqrt{2gH\eta}.$$

Cette manière d'écrire revient à rapporter la perte de charge dans le coude à l'énergie cinétique à la sortie de celui-ci et non pas à son entrée. Cela se justifie si pour des étranglements différents la perte de charge est proportionnelle au carré, non de la vitesse d'entrée, mais bien plutôt de la vitesse de sortie. Disons d'emblée que ce fait est confirmé par les essais et s'explique car c'est dans la partie étranglée, où la vitesse est la plus grande, que se concentre la perte de charge. Cette perte de charge, rapportée à l'énergie cinétique à la sortie, vaut :

$$\frac{H - Ho}{Ho} = \frac{1}{\eta} - 1.$$

Les essais ont été effectués sur une série de vingt-huit évacuateurs, tous munis du même déversoir (D = 33,3 cm), d'un puits vertical de Ø 10 cm et de l'un des trois coudes de la première série de la figure 11. La hauteur A a varié de 30 cm à 1,20 m, donnant ainsi à H/Ø des valeurs comprises entre 2 et 12. Pour A = 60 cm et 120 cm, nous avons de plus modifié l'étranglement, donnant à la hauteur libre 82, 65 et 50 % du diamètre.

Les résultats ont permis de tracer les graphiques a, b et c de la figure 13, correspondant chacun à l'un des coudes R/Ø = 1,0, 1,5 ou 2,0. Pour chaque résultat la dimension du cercle indique l'erreur à craindre sur la mesure. Nous en tirons les conclusions suivantes :

1° Pour R/Ø = 1,5 et 2,0, la valeur de η est indépendante de la hauteur.
2° Dans ces deux cas, η est en outre indépendant de la valeur de l'étranglement.

[1] Remarquons que ce procédé est en défaut s'il y a décollement à l'amont de la section étranglée, l'énergie cinétique correspondant à la section effective Ω' étant plus élevée que celle calculée avec Ω (voir figure 12).

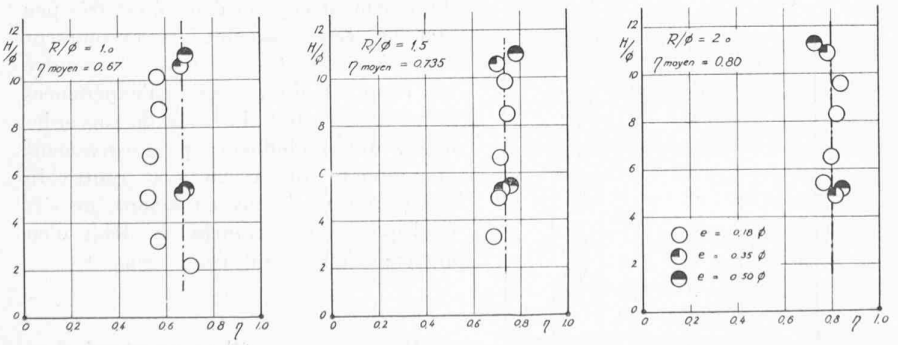


Fig. 13. — Valeurs du rendement en fonction de la hauteur H/Ø du puits, pour différents rayons R/Ø du coude, et pour divers étranglements. Cas de l'aération à la sortie du coude.

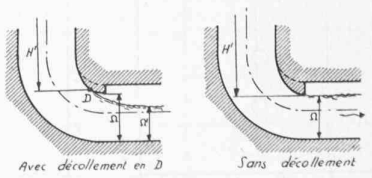


Fig. 12.

3° Pour $R/Ø = 1{,}0$, η prend une même valeur d'une part pour une chute faible $H/Ø = 2$ et faible étranglement, d'autre part pour un fort étranglement quelle que soit la hauteur de chute. Nous pensons que les points pour lesquels η a une valeur moins élevée correspondent à un écoulement avec décollement et doivent être éliminés (voir fig. 12).

