SUR L'ADAPTATION DE FORMES PROFILÉES POUR LA PROTECTION DES BARRAGES CONTRE LES AFFOUILLEMENTS

PAR
S. JUNIEWICZ *

Introduction.

Les constructions hydrotechniques des dernières années placent les ingénieurs hydrotechniciens en face de problèmes de plus en plus compliqués et difficiles. La solution juste de ces problèmes, tant au point de vue technique qu'économique, exige non seulement d'ériger de nouvelles installations et d'utiliser de nouveaux matériaux de construction, mais aussi de faire continuellement des travaux de recherches de longue durée, pour trouver de nouvelles formes d'éléments de constructions hydrotechniques, lesquels semblaient, depuis longtemps déjà, satisfaisants et acceptés en pratique.

La protection des barrages contre l'affouillement est un des problèmes qui, en rapport avec le développement toujours accru de constructions hydrotechniques, exige une solution urgente. Ces constructions se trouvent dans des conditions hydrauliques difficiles et fluctuantes, dues aux changements des débits des rivières, qui influent sur les niveaux d'eau dans le cours d'eau et sur le profil du lit.

Mais la difficulté principale se présente dans le fait que ces barrages sont construits sur de plus en plus grands fleuves et sont de plus en plus hauts. C'est pourquoi le problème de sécurité des barrages est le problème le plus urgent à résoudre. La protection des barrages contre l'affouillement se complique par le fait que la science de nos jours ne

possède pas les formules mathématiques qui permettent de calculer l'efficacité des installations contre l'affouillement. C'est pourquoi, outre les observations qui se font sur les constructions déjà effectuées, on fait les essais sur les modèles réduits en laboratoire. Le but de ces essais consiste à connaître l'efficacité des constructions projetées ou à observer les phénomènes hydrauliques qui se produisent sur le radier des barrages, ce qui est nécessaire pour la bonne exécution de la construction elle-même.

Le but de la présente étude est de donner des explications théoriques de certains phénomènes qui se produisent sur le radier aval des barrages et d'analyser les résultats des essais de contrôle pratiqués en laboratoire sur modèle réduit, et enfin d'en tirer les conclusions pour les constructions hydrotechniques.

Installations actuelles pour la dissipation d'énergie en aval des barrages.

Le but principal des installations actuelles pour la protection des barrages contre les affouillements est la dissipation de l'énergie cinétique de l'eau.

Actuellement, on utilise les installations suivantes pour la dissipation de l'énergie :

- des bassins amortisseurs et des cloisons étanches, servant à amortir les ressauts d'eau;
- des butoirs ou obstacles séparés, en forme de pions disposés sur le radier aval du barrage.

(*) Docteur-ingénieur, directeur de la chaire des Constructions hydrotechniques de l'Ecole polytechnique de Wrocław (Pologne).

La face frontale de ces redans peut être verticale, inclinée ou concave;

- des parois, cloisons et poutres qui provoquent le partage de l'écoulement en tranches verticales ou horizontales;
- des seuils continus ou dentelés;
- des grilles utilisées le plus souvent pour une protection provisoire contre l'affouillement;
- des trempes servant au rejet de la veine fluide à une distance suffisamment grande pour écarter l'affouillement du pied du barrage;
- des chenaux dirigeant les courants d'eau les uns contre les autres horizontalement ou verticalement.

Les auteurs des différents travaux concernant la dissipation d'énergie d'eau en aval des barrages sont d'accord sur le fait qu'il faut éviter la dissipation provoquée par un choc direct contre les murs de l'ouvrage et essayer de dissiper l'énergie en tourbillons et violents mélanges des jets d'eau séparés.

Considérations théoriques à propos de phénomènes qui se produisent dans les écoulements d'eau sur le radier du barrage.

Les phénomènes hydrauliques, qui se produisent dans l'écoulement de l'eau sur le radier du barrage, intéressent les hydrotechniciens avant tout à cause de la création d'affouillements dans le bief aval.

