

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 97 (2005)
Heft: 9-10

Artikel: Difuse: stabilité du revêtement et érosion en pied de digue
Autor: Bonvin, Jacques
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-941765>

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: 04.02.2026

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

Difuse: Stabilité du revêtement et érosion en pied de digue

Jacques Bonvin

Résumé

Dans le cadre du projet de recherche Difuse, l'Ecole d'Ingénieurs du Canton de Vaud (EIVD), s'est vu confiée les tâches suivantes: traiter les problèmes liés au déversement latéral des digues, résoudre les problèmes de stabilité du revêtement de la digue, contrôler l'érosion du pied de digue, déterminer des systèmes d'évacuation des eaux.

Les bases théoriques ont été établies par exploration expérimentale systématique des paramètres à considérer soit: le type de fusible, les dimensions, l'orientation et la forme du déversoir, la nature de la couche superficielle, l'inclinaison du revêtement, la vitesse de submersion, la nature du terrain en pied de digue, l'énergie de l'écoulement, la hauteur d'eau, la zone de dissipation de l'énergie en pied de digue.

Pour l'expérimentation, l'EIVD a construit un canal extérieur d'essais hydrauliques ($L=25,0$ m; $l=5,0$ m; $h=1,20$ m). Les résultats obtenus ont abouti au choix d'un type de digue adéquat avec l'utilisation de matériaux de construction adaptés à chaque situation locale. Après vérification des critères et des bases de dimensionnement, une formule de dimensionnement de l'affouillement qui prend en compte la hauteur d'eau et/ou la hauteur de la ligne d'énergie a été établie. Une liste de recommandations constructives à l'intention des ingénieurs projeteurs complète le rapport de recherche.

Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprojektes Difuse wurden der Fachhochschule Yverdon (EIVD) die folgenden Aufgaben übertragen: Behandlung der Probleme, welche mit dem seitlichen Überströmen von Flussdämmen verbunden sind, festlegen von Problemlösungen betreffend die Stabilität der Dammoberfläche, Vermeidung der Erosion des Dammfusses sowie Festlegen von Hochwasser-Entlastungsvorrichtungen.

Die theoretischen Grundlagen wurden anhand von systematischen Modelluntersuchungen der massgebenden Parameter durchgeführt, wie: Typ der Entlastungsvorrichtung, Ausmasse, Ausrichtung und Gestalt der Entlastung, Art der Oberfläche, Neigung der Dammoberfläche, Geschwindigkeit des überfliessenden Wassers, Geländeeigenschaften am Dammfuss, Energieinhalt des überlaufenden Wassers, die Wassertiefe sowie die Verhältnisse für die Energievernichtung am Dammfuss.

Für die Modelluntersuchungen hat EIVD einen Versuchskanal im Freien gebaut ($L = 25,0$ m, $l = 5,0$ m, $h = 1,2$ m). Die Resultate haben zur Wahl eines angemessenen Dammtyps unter Verwendung örtlich angepasster Baumaterialien geführt. Nach Überprüfung der Dimensionierungskriterien und -grundlagen wurde eine Formel für die Abschätzung der Unterkolkung entwickelt, welche die Abflusstiefe und/oder die Energielinienhöhe berücksichtigt. Eine Liste mit Empfehlungen an den projektierenden Ingenieur vervollständigt den Untersuchungsbericht.

1. Objectifs techniques

Sur le plan technique les buts poursuivis sont:

- d'augmenter la sécurité de l'ouvrage,
- de définir la vulnérabilité de celui-ci,
- d'assurer la fiabilité de fonctionnement,
- de veiller à l'intégration environnementale et paysagère,
- d'optimiser l'entretien.

Les objectifs techniques ont mis l'accent sur la recherche et l'analyse comparative de solutions orientées vers la sécurité de l'ouvrage, sa vulnérabilité, sa

fiabilité de fonctionnement, son intégration environnementale et paysagère, ainsi que l'optimisation de son entretien.

Les résultats obtenus permettent le choix d'un type d'ouvrage adéquat comprenant: l'utilisation et la mise en place de matériaux de construction de la digue, du type de revêtement, de la protection du pied de digue, adaptés à chaque situation locale.

2. Installation d'essais

Le projet reposant essentiellement sur une approche expérimentale, nous avons

construit en 2001, un canal extérieur d'essais hydrauliques.

Les essais du fusible (EIF) et les essais d'ensemble (EPFL-EIVD-EIF) ont été réalisés dans le bassin extérieur du laboratoire d'hydraulique à Yverdon (Figure 1).

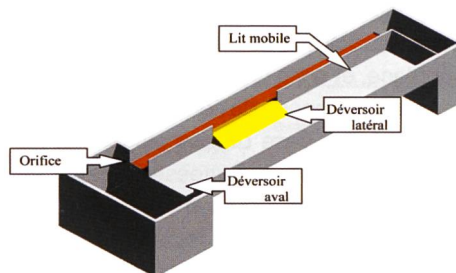


Figure 1. Schéma du canal d'essais.