4° Pour $R/Ø = 1{,}0$, 1,5 et 2,0, η prend respectivement les valeurs moyennes 0,67, 0,735 et 0,80 réparties linéairement et d'où l'on tire la loi suivante :

$$\eta = 0{,}54 + 0{,}13\ R/Ø$$

$$\text{ou}\quad \underline{\eta = 0{,}133\ (4 + R/Ø).}$$

La seconde série de formes donnée à la figure 11 nous a conduit à exécuter les essais de quatorze autres évacuateurs, ayant tous, comme les précédents, un même déversoir circulaire, un puits de Ø 10 cm et trois coudes différents de rayons $R/Ø = 1{,}0$, 1,5 et 2,0. Cette série se différencie de la précédente par la position de l'aération, située maintenant à l'entrée du coude. Il en résulte un écoulement libre et très troublé dans le coude. D'autre part, la hauteur de chute géométrique A doit être comptée dans ce cas entre la crête du déversoir et la section aérée, étant entendu que l'aération est suffisante pour que la pression y soit égale à la pression atmosphérique. Dans ces conditions, nous pouvons poser $t = 0$, d'où :

$$\underline{H = A + h - h_r.}$$

Les résultats des essais sont donnés par les trois graphiques de la figure 14. Comme dans le cas précédent, nous constatons l'indépendance totale de η à l'égard de la hauteur de chute. Le coefficient η prend les valeurs 0,50, 0,59 et 0,68 pour respectivement $R/Ø = 1{,}0$, 1,5 et 2,0. Cette répartition est à nouveau linéaire et obéit à la loi :

$$\eta = 0{,}32 + 0{,}18 R/Ø$$

$$\text{ou}\quad \underline{\eta = 0{,}168\,(2 + R/Ø).}$$

Nous résumerons les résultats qui précèdent dans le tableau suivant :

Débit : $Q = \Omega \sqrt{2gH\eta}$
Hauteur nette d'aspiration : $H = A + h - t - h_r$
1re forme $t \neq 0$ rendement : $\eta = 0{,}133\ (4 + R/Ø)$
2e forme $t = 0$ rendement : $\eta = 0{,}168\ (2 + R/Ø)$

Ω = section de l'écoulement là où la pression est nulle.
1re, 2e forme (aération inférieure, supérieure), voir figure 11.

Ces formules ont été contrôlées expérimentalement dans les limites suivantes :

$$3 < H/Ø < 12$$
$$1 < R/Ø < 2$$
$$0{,}18 < e/Ø < 0{,}5 \quad (e, \text{ voir fig. 11}).$$

Ecoulement dénoyé

Ainsi que nous l'avons dit dans l'étude qualitative, la branche dénoyée est caractéristique de l'écoulement par-dessus le déversoir[1]. La comparaison avec un déversoir rectiligne s'impose donc. Nous considérerons le déversoir rectiligne de même profil en travers et de largeur égale au développement en crête du déversoir circulaire envisagé. L'égalité des longueurs de crête se justifie par le fait que pour un écoulement en largeur constante et sans pertes de charge c'est en crête que se trouve la section critique déterminant le débit. Sur le déversoir circulaire les tranches d'eau ont une largeur qui va en décroissant le long de l'écoulement ; le débit y sera donc différent et nous appellerons f le rapport des débits des deux déversoirs sous même charge. L'effet de la perte de charge est faible et la rugosité du modèle étant forte, compte tenu de l'échelle, nous admettrons qu'en n'en tenant pas compte nous introduisons une sécurité.

L'effet de la courbure en plan du déversoir sera d'autant plus élevé que le rapport de la charge au diamètre h/D sera plus grand. Si nous caractérisons le profil en travers par son rayon de courbure en crête r, nous pouvons prévoir que le rapport r/D interviendra également. Nous pouvons donc écrire :

$$Q_{\text{dév. circ.}} = f \cdot Q_{\text{dév. rect.}} = m\,\pi\,D \sqrt{2g}\, h^{3/2} \cdot f(h/D,\, r/D)$$

où m = coefficient de débit du déversoir rectiligne de même profil.