Les dimensions de ces affouillements dépendent des facteurs hydrauliques suivants :

- des ressources d'énergie du courant, c'est-à-dire de la somme de l'énergie potentielle et de l'énergie cinétique;
- de la répartition des vitesses dans la section terminale du radier;
- de la vitesse moyenne sur le seuil du radier;
- du nombre de Froude qui caractérise l'écoulement.

Les facteurs principaux sont les ressources d'énergie de l'eau et la répartition des vitesses. Les deux autres facteurs caractérisent moins le courant d'eau, car on sait qu'avec la même vitesse moyenne et avec le même nombre de Froude peuvent se former des affouillements de forme et de profondeur différentes.

En se basant sur ces considérations, nous avons conclu que les installations destinées à protéger les ouvrages hydrauliques contre les affouillements doivent être examinées suivant deux aspects, et notamment ils doivent :

1° Assurer une dissipation d'énergie telle que le courant d'eau s'écoulant du radier dans le lit de

la rivière ne dispose pas de plus grandes ressources d'énergie que l'eau coulant dans la rivière dans les conditions naturelles;

2° Provoquer une répartition des vitesses dans la section terminale du radier se rapprochant le plus possible de la répartition des vitesses dans les sections du fleuve dans les conditions naturelles.

Le premier aspect du problème est largement étudié par les hydrotechniciens; et les installations modernes pour la dissipation d'énergie d'eau que nous avons passées en revue dans le paragraphe II répondent à cette exigence.

De toutes ces installations ressortent, en premier lieu, les bassins d'amortissement dans lesquels la dissipation d'énergie se produit par tourbillons intensifs : les dimensions de ces bassins peuvent être choisies par des calculs hydrauliques.

S'appuyant sur le fait que l'installation des bassins d'amortissement est justifiée par la théorie et la pratique, nous étudierons par la suite le courant d'eau sur le radier aval du barrage, pour lequel la dissipation d'énergie est effectuée dans un bassin d'amortissement.

Le deuxième aspect du problème, la répartition des vitesses, n'a pratiquement pas été résolu par les hydrotechniciens. Bien que certains auteurs le mentionnent, ils n'analysent pas l'influence des installations proposées pour provoquer la dissipation d'énergie sur la répartition des vitesses. Ils supposent que les vitesses des jets d'eau même sporadiques se répartiront conformément au profil normal de la répartition des vitesses dans l'écoulement à surface libre.

Ceci arrive en réalité sur le cours d'eau à une grande distance de l'ouvrage : c'est pourquoi il faudrait, pour obtenir un profil normal, un radier long et coûteux.

Le seuil final du bassin d'amortissement et les obstacles installés sur ce seuil exercent une grande influence sur la répartition des vitesses. Il faut remarquer que le seuil final aussi bien que les obstacles peuvent être construits de diverses formes mais, selon nous, les principales indications sur cette forme doivent découler de l'analyse de la répartition des vitesses sur le seuil et des calculs hydrauliques.

Analysons la répartition des vitesses dans l'écoulement d'eau sur le seuil final du bassin d'amortissement, partant du principe que le mur frontal est incliné et que sur le seuil il n'y a pas d'obstacle (fig. 1).

Tout le débit qui s'écoule du barrage traverse le bassin d'amortissement en veine restreinte coulant sur le fond du radier. Les vitesses d'eau dans cette veine sont considérables, et le plus souvent elles sont plus grandes que les vitesses critiques. Avec cette vitesse, l'eau s'écoule sur le mur incliné et en glissant sur lui atteint la couche supérieure d'eau du bief aval.

Cette veine d'eau à grande vitesse ainsi dirigée peut provoquer un phénomène de vitesses de retour négatives sur le fond de la rivière, ce qui implique une très mauvaise répartition des vitesses.