Le canal extérieur est rectangulaire en béton armé avec comme dimensions principales: longueur totale du canal 25,0 m, longueur du canal de mesure: 19,0 m, largeur intérieure 5,0 m, hauteur intérieure des murs 1,20 m.

La pente longitudinal est fixe et réglée à: 1 ‰.

Le canal est alimenté en eau par deux pompes immergées débitant 189 l/s chacune et travaillant en circuit fermé.

Sur les tuyaux d'alimentation sont fixés deux débitmètres électromagnétiques de diamètre 300 mm.

Un pont roulant, se déplaçant sur un rail fixé le long du canal, supporte les appareils de mesures nécessaires aux expériences (moulinets et capteurs). Dans un Portakabin sont branchés tous les réseaux électriques et un ordinateur réceptionne les signaux de mesures (Labview).

Pour nos essais, nous avons mis en place deux configurations de digues:

- a) un déversoir latéral de longueur $L = 1,33$ m, avec pente de digue 2:3, une fosse d'érosion (granulométrie 0/4 et 0/16), échelle 1:10,
- b) un déversoir de longueur $L = 4,5$ m, avec une pente de 1:2, une fosse d'érosion (granulométrie 0/16), échelle 1:15.

3. Etat de la recherche dans le domaine

3.1 Situation

La figure 2 donne un aperçu des protec-

tions de digues qui sont couramment utilisées et qui correspondent à la situation dans laquelle nous nous trouvons. Pour le dimensionnement des éléments, nous avons comparé les différentes approches connues à ce jour.

3.2 Choix des domaines d'utilisation

Les conditions fixées au départ de l'étude, en relation avec la 3^{ème} correction du Rhône, sont les suivantes: une hauteur moyenne des digues d'environ 6,0 m; une hauteur de lame déversante ne devant pas dépasser 1,0 m; une pente de 2:3 et plus particulièrement 1:2; le choix d'un revêtement adapté aux matériaux à disposition sur place, et enfin un système compatible avec les exigences de l'environnement.

Sur la base de ces exigences et, en tenant compte des vitesses, des lignes d'eau et d'énergie, du nombre de Froude, etc. notre choix pour cette étude s'est dirigé vers des revêtements adaptés de types rugueux, macro-rugueux et enrochement (Rip-Rap).

4. Types d'essais effectués

4.1 Principaux essais

Les essais se sont déroulés en 4 phases:

- phase 1: essais sans fosse d'érosion, L = 1,33 m, pente 2:3, sur revêtement lisse avec et sans macro-rugosités et sur revêtement rugueux avec et sans macro-rugosité, éch. 1:10,
- phase 2: essais avec fosse d'érosion (0/4 mm), L = 1,33 m, pente 2:3, sur revêtements lisse, rugueux, rugueux avec macro-rugosité, éch. 1:10,

- phase 3: essais avec fosse d'érosion (0/16 mm), L = 1,33 m, pente 2:3 sur revêtements lisse, rugueux et rugueux avec macro-rugosité, éch. 1:10,
- phase 4: essai selon nouveau dispositif constructif et fosse d'érosion (0/16 mm), L = 4,5 m, pente 1:2, sur revêtements lisse (carton bitumineux), rugueux (dalles de jardin délavées), rugueux avec macro-rugosités (dalles et cubes de 4x4/4 cm et 4x4/8 cm avec différentes dispositions des cubes) et enrochement (Rip-Rap), éch. 1:15.

La phase 4 découle des expériences faites dans les 3 premières phases. Elle a été retenue pour le choix définitif des éléments constitutifs de notre système et pour les applications théoriques.

4.2 Exemples d'essais

- Dissipation de l'énergie L_{déversé} = 1,33 m; pente 2:3; granulométrie de la fosse 0/16; échelle 1:10 hauteur de la lame déversée h = 7 cm; type de revêtement rugueux (fig. 3).

- Dissipation de l'énergie: L_{déversé} = 4,5 m; pente 1:2; granulométrie de la fosse 0/16; échelle 1:15, type de revêtement rugueux, et enrochement (Rip-Rap), fig 4.

Cas:

- Revêtement lisse: h = 7 cm; t = 3 h; V = 0,510 m³; S = 3,8 m²
- Revêtement rugueux: h = 7 cm; t = 24 h; V = 0,285 m³; S = 2,04 m²
- Revêtement macro-rugueux: h = 7 cm; t = 24 h; V = 0,274 m³; S = 2,56 m²
- Revêtement enrochement: h = 7 cm; t = 24 h; V = 0,191 m³; S = 1,92 m²

types de revêtement	Revêtement herbeux	Enrochement Rip-Rap	Gabions	Blocs liés et recouvrement de terre végétale	Béton préfabriqué reliés par câbles	RCC (roller compact concrete)	Spillway avec escaliers et macro-rugosités
Froude							
>30							
30							
20							
15							
10							
8							
5							
3							
1							
0.5							

Figure 2. Revue des principaux types de revêtement de digues pour le déversement contrôlé.