Le coefficient m n'est pas indépendant de la hauteur h. En particulier, s'il s'agit d'un déversoir à crête ronde (rayon r), différentes formules permettent de le calculer ; nous citerons la formule de Fawer :

$$m = 0{,}385 + 0{,}085\ h/r - 0{,}010\ (h/r)^2.$$

Les essais entrepris ont eu pour but de préciser la fonction $f(h/D,\, r/D)$. Nous nous sommes limités au déversoir à crête ronde dont le coefficient m peut être calculé, mais pensons que les résultats peuvent être étendus aux autres types de déversoirs.

Nous avons déjà relevé que la valeur du débit n'est pas modifiée par le voisinage du phénomène d'engorgement ; en d'autres termes, la zone de raccordement entre les deux types d'écoulement noyé et dénoyé est très peu étendue. Les essais ont été absolument clairs à ce sujet et la figure 9 montre les résultats d'une série d'expériences faites dans ce but. La zone de raccordement, due à l'influence progressivement plus grande du niveau aval (centre du déversoir) sur le niveau amont, ne s'étend que sur une tranche de débit d'en moyenne 5 % avant l'engorgement.

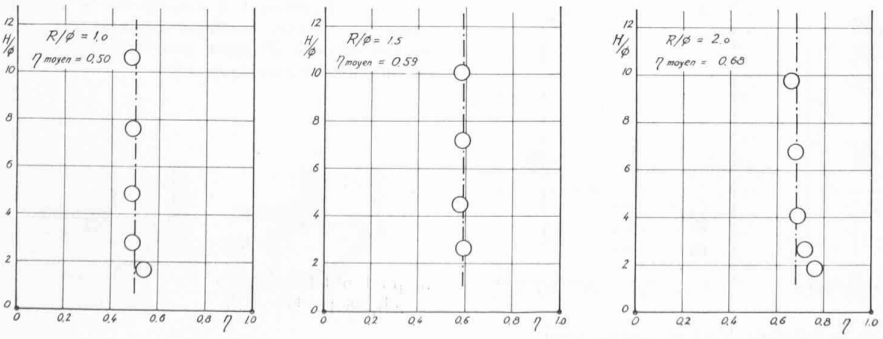


Fig. 14. — Valeurs du rendement en fonction de la hauteur $H/Ø$ du puits, pour différents rayons $R/Ø$ du coude. Cas de l'aération à l'entrée du coude.

[1] Dans les essais et calculs qui suivent, il ne s'agit que de déversoirs munis de guideaux infiniment minces et ne subissant aucune influence de la topographie environnante.

En second lieu, nous pouvons mettre en évidence, pour un déversoir donné, donc avec r/D constant, la variation de f en fonction de h/D. Nous avons étudié plusieurs déversoirs et plus spécialement ceux définis à la figure 15, caractérisés par un diamètre $D = 30$ cm et des rayons en crête de 2,5, 5,0 et 10 cm donnant à r/D les valeurs 0,083, 0,167 et 0,333. La fonction $f(h/D)$ correspondant au deuxième de ces déversoirs est représentée à la figure 16 (ce sont les mêmes résultats qui ont servi à l'établissement de la figure 9).

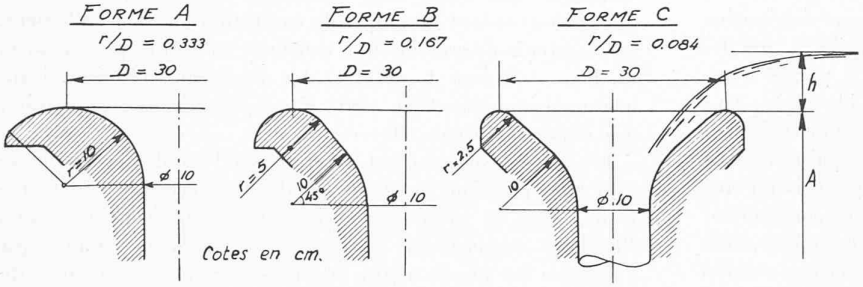


Fig. 15. — Formes des déversoirs étudiés.