Le tourbillon ainsi obtenu derrière le seuil aspirera les grains du lit du fleuve sur le seuil, lesquels seront repris par la lame d'eau supérieure à grande

vitesse, pour être entraînés plus loin à l'aval. De cette façon, il apparaît qu'indirectement peuvent prendre naissance, au pied du seuil final, de profondes fosses risquant de provoquer des défaillances de l'ouvrage.

Il découle de cette analyse que tous les dispositifs utilisés actuellement sur le seuil terminal : blocs, obstacles, redans, continus ou crénelés, à face verticale, inclinée ou concave, ne pouvaient conduire à la répartition idéale des vitesses à l'aval du seuil.

Pour atteindre ce but, la forme des dispositifs utilisés sur le seuil devrait être mieux adaptée en épousant la forme contournée de façon à diriger les filets d'eau dans les directions nécessaires, et ne pas être un obstacle pour l'écoulement.

Ces conclusions nous ont donné l'idée d'adapter sur les seuils terminaux des bassins d'amortissement des figures de forme convexe.

Pour obtenir une base théorique et s'assurer de l'action de ces formes sur la direction des filets, nous avons analysé les déviations de ces derniers, frappant un cylindre horizontal, ramenant ainsi le problème à deux dimensions. Nous avons considéré un liquide parfait, et pour le calcul du changement de direction du filet fluide autour du cylindre, nous avons fait l'hypothèse d'une diminution d'épaisseur du filet.

Sur la figure 2 nous présentons le schéma du seuil terminal avec un cylindre sur lequel se déverse le filet fluide.

Nous avons pris les symboles suivants :

- θ = angle d'inclinaison de la face amont du seuil;
- R = rayon du cylindre;
- A = le point d'impact du filet tombant sur le cylindre;
- α_A = l'angle positionnant le point A par rapport à l'axe y ;
- v_0 = la vitesse du filet tombant sur le cylindre;
- p_0 = la pression du filet tombant sur le cylindre;
- d_0 = l'épaisseur du filet tombant sur le cylindre;
- H_A = la profondeur du point A sous la surface libre du liquide;
- B = le point de détachement du filet du cylindre;
- α_B = angle positionnant le point B par rapport à l'axe y du cylindre;
- v_2 = la vitesse du filet quittant le cylindre;
- p_2 = la pression du filet quittant le cylindre;
- d_2 = l'épaisseur du filet quittant le cylindre;
- H_B = la profondeur du point B sous la surface libre du liquide;
- v_1 = la vitesse du filet entre les points A et B;
- p_1 = la pression dans le filet entre les points A et B;
- d_1 = l'épaisseur du filet entre les points A et B;
- H_0 = la profondeur de l'axe du cylindre sous la surface libre du liquide;
- $\alpha_1 = d_1/d_0$;
- $\alpha_2 = d_2/d_0$;
- $\alpha = H_0/R$;
- ρ = masse spécifique du fluide.

Nous appuyant sur l'équation de Bernoulli et

2/

négligeant la différence d'énergie de position, nous obtenons :

$$p_0 - p_1 = \rho \frac{v_1^2 - v_0^2}{2}$$

L'équation de continuité nous donne :

$$d_0 v_0 = d_1 v_1 = q = \text{Cte}$$

Enfin l'équation d'Euler :

$$\rho_1 q_1 v_1 - \rho_2 q_2 v_2 = f$$

où f est la force résultante des pressions s'exerçant sur la tranche du filet fluide A B.