5. Déversoir et déversement latéral

5.1 Dimensionnement, de la longueur minimale du déversoir latéral

La longueur minimale du déversoir latéral a été déterminée à partir du calcul de la stabilité de l'enrochement (Rip-Rap). Le but étant d'éviter la destruction du revêtement de la digue, nous avons déterminé le diamètre critique d₆₅ des éléments de l'enrochement pour un débit unitaire maximum.

En fonction des conditions propres à notre situation un certain nombre de formules ont été testées:

Hartung/Scheuerlein (1968):

$$Fr_{s,cr} = 5 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{(S-1)}{\sigma}} \cdot (\sigma - 1 + 1.3 \cdot \sin \alpha) \cdot \sqrt{\cos \alpha}$$

Lindford (Saunders (1968):

$$Fr_{s,cr} = \frac{7.97}{\sqrt{g}} \cdot \left[\frac{1.2}{P_c} \cdot \frac{0.263 \cdot \tan \varphi}{P_{cl}} \cdot (S-1) \right]^{\frac{5}{3}} \cdot (\sin \alpha)^{-\frac{7}{6}}$$

Olivier (1976):

$$Fr_{s,cr} = \frac{0.235}{\sqrt{g}} \cdot (S-1)^{\frac{5}{3}} \cdot (\sin \alpha)^{-\frac{7}{6}}$$

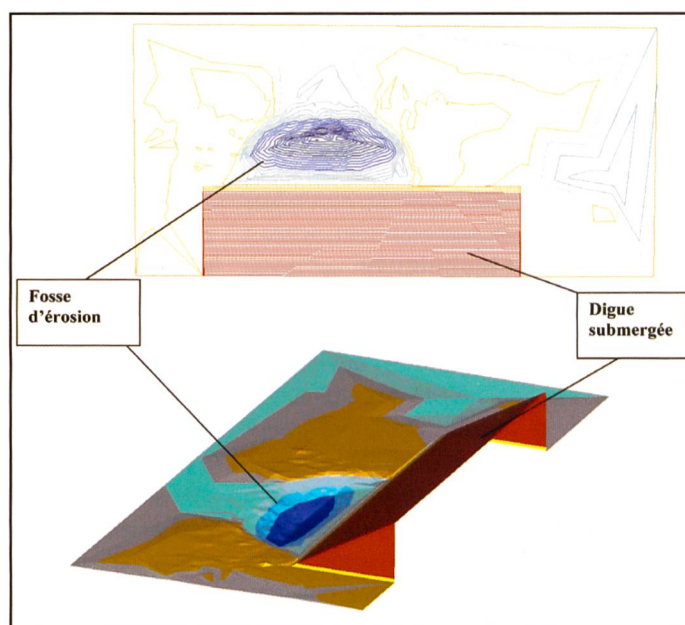


Figure 3. Vue du revêtement rugueux, de la forme de l'affouillement en pied de digue submergée avec une représentation 3D.



Figure 4. Essais sur revêtements rugueux, macro-rugueux et enrochement (Rip-Rap) avec représentation en 3D de l'affouillement pour une hauteur de déversement de 7 cm.

Schoklitsch (1932, 1935):

$$Fr_{s,cr} = \frac{0.235}{\sqrt{g}} \cdot (S-1)^{\frac{5}{3}} \cdot (\sin \alpha)^{-\frac{7}{6}}$$

Whittaker/Jäggi (~1990):

$$Fr_{s,cr} = 0.257 \cdot (S-1)^{\frac{5}{3}} \cdot (\sin \alpha)^{-\frac{7}{6}}$$

avec:

$$Fr_{s,cr} = \frac{q}{\sqrt{g \cdot d_s^3}} \quad \text{et} \quad d_s / 1.06 = d_{65}$$

Valeurs utilisées:

- $Fr_{s,cr}$: Froude critique [-]
- q : débit spécifique [m^2/s]
- $S = 2,65$ (densité spécifique des grains) [t/m^3]
- $\alpha = 1:2 = 26,57^\circ = 0,46$ rad (angle du talus de la digue) [$^\circ$]
- $P_c = 1,2$; $P_{cl} = 1,6$ coefficients [-]
- d_{65} : diamètres des blocs avec 65% d'éléments $< d$ (0,60 m) [m]
- φ : angle de frottement interne (30) [$^\circ$]
- σ : densité de l'eau = 1,0 [t/m]

Les calculs ci-dessus ont été réalisés pour des hauteurs déversées du modèle de respectivement: $h_{dév} = 0,05, 0,07$ et $0,10$ m.