Deux remarques préliminaires s'imposent. La première est que, du fait des pertes de charge et de la viscosité de l'eau, il faut s'attendre à trouver des débits trop faibles lorsque h est petit, c'est-à-dire des valeurs de f tendant vers zéro en même temps que h, et, on le voit nettement sur la figure 16, cet effet est fortement accentué au modèle. Théoriquement la fonction f doit passer par le point $h/D = 0$, $f = 1$, car si le déversoir est rectiligne, $D = \infty$ et $f = 1$, par définition. La seconde remarque concerne la dispersion des résultats ; celle-ci doit croître pour les petits débits, les erreurs absolues de mesure conduisant à des erreurs relatives de plus en plus élevées. Ce fait est également apparent sur le graphique.

Compte tenu de ce qui précède, nous pensons que la courbe expérimentale s'assimile aisément à une droite, en tous cas

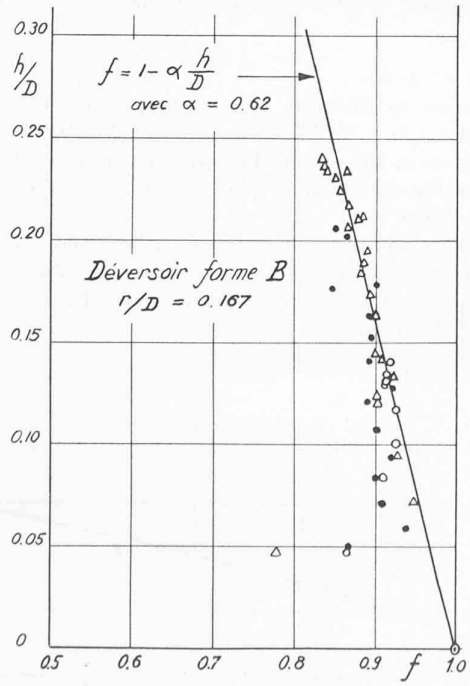


Fig. 16. — Diminution du débit en fonction de la hauteur h/D de la charge amont.

dans les limites pratiques d'emploi. Sachant que pour tous les déversoirs étudiés, l'allure de la fonction $f(h/D)$ est la même que celle représentée à la figure 16, nous admettrons pour f la valeur suivante :

$$f = 1 - \alpha \, . \, h/D$$

α est alors un coefficient caractérisant l'influence du profil en crête, et variant avec celui-ci. En examinant la manière dont α varie, on pourrait être tenté de croire que lorsque D devient très grand, r/D tendant vers zéro, α doit également tendre vers zéro, de manière que f soit égal à 1. Il n'en est rien car, dans ce cas, h/D tend lui-même vers zéro, ce qui suffit à donner à f la valeur 1.

Cependant on peut s'attendre à trouver pour α des valeurs croissantes avec r/D ; en effet, pour D et h donnés, plus r augmente plus l'effet de resserrement des filets d'eau se fait sentir.

Nous pouvons d'ailleurs représenter les résultats des essais des trois déversoirs à crête ronde sur un graphique en α, r/D (fig. 17). Seule, une série d'essais sur un très grand nombre de profils permettrait de connaître la valeur exacte de la fonction $\alpha(r/D)$. Nous pensons toutefois, sur la base des expériences faites, que α ne doit pas être très différent de :

$$\alpha \cong 0{,}3 + 2{,}5 \, r/D$$

et, pour les formes les plus fréquentes $\alpha \sim 0{,}5$ à $0{,}6$.