En supposant les simplifications suivantes :

- nous négligeons les forces qui agissent sur les sections limites d'élément du filet fluide;
- nous négligeons les effets dynamiques qui se produisent aux environs du point A;
- nous supposons que dans l'élément du filet existant des pressions sur la surface supérieure p_0 et sur la surface inférieure p_1 . En appliquant le calcul vectoriel pour déterminer les composantes de la force f sur les axes ox et oy , et en utilisant les trois équations précédentes, nous obtenons finalement :

$$\frac{1}{\alpha_2} \sin(\alpha_A + \alpha_B) = \sin \alpha_A + \sin \alpha_B \quad (1)$$

Nous supposons que l'épaisseur du filet comptée suivant la verticale est proportionnelle à la profondeur à laquelle se trouve le filet, ce qui s'écrit :

$$\frac{d_2}{\cos \zeta} : \frac{d_0}{\cos \theta} = \frac{H_B}{H_A} \quad (2)$$

en portant l'équation (2) dans l'équation (1) il vient :

$$\frac{\sin \alpha_A + \sin \alpha_B}{\sin(\alpha_A + \alpha_B)} = \frac{[\alpha - \cos(\alpha_A + \theta)] \cos \theta}{[\alpha - \cos(\theta - \alpha_B)] \cos(\theta - \alpha_B)}$$

En prenant $\alpha_B = \alpha$ variable et en posant :

$$\begin{aligned} \varphi(\alpha) &= \frac{\sin \alpha_A + \sin \alpha}{\sin(\alpha_A + \alpha)} \\ \Psi(\alpha) &= \frac{(\alpha - \cos \theta) \cos \theta}{[\alpha - \cos(\theta - \alpha)] \cos(\theta - \alpha)} \\ \lambda &= \frac{\alpha - \cos \theta}{\alpha - \cos(\alpha_A + \theta)} \end{aligned}$$

3/

4/

nous obtenons l'équation finale :

$$\lambda \cdot \varphi(\alpha) = \Psi(\alpha)$$

dans laquelle n'intervient que la seule variable α , car α_A , θ , κ dans les conditions données ont des valeurs déterminées.

Analysons les fonctions obtenues avec les conventions :

$$\alpha_A > 0 \quad \theta > 0$$

et dans le cas où $\kappa \geq 2$ ce qui implique que $\lambda < 1$.

a) Analyse de la fonction :

$$y = \varphi(\alpha) = \frac{\sin \alpha_A + \sin \alpha}{\sin(\alpha_A + \alpha)}$$

α varie de $-\alpha_A$ à $\pi - \alpha_A$,

5/

— pour

$$\alpha = \pi - \alpha_A, \quad \sin(\alpha_A + \alpha) = 0$$

et

$$\sin \alpha_A + \sin \alpha = 2 \sin \alpha_A > 0$$

donc

$$\lim \varphi(\alpha) = +\infty \text{ quand } \alpha \rightarrow \pi - \alpha_A$$

— pour $\alpha = -\alpha_A$, numérateur et dénominateur sont nuls. Nous levons l'indétermination par la règle de L'Hopital et trouvons la limite :

$$\lim \varphi(\alpha) = \cos \alpha_A \text{ quand } \alpha \rightarrow -\alpha_A$$

— pour $-\alpha_A < \alpha < \pi - \alpha_A$, la fonction est toujours croissante, elle a donc l'allure indiquée sur la figure 3.

b) Analyse de la fonction :

$$y = \Psi(\alpha) = \frac{(\kappa - \cos \theta) \cos \theta}{[\kappa - \cos(\theta - \alpha)] \cos(\theta - \alpha)}$$

Après le calcul de la dérivée, il apparaît que la variation de la fonction dépend du signe de l'expression :

$$-[\kappa - 2 \cos(\theta - \alpha)] \sin(\theta - \alpha)$$

or $\kappa - 2 \cos(\theta - \alpha) \geq 0$ toujours, puisque nous avons pris $\kappa \geq 2$ à la limite lorsque $\kappa = 2$, $\kappa - 2 \cos(\theta - \alpha) = 0$ au point $\alpha = \theta$ pour lequel la fonction passe donc par un minimum.

Une analyse plus poussée de cette fonction nous donne finalement l'allure de la courbe représentative sur la figure 4.