Pour des blocs de diamètre $d_{65} = 60$ cm la valeur déterminante de la longueur du déversoir est, selon Whittaker/Jäggi, d'environ 50 m. Les résultats obtenus avec Schoklitsch semblent plus représentatifs de notre application (fig. 5) avec toutefois des valeurs d_{65crit} supérieures: a) pour $h_{dév}$ de 0,07 m, $q_{dév} = 0,032$ [m^2/s], $d_{65crit} = 65,5$ mm; b) pour $h_{dév}$ de 0,10 m, $q_{dév} = 0,061$ [m^2/s], $d_{65crit} = 103$ mm. Sur la base des ces calculs, nous estimons que la longueur du déversoir du prototype devrait se situer entre 60 et 65 m pour une lame d'eau déversée d'environ 1,0 m, et un débit spécifique déversé d'environ 2,0 [m^2/s]. Par rapport au Rhône en Valais (région Sion), cela correspond environ à la largeur du lit majeur.

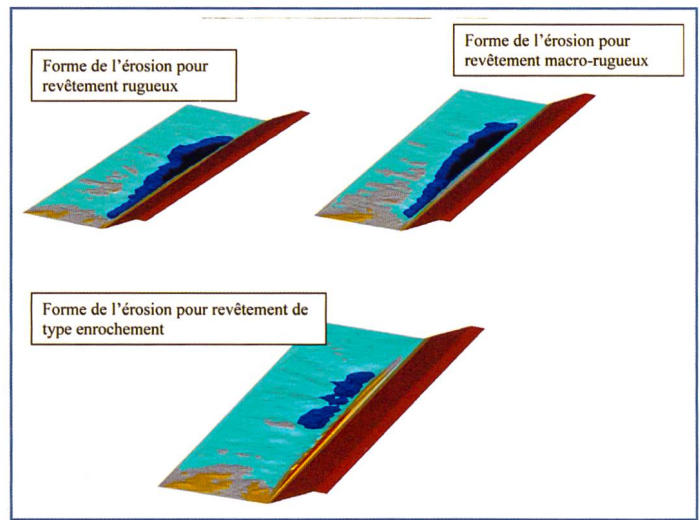
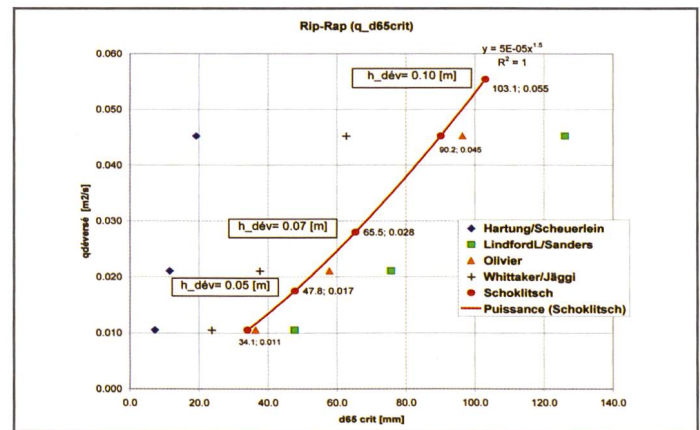


Figure 5. Relation entre le débit déversé $q_{dév}$ et le diamètre critique des blocs d_{65crit} pour différentes formules.



6. Ecoulement le long de la digue

6.1 Ecoulement sur la digue – calcul de l'énergie résiduelle

Le rôle principal du revêtement de la digue, hormis la protection de la digue elle-même, est de diminuer l'énergie de l'écoulement. En effet, l'augmentation de la vitesse le long du talus engendre une augmentation de l'énergie résiduelle qui risque de créer d'importants dégâts en pied de digue. Il est donc nécessaire de diminuer ce risque au maximum.

Afin de déterminer la perte de charge due au frottement de l'écoulement sur les différentes rugosités (lisse, rugueux, macro-rugueux, enrochement) deux méthodes ont été utilisées:

- le calcul pas-à-pas à partir de l'équation

fondamentale de la conservation de l'énergie,

- la modélisation numérique à l'aide du programme de calcul HEC-RAS.

6.2 Calcul de l'énergie résiduelle en pied de digue:

$$H_{AMONT} = z_1 + h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = H_{AVAL} = z_2 + h_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

$$= z_2 + h_2 + \frac{Q^2}{2g \cdot S_2^2} = z_2 + h_2 + \frac{Q^2}{2g \cdot (L \cdot h_2)^2}$$

La hauteur amont de l'écoulement est supposée égale à la hauteur critique de l'écoulement avec une charge amont correspondant à 1,5 fois la hauteur critique. Il est ainsi possible de déterminer la hauteur de l'écoulement à l'aval du plan incliné pour n'importe quelle géométrie de digue ou conditions hydrauliques (fig. 6).