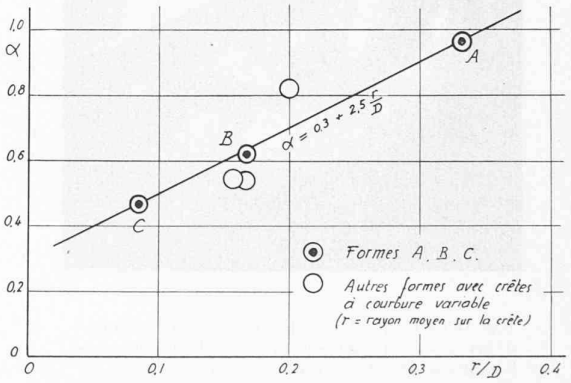


Fig. 17. — Effet du rayon de courbure r/D de la crête du déversoir sur le débit.

Nous résumerons également ces résultats en un tableau :

Débit : $Q = m\pi (D - \alpha h) \sqrt{2g} \, h^{3/2}$
Coefficient de débit : m = coefficient de débit d'un déversoir rectiligne de même profil.
Pour crête ronde, formule de Fawer :
$m = 0{,}385 + 0{,}085 \, h/r - 0{,}010 \, (h/r)^2$.
Influence de la crête : α.
Pour crête ronde : $\alpha \cong 0{,}3 + 2{,}5 \, r/D$.

Ces formules résultent d'essais effectués dans les limites suivantes :

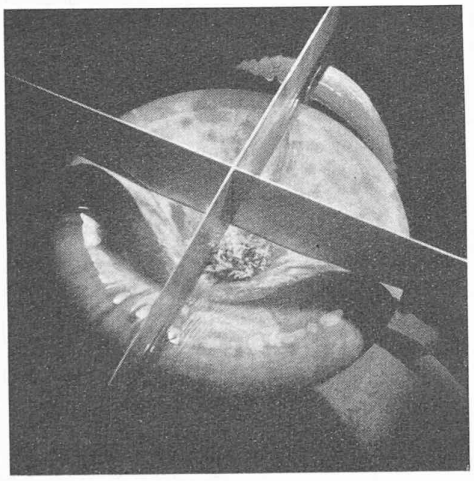
$$h/D < 0{,}25 \qquad r/D < 0{,}3$$

Ce tableau et celui qui précède doivent permettre le calcul d'un évacuateur de crues en déversoir circulaire.

Avant de traiter rapidement un exemple numérique, nous examinerons quelques dispositions constructives.

Dispositions constructives

Un des phénomènes à éviter est, au voisinage de l'engorgement, la formation d'un *virolet*. Une part, qui peut être importante, de l'énergie potentielle disponible est alors transformée en énergie cinétique de rotation autour de l'axe vertical du déversoir. Le débit évacué subit une diminution qui peut atteindre 30 %. La meilleure précaution à prendre pour éviter le virolet est la pose de guideaux, parois verticales disposées radialement sur la crête du déversoir ; leur effet est décisif à condition de leur donner une longueur suffisante. Il y a lieu de tenir compte de leur épaisseur dans le calcul du débit et de les profiler avec soin pour éviter une contraction de l'écoulement pouvant diminuer sensiblement la largeur des pertuis. Notons enfin que les déversoirs à crête à forte courbure sont moins sensibles au virolet et que celui-ci ne se produit plus guère qu'après l'engorgement. Les figures 18 et 19 illustrent ce qui précède en montrant le même déversoir fonctionnant avec le même débit, mais avec ou sans guideaux. Le virolet et la forte surélévation du plan d'eau sont bien visibles sur la figure 19.