L'intersection des graphiques :

$$y = \lambda \cdot \varphi(\alpha)$$

et :

$$y = \Psi(\alpha)$$

nous donne l'angle correspondant au point où le filet se détache du cylindre. Cela est indiqué sur la figure 4.

Le filet contourne donc le cylindre et se détache de celui-ci tangentielllement pour un angle $\alpha_B > 0$ ce qui implique une déflexion vers le bas du filet par rapport à sa position première.

Nous pouvons appliquer ce phénomène au problème de la protection contre les affouillements pour obtenir après le seuil final du bassin d'amortissement une répartition convenable des vitesses.

Les considérations théoriques précédentes, concernant l'écoulement du filet liquide autour du cylindre, justifient la suggestion que les formes convexes de la surface seront celles qui permettront de diriger le plus convenablement les filets d'eau après le seuil terminal.

6/

7/

9/

8/

10/

Étude expérimentale des divers dispositifs sur le seuil terminal du bassin d'amortissement.

Dans le laboratoire hydrotechnique de l'Ecole polytechnique de Wrocław (Pologne), nous avons projeté et construit le modèle d'un barrage avec un bassin d'amortissement et avec des éléments interchangeables pour les poser sur le seuil final du radier. Le modèle était monté dans un canal vitré (fig. 5).

Les essais ont été réalisés avec divers dispositifs. Tout d'abord nous avons placé des éléments à surface plane, couramment employés. Ensuite nous avons utilisé des éléments à surface convexe : cylindre continu, blocs cylindriques espacés, sphères également espacées et enfin corps profilés ovoïdes.

La méthode d'étude comportait les points suivants :

- mesure des profondeurs d'affouillement;
- observation des mouvements des grains de sable;
- examen des directions des vitesses.

Pour pouvoir faire ces dernières observations, nous avons construit un appareil, nommé aérateur peigniforme (*) (fig. 6).

L'appareil se compose d'un tube « A », sur lequel sont fixés des tubes « B » de petite dimension (environ 0,2 mm de diamètre).

Le tube « A » est obturé à une extrémité et par l'autre arrive de l'air sous une basse pression. Dans les essais nous avons employé environ 200 g/cm². Les bulles d'air qui s'élèvent du bout des tubes « B » montrent le sens de l'écoulement des filets d'eau et la direction des trajectoires de ces bulles donnent la résultante de la vitesse d'écoulement « v » et de la vitesse ascensionnelle quasi constante « a » de la bulle.

Cet appareil a permis non seulement d'observer des phénomènes qui se produisaient dans l'écoulement sur le bief aval, mais aussi de les fixer par la méthode photo et cinématographique (fig. 7 à 10).

Les principaux résultats des essais concernant l'influence sur les affouillements des dispositifs

(*) Office des brevets en Pologne n° W-33334.

11/

mis sur le seuil final, sont exposés dans le tableau ci-contre, et comparés sur la figure 12.

Le dispositif de forme ovoïde expérimenté sur le modèle est représenté sur la figure 11 (les dimensions indiquées sont celles du modèle).

C'est un corps de révolution à axe horizontal.

Une des caractéristiques intéressantes de ce dispositif est que les efforts qu'il subit sont très faibles.

(Sur le modèle, la fixation était assurée par une simple pastille de terre à modeler.)

Les essais ont mis en évidence la très nette supériorité des corps convexes de forme ovoïde pour la protection des barrages contre les affouillements. Nous signalons au passage que de nombreux essais ont été effectués durant plusieurs années pour étudier l'écoulement autour de sphères : influence du diamètre des sphères, de leur disposi-

N° DE L'ESSAI	DISPOSITIF D'AMORTISSEMENT	AFFOUILLEMENT		REMBLAI	
		Profondeur max.	Longueur	Hau- teur max.	Lon- gueur
		(mm)	(%)	(mm)	(cm)
1	Bassin d'amortissement.	28	100	20	31
2	Seuil rectangulaire.	30	107	28	30
3	Seuil dentelé.	11	39	18	13
4	Seuil cylindrique.	26	93	20	30
5	Tronçons de cylindre.	20	71	14	13
6	Sphères.	6	21	16	10
7	Corps convexes (forme ovoïdale).	2	7	12	11

tion transversalement et en profondeur sur la forme et la valeur de l'affouillement.