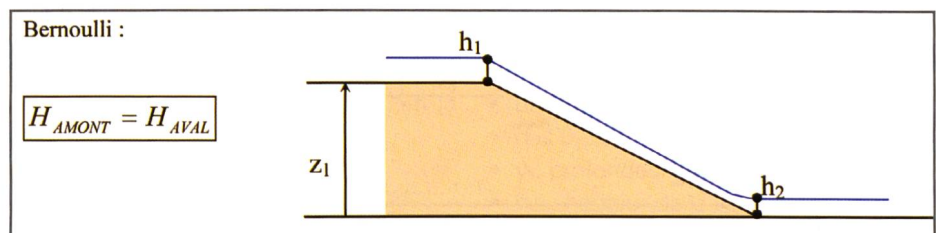


Figure 6. Schéma de la ligne d'eau le long de la digue.

Les hauteurs d'eau sur le plan incliné étant très faibles et la longueur déversée élevée, le rayon hydraulique R_h peut être considéré égal à la hauteur d'eau h . Quant au coefficient de rugosité (coefficient K_s de Strickler) il est calculé selon Müller avec la formule:

$$K_s = \frac{26}{d_{90}^{1/6}}$$

Type de revêtement	Valeurs de n	Valeurs de K_s
Enrochement	0.03846	26
Macro-rugueux	0.04545	22
Rugueux	0.0303	33
Lisse	0.010	100

6.3 Modélisation par HEC-RAS

Ce logiciel est spécialement conçu pour des pentes de fond relativement faibles, lorsque $d \approx y$. Lorsque la pente est plus forte ($d \neq y$) on introduira un troisième terme (h) pour le calcul de la section de l'écoulement avec (fig. 7):

$$h = y \cdot \cos^2 \alpha.$$

Pour analyser les comportements observés, nous avons fait une simulation numérique de l'écoulement sur le parement aval en utilisant le logiciel WS 77, conçu pour des écoulements lisses à forte pente. Après une détermination des lignes d'eau et d'énergie pour des hauteurs déversées de 0,05 et 0,07 m et une compa-

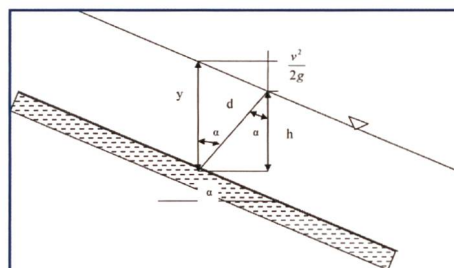


Figure 7. Détermination de la profondeur h .

Comparaison des résultats suivant les formules choisies								Valeurs expérimentales			Revêtements			
Veronese y_0+y_s	Martin y_0+y_s	EIVD/ligne d'eau y_0+y_s	EIVD/ligne d'énergie y_0+y_s	Schoklit sch y_0+y_s	Jaeger y_0+y_s	Eggenber ger y_0+y_s	Hartung y_0+y_s	$y_{s,max}$	y_0+y_s	y_0+y_s				
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]				
0.354	0.257	0.356	0.334	0.348	0.209	0.402	0.670	0.150	0.205	0.243	<u><i>rugueux</i></u> modèle 2 non stab.			
0.249	0.175	0.249	0.245	0.240	0.138	0.270	0.441				0.127	0.166	0.211	modèle 2 stabilisé
0.215	0.148	0.214	0.210	0.205	0.107	0.228	0.369							modèle 2 stabilisé
0.354	0.257	0.356	0.344	0.347	0.209	0.401	0.670	0.160	0.215	0.247	<u><i>macro-rugueux</i></u> modèle 2 non stab.			
0.249	0.175	0.249	0.246	0.240	0.138	0.270	0.441				0.140	0.190	0.210	modèle 2 stabilisé
0.213	0.148	0.212	0.212	0.204	0.115	0.225	0.365							modèle 2 stabilisé
0.360	0.259	0.362	0.341	0.353	0.174	0.418	0.689	0.115	0.143	0.240	<u><i>Riprap</i></u> modèle 2 non stab.			
0.253	0.176	0.252	0.240	0.243	0.112	0.279	0.451				0.110	0.187	0.206	modèle 2 stabilisé
0.210	0.147	0.209	0.206	0.201	0.130	0.216	0.355							modèle 2 stabilisé
avec d_{50}								avec d_{85}						
avec d_{50}														

Tableau 1. Comparaison des formules et application de la nouvelle formule empirique proposée.