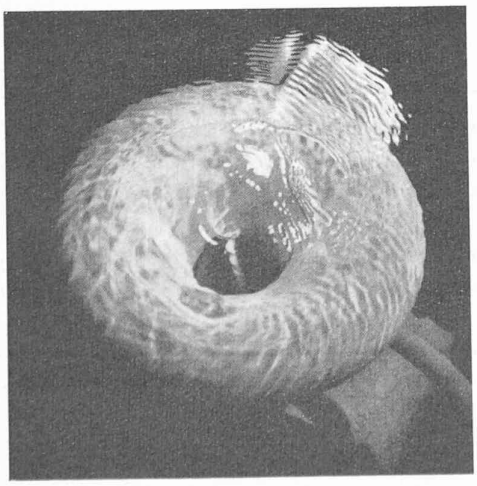


Fig. 18 et 19. — Le même ouvrage et le même débit avec ou sans guideaux. Dans un cas, l'écoulement est nettement dénoyé ; dans l'autre, il est noyé avec formation d'un vortex.

Ainsi que cela a été dit, la *topographie* au voisinage de l'ouvrage est sans influence sur les phénomènes d'engorgement. Néanmoins, si elle rend difficile l'accès de l'eau au déversoir, elle peut modifier la courbe de tarage dans son tronçon correspondant à l'écoulement dénoyé. Le plan d'eau doit alors atteindre une cote plus élevée pour que soit assurée l'évacuation d'un débit donné.

Le *profil de la crête du déversoir* doit satisfaire aux mêmes exigences que celui d'un déversoir rectiligne : éviter des dépressions créant un risque de cavitation ou de décollement, et maintenir néanmoins une courbure suffisante pour assurer un bon coefficient de débit et des dimensions réduites. Dans le dimensionnement du puits il y a également lieu d'éviter des dépressions trop élevées.

Le but de *l'aération* est de stabiliser l'écoulement en assurant une pression constante, égale à la pression atmosphérique, dans la première section où l'écoulement est libre. Plusieurs dispositions peuvent être envisagées selon que l'aération est placée avant ou après le coude, ou même supprimée. Chacune de ces solutions peut être utilisée dans certains cas particuliers, mais d'une façon générale c'est en plaçant l'aération immédiatement à l'aval du coude que l'on obtient le meilleur résultat. Le coude est alors muni d'un étranglement dont la forme, en long et en travers, a une grande influence sur la tranquillité de l'écoulement dans la galerie inférieure.

Remarquons enfin que le coude peut être le siège de *dépressions* et qu'il est nécessaire de vérifier qu'elles ne rendent pas possible un décollement prématuré de la lame : le débit pourrait s'en trouver fortement réduit, précisément lorsque la charge est maximum. Un accroissement de la charge amont peut alors se traduire par une diminution du débit.

Exemple numérique

Soit à calculer un évacuateur de crues avec vanne, pour un débit de 500 m³/sec, le plan d'eau amont le plus élevé étant à la cote 150.00 et le radier de la galerie horizontale à 100.00.

a) *Calcul du déversoir*

Choisissons un diamètre $D = 15$ m et prenons $r = 2$ m. Il résulte $r/D = 0{,}133$, d'où l'on tire $\alpha = 0{,}63$.

A l'aide de la formule de Fawer, nous trouvons $h = 3{,}13$. Nous admettrons 3,2 m et placerons la crête du déversoir à la cote 146,8.

Pour éviter un virolet et pour guider la vanne, nous placerons quatre guideaux. Le développement en crête doit donc être augmenté, et compte tenu de la contraction nous admettrons $D = 17.00$ m.