En terminant ce chapitre, il faut attirer l'attention sur les résultats de nos observations sur les fleuves de montagne. Nous avons en effet observé que la nature elle-même protège les lits des fleuves contre l'érosion. L'eau s'écoule en cascades au-dessous desquelles se forment des fosses qui, au point de vue de la dissipation d'énergie cinétique, jouent le même rôle que les bassins d'amortissement. A l'aval de ces fosses se placent des cailloux

12/

et graviers de forme plus ou moins ovale qui donnent ainsi la distribution des vitesses convenable pour diminuer les affouillements. Nous pouvons donc dire que la forme ovoïde est celle se rapprochant le plus de la forme naturelle.

Conclusion.

De l'exposé précédent nous tirerons les conclusions suivantes :

1° L'eau s'écoulant d'un barrage possède de grandes ressources d'énergie cinétique qui, pour éviter les affouillements du sol à l'aval, doivent être amoindries au-dessus d'un radier en béton. A cet effet conviennent particulièrement les bassins d'amortissement utilisés isolément ou comme ouvrage annexe. Dans ces bassins la dissipation d'énergie est une conséquence de la grande turbulence qui y règne; les molécules perdent leur énergie cinétique par frottement les unes contre les autres.

2° Cependant la seule dissipation d'énergie cinétique n'assure pas toujours une protection efficace contre les affouillements. Il faudra en plus obtenir une répartition des vitesses convenables à l'aval du radier, ce qui n'est pas le cas après le seuil terminal d'un simple bassin d'amortissement.

3° Des considérations théoriques prouvent que des obstacles à faces convexes placées dans un courant d'eau permettent de diriger à souhait les filets fluides. On pourra donc, en plaçant sur le seuil final d'un bassin d'amortissement des obstacles à faces convexes, obtenir un bon profil de vitesse.

4° Des recherches sur modèles réduits ont prouvé que pour obtenir une répartition des vitesses normale, il fallait non seulement diriger les filets d'eau, mais en outre provoquer une zone de mélange de ces filets.

5° Des essais effectués en laboratoire ont conduit à adopter une forme ovoïdale que l'on placera en fin du radier sur le seuil final (*). On obtient de la sorte une bonne répartition de vitesses et il en découle une protection efficace contre les risques d'affouillements.

Les mêmes essais prouvent en outre que la profondeur de la fosse après de telles formes d'obstacles est à peine 10 % de celle que l'on obtient après les dispositifs classiques à parois rectilignes.

6° Le principal avantage de la solution proposée est la possibilité de réduction de la longueur du radier et par suite la diminution des frais engagés dans la construction.

(*) Office des brevets en Pologne n° 42000.

Abstract

Faired sections for the protection of dams against scour

by S. Juniewicz *

The main subject of this study is the dissipation of energy downstream from a dam apron.

The advantages of obstacles with a convex upstream face are considered theoretically, followed by a description of the experimental installation (Figs 5 and 6) and the tests results. Tabulated experimental data show that the proposed arrangements result in considerably reduced scour (Test. No. 7). Obstacle shape details are shown in Fig. 11.

Figure 12 shows states of scour on various energy dissipation obstacles after 1, 2 and 3 hours' testing time, from which the reduced scour associated with convex obstacles is clearly seen.

* Docteur-Ingénieur, Directeur de la chaire des Constructions hydrotechniques de l'Ecole polytechnique de Wrocław (Pologne).

PARIS |

LA CRUE DE 1910 |

Le pont de Tolbiac

(Collection Viollet)