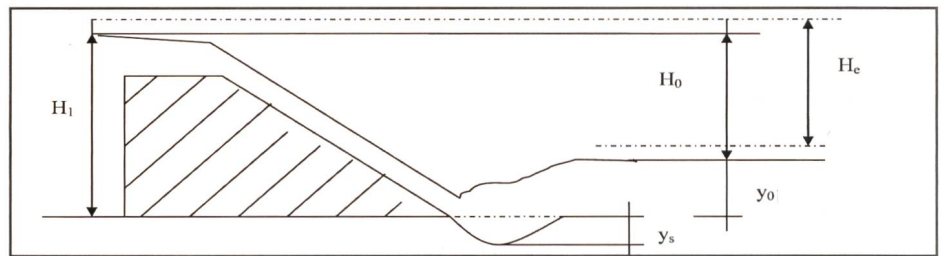


Figure 8. Schéma de l'affouillement en pied de digue.

raison avec les résultats obtenus par Hec-Ras a été faite. Suite à un calage sur le plan lisse, une corrélation a été appliquée aux autres types de revêtements.

Avec Hec-Ras le calcul des lignes d'eau et d'énergie, des valeurs de Froude, des vitesses, etc. a été entrepris pour les trois types de revêtements (rugueux, macro-rugueux et enrochement).

7. Estimation de l'érosion en pied de digue

7.1 Charge résiduelle en pied de digue

L'énergie de l'écoulement n'étant pas totalement annulée au bas du parement, il y a érosion des matériaux en pied de digue.

L'érosion en pied de digue est principalement dépendante de la charge résiduelle et du débit unitaire. Pour limiter l'érosion plusieurs possibilités sont envisageables, dont: a) augmenter les pertes de charges le long de la digue en modifiant la rugosité, ou en diminuant la pente du talus, b) diminuer le débit unitaire notamment au début de l'ouverture de la brèche, c) protéger le pied de digue contre l'affouillement. L'érosion (profondeur de l'affouillement) a été calculée et comparée aux valeurs expérimentales afin de déter-

miner le type de matériaux de substitution (fosse d'érosion), et pour connaître les effets d'un renforcement ou d'un bassin amortisseur en pied de digue.

7.2 Formules empiriques

De nombreuses théories, basées principalement sur des essais, ont été élaborées pour le calcul de l'érosion due à des jets ou à des déversements. Les calculs de l'énergie résiduelle en pied de digue sont basés sur les valeurs obtenues par simulation avec Hec-Ras (fig. 8).

Les formules suivantes ont été utilisées:

Shalash (1959):

$$y_s + y_0 = 9.65 \cdot H^{0.5} \cdot q^{0.6} \cdot d_{90}^{-0.4} \cdot \left(\frac{L_{min}}{L} \right)^{0.6}$$

Çatakli (1973):

$$y_s + y_0 = 1.6 \cdot H_1^{0.2} \cdot q^{0.6} \cdot d_{90}^{-0.1}$$

Schoklitsch (1932, 1935):

$$y_s + y_0 = 4.75 \cdot H^{0.2} \cdot q^{0.57} \cdot d_{90}^{-0.32}$$

Veronese (1937):

$$y_s + y_0 = 3.68 \cdot H^{0.225} \cdot q^{0.54} \cdot d_{50}^{-0.42}$$

q [m ² /s]	H_e [m]	L_{min} [m]	L [m]	$y_s + y_{0,e}$ [m]	expérimental [m]	gain [%]
enrochement						
0.061	0.335	0.503	1.000	0.241		
0.032	0.332	0.498	1.000	0.163	0.240	32.2%
0.025	0.348	0.522	1.000	0.145	0.206	29.4%
0.032	0.332	0.498	1.500	0.128	0.240	46.8%
0.025	0.348	0.522	1.500	0.114	0.206	44.6%
macro-rugueux						
0.032	0.371	0.557	1.000	0.184	0.247	25.5%
0.025	0.374	0.561	1.000	0.157	0.210	25.0%
0.032	0.371	0.557	1.500	0.144	0.247	41.6%
0.025	0.374	0.561	1.500	0.123	0.210	41.2%
rugueux						
0.032	0.364	0.546	1.000	0.180	0.243	25.9%
0.025	0.360	0.540	1.000	0.151	0.211	28.4%
0.032	0.364	0.546	1.500	0.141	0.243	41.9%
0.025	0.360	0.540	1.500	0.118	0.211	43.9%

Tableau 2. Application de la relation de Shalash (1959).

q [m ² /s]	H _{1e} [m]		ys+y _{0,e} [m]	expérimental [m]	gain [%]
enrochement					
0.061	0.747		0.217		
0.032	0.707		0.147	0.240	38.9%
0.025	0.694		0.124	0.206	39.9%
0.032	0.707		0.147	0.240	38.9%
0.025	0.694		0.124	0.206	39.9%
macro-rugueux					
0.032	0.708		0.147	0.247	40.6%
0.025	0.694		0.124	0.210	41.0%
0.032	0.708		0.147	0.247	40.6%
0.025	0.694		0.124	0.210	41.0%
rugueux					
0.032	0.707		0.147	0.243	39.7%
0.025	0.694		0.124	0.211	41.3%
0.032	0.707		0.147	0.243	39.7%
0.025	0.694		0.124	0.211	41.3%

Tableau 3. Application de la relation de Çatakli.