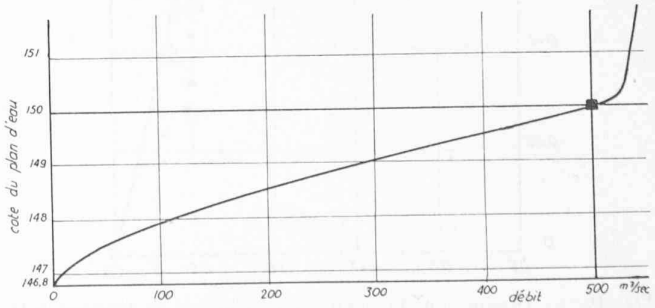


Fig. 20. — Courbe de tarage de l'ouvrage calculé.

b) *Calcul du coude et de l'étranglement*

Nous admettrons une forme avec aération inférieure et étranglement. Pour tenir compte de la zone de raccordement entre écoulement dénoyé et écoulement noyé, nous prendrons comme débit maximum $1{,}05Q = 525$ m³/sec.

La chute géométrique est de $146{,}8 - 100{,}0 = 46{,}8$ m. Compte tenu de $h = 3{,}2$ m et de t, par exemple 5 m, nous avons $H' = 45$ m. La perte de charge étant estimée à 2 m, il reste $H = 43$ m. En prenant $\eta = 0{,}75$, on trouve pour Ω la valeur 20,8 m² qui peut être aisément réalisée avec $\varnothing = 6$ m et $e = 1{,}7$ m.

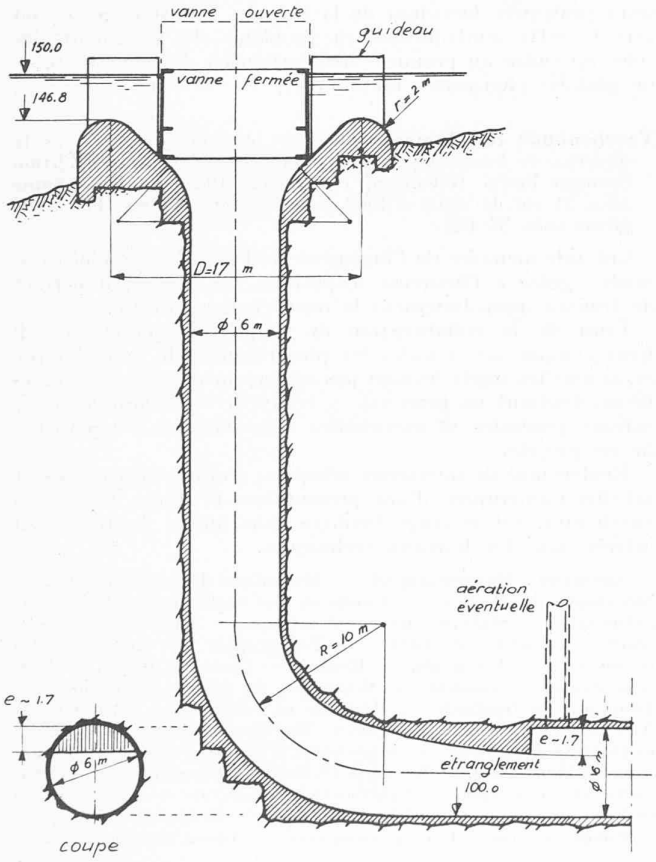


Fig. 21. — Profil en long schématique de l'ouvrage calculé.

La figure 20 indique quelle serait la courbe de tarage de l'évacuateur de crues ainsi calculé. La figure 21 montre schématiquement quel pourrait être son profil en long.

Conclusions

Nos essais ont montré clairement la manière dont fonctionne un déversoir circulaire, tant qualitativement que quantitativement. Un tel ouvrage peut donc être le siège de deux types d'écoulement distincts.

Le premier mode d'écoulement, dénoyé, se produit pour les débits faibles et montre de grandes analogies avec un simple déversement. L'influence de la courbure — en plan — du déversoir peut être mise en évidence et nous proposons une formule permettant le calcul du débit en fonction de la charge et des paramètres du déversoir (D, m, r). Le fait principal à relever est la complète indépendance de ce mode d'écoulement à l'égard des conditions aval (coude, puits, etc.) ; il n'en est pas de même des conditions amont et la topographie ou d'éventuels guideaux ne sont pas sans effet.