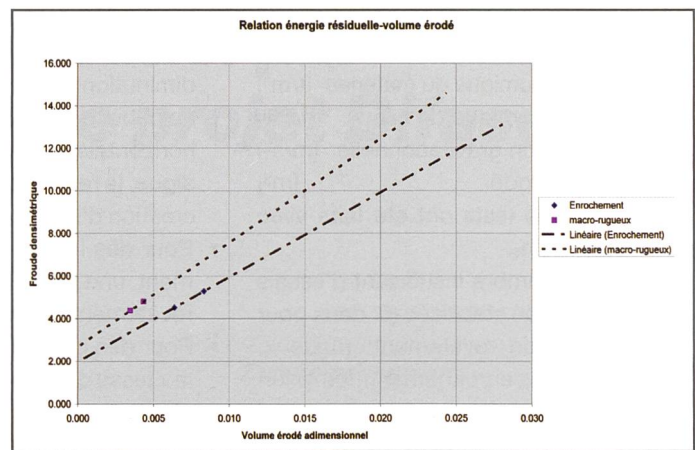


Figure 9. Relation entre l'énergie résiduelle et le volume érodé avec une granulométrie de la fosse d'érosion de 0/16.

Jaeger (1939):

$$y_s + y_0 = 6 \cdot H^{0.25} \cdot q^{0.5} \cdot \left(\frac{y_0}{d_{90}} \right)^{0.33}$$

Eggenberger (1944):

$$y_s + y_0 = 9.65 \cdot H^{0.5} \cdot q^{0.6} \cdot d_{90}^{-0.4}$$

Hartung (1957):

$$y_s + y_0 = 12.4 \cdot H^{0.36} \cdot q^{0.64} \cdot d_{85}^{-0.32}$$

Martin:

$$y_s + y_0 = 1.5 \cdot H^{0.1} \cdot q^{0.6}$$

Pour ces formules et selon les auteurs, la dimension caractéristique des grains d_{90} est prise en millimètres, les autres valeurs étant en mètres (tableau 1).

7.3 Nouvelle formule empirique proposée suite aux essais à l'EIVD

Sur la base des essais effectués dans le cadre de cette étude (valeurs expérimentales), nous avons comparé les résultats obtenus avec par les formules ci-dessus. Dans le cadre des conditions limites fixées par le projet, nous proposons une nouvelle relation qui répond mieux aux exigences spécifiques du projet et de ce type de digue.

$$y_{e,o} + y_s = 4.4 \cdot H_{e,o}^{0.21} \cdot q^{0.55} \cdot d_{90}^{-0.3}$$

Avec comme conditions limites à l'échelle du prototype:

- $0,15 < h_{déversé} < 1,5$ [m]
- $0,80 < q < 5,0$ [m²/s]
- H (hauteur de la digue) $< 10,0$ [m]
- $60 < d_{90} < 240$ [mm]
- h : hauteur d'eau déversée (modèle) [m]
- y_e : charge après le ressaut hydraulique [m]

- y_0 : hauteur d'eau après le ressaut hydraulique [m]
- y_s : profondeur de l'affouillement [m]
- q : débit spécifique déversé [m²/s]
- H_e : charge totale, avec y_e , ligne d'énergie [m]
- H_o : charge totale, avec y_0 , ligne d'eau [m]
- d_{90} : dimension des grains 90% [mm]

Remarques: les valeurs calculées pour la profondeur de l'affouillement en pied de digue avec la nouvelle formule EIVD (avec la ligne d'eau ou avec la ligne d'énergie) sont très proches des valeurs expérimentales observées. De plus, nous remarquons qu'avec la formule de Veronese, qui utilise d_{50} , et celle de Schoklitsch (d_{90}) nous obtenons des résultats également proches de nos valeurs expérimentales, ce qui confirme la robustesse de notre relation. Ainsi, avec cette nouvelle formule, nous étendons les possibilités de calculs avec d_{90} , H_o et H_e , y_0 et y_e .