Le deuxième mode d'écoulement, noyé, correspond à un écoulement sous charge de l'ensemble de l'ouvrage et se produit pour les grands débits. Il est, lui, indépendant des conditions amont et déterminant quant à la capacité maximum d'évacuation d'un ouvrage. Nous donnons également une méthode de calcul du débit dans ce cas.

Le régime commun à ces deux lois [intersection des deux caractéristiques $Q = f(h)$] définit le débit d'engorgement. Lorsqu'il s'agit d'un évacuateur de crues, c'est ce débit-là qui doit être supérieur ou égal au débit maximum envisagé : toute augmentation ne peut se produire alors qu'en régime noyé et provoque, même si elle est faible, une forte surélévation du plan d'eau amont.

Les formules mentionnées ne sont que des adaptations, au cas particulier du déversoir circulaire, de lois générales bien connues. Leur validité est limitée par l'étendue des essais qui leur ont servi de base, mais elle est suffisante dans les cas les plus fréquents. Nous espérons ainsi mettre à disposition de l'ingénieur quelques renseignements utiles et susceptibles de lui permettre le dimensionnement approximatif d'un tel ouvrage. Nous disons approximatif tant parce que le nombre des variantes essayées (atteignant pourtant plus de cinquante) n'est pas suffisant pour préciser certaines influences secondaires, que parce que l'effet de la topographie avoisinant l'ouvrage ou autres formes amont varie d'un cas à l'autre et ne peut être décelé que par des essais sur modèle réduit.

BIBLIOGRAPHIE

Les chemins de fer suisses après un siècle, 1847-1947 (en cinq volumes). *Tome premier : Généralités, Histoire, Finances, Statistique, Personnel.* Ouvrage commémoratif du Département fédéral des postes et des chemins de fer publié par l'Office fédéral des transports avec le concours des Chemins de fer suisses et de nombreux spécialistes, sous la direction de *René Thiessing* et *Maurice Paschoud.* Editions Delachaux & Niestlé S. A., Neuchâtel et Paris, 1949. — Un volume 18 × 26 cm, de 621 pages, avec 5 cartes en couleurs, 8 planches en couleurs et 2 en héliogravure, 104 illustrations hors texte et 29 gravures dans le texte. Prix de souscription des cinq volumes reliés, 90 fr. Prix du tome premier, acheté isolément, 32 fr.

Sur l'initiative de l'Office fédéral des transports, la maison Delachaux & Niestlé, à Neuchâtel, vient d'éditer un livre qui mérite de retenir l'attention.

Il s'agit du premier volume d'un ouvrage en cinq tomes, abondamment illustrés, intitulé *Les chemins de fer suisses après un siècle* et publié par le Département fédéral des postes et des chemins de fer, avec le concours des Chemins de fer fédéraux et des autres entreprises ferroviaires de notre pays. Jusqu'à ce jour, aucune publication ne traitait à fond les multiples aspects du problème ferroviaire, et la préparation de cet ouvrage a exigé de longs travaux.

Les quelque cent-vingt collaborateurs, hommes de la pratique appartenant aux services techniques ou administratifs de nos entreprises de transport, à l'industrie privée et à la presse, tout en traitant leur sujet à fond, s'adressent non seulement au spécialiste, mais bien plus encore à un large public qui se recrutera dans tous les milieux de la population. De plus, l'ouvrage en question fournira ample matière aux rceherches des spécialistes du monde entier, car les chemins de fer suisses présentent des particularités techniques d'un grand intérêt. Les pionniers de l'industrie suisse ont contribué pour une grande part au développement de notre réseau ferroviaire dont l'histoire offre l'exemple d'une collaboration à laquelle toutes les forces du pays ont contribué.

La direction de ce travail a été confiée à MM. Maurice Paschoud, ancien directeur général des Chemins de fer fédé-