7.4 Effets du renforcement en pied de digue par prolongation horizontale du revêtement et par bassin amortisseur

a) Prolongation horizontale du revêtement en pied de digue

En vue de réduire la profondeur de l'érosion en pied de digue, nous avons appliqué à notre système la relation de Shalash (renforcement du pied par prolongation horizontale du revêtement de la digue: théorie du jet horizontal). Les résultats montrent que nous pouvons obtenir une réduction de la profondeur d'érosion jusqu'à env. 47% pour une longueur de protection en pied de digue de 1,5m (à l'échelle du modèle). Cf. tableau 2.

$$y_s + y_0 = 9.65 \cdot H^{0.5} \cdot q^{0.6} \cdot d_{90}^{-0.4} \cdot \left(\frac{L_{\min}}{L} \right)^{0.6}$$

avec: $L_{\min} = 1,5 H$, $d_{90} = 14$ [mm]

b) Bassin amortisseur

Pour ce cas, nous avons testé la relation de Çatakli (1973) qui nous donne, avec l'aménagement d'un bassin amortisseur, une réduction de l'érosion jusqu'à 41% dans la zone de contact eau / digue. Au-delà, en fonction de la profondeur du bassin, l'érosion est entièrement supprimée. Cf. tableau 3.

$$y_s + y_0 = 1.6 \cdot H_1^{0.2} \cdot q^{0.6} \cdot d_{90}^{-0.1}$$

Selon Novak (1961) la réduction de l'érosion dans la zone de contact eau / digue peut varier de 45 à 65%.

8. Relation empirique entre l'énergie résiduelle en pied de digue et le volume érodé

Sur la base des expériences faites à l'EIVD, nous avons établi une relation adimensionnelle entre l'énergie résiduelle en pied de digue et le volume érodé pour les revêtements de type enrochement et macro-rugosité, en utilisant un nombre de Froude densimétrique et un volume d'affouillement adimensionnel:

avec:

$$F_* = \frac{u}{\sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) \cdot g \cdot d_{50}}} \quad [-]$$

et

$$V_* = \frac{H_e \cdot \rho_{eau} \cdot g \cdot h_{o,e}^2 \cdot b}{(\rho_s - \rho_{eau}) \cdot V_{érodé} \cdot g \cdot y_s} \quad [-]$$

- u : vitesse en pied de digue [m/s]
- d_{50} : 0,0045 [m]
- y_s : profondeur de l'affouillement [m]
- $h_{o,e}$: hauteur de la ligne d'eau, resp. ligne d'énergie en pied de digue [m]
- b : largeur de déversement [m]

- H_e : hauteur résiduelle en pied de digue [m]
- ρ_s : masse volumique du matériau [t/m³]
- ρ : masse volumique de l'eau [t/m³]
- g : accélération gravitationnelle [m/s²]
- ∇ : volume érodé [m³]

D'autres tests ont été faits avec F_e et d_{50}/h_o .

Vu le nombre insuffisant d'essais avec une érosion stabilisée (6: deux pour chaque type de revêtement: rugueux, macro-rugueux, enrochement), les résultats obtenus (fig. 9) ne sont aujourd'hui pas suffisamment fiables, raison pour laquelle nous les donnons uniquement à titre indicatif. Une augmentation du nombre d'essais stabilisés consoliderait ces premières impressions.

9. Recommandations finales et conclusion

Sur la base des résultats expérimentaux, un certain nombre de recommandations peuvent être faites:

- La crête, en dessous de l'élément fusible, sera protégée (empierrement, couche de béton, etc.) et rendue étanche afin d'éviter des risques d'infiltration.
- Des précautions particulières seront prises pour l'exécution de la tête du fusible, tout particulièrement aux bords d'attaque à l'amont du déversoir, ainsi qu'au bord de fuite à l'aval pour lutter contre les phénomènes de sous-pression et d'érosion lors des débordements.
- Le cœur de digue sera également étanche sur toute la hauteur pour éviter les phénomènes d'infiltration et les risques de renard en pied de digue, côté aval.
- Le pied de digue côté aval sera de préférence drainé sur son tiers inférieur afin d'éviter des risques d'effondrement et des phénomènes de renard.
- Le choix de la surface de protection du parement aval tiendra compte de la hauteur de la surverse et de la pente de la digue. Ainsi un débit unitaire maximum sera calculé.
- Une préférence sera donnée à des hauteurs de déversement faibles, proches de 1 m voire inférieures et à des longueurs de déversement égales à environ 1 à 1,5 x la largeur du cours d'eau.
- L'érosion en pied de digue est principalement dépendante de la charge de l'écoulement et du débit unitaire. Pour limiter l'érosion, plusieurs possibilités sont envisageables, dont: l'augmentation des pertes de charges le long de la digue par modification de

la rugosité du revêtement du parement aval; la réduction de la pente du talus; la diminution du débit unitaire notamment au début de la surverse; la prolongation horizontale du revêtement en pied de digue, le renforcement par des blocs, la création d'un bassin amortisseur etc.

- Pour des faibles hauteurs de déversement, une préférence sera donnée à un revêtement de type enrochement.
- Pour des grandes hauteurs d'ouvrage, la vitesse d'écoulement sera plus élevée et les risques d'érosion augmentés. Les mesures de renforcement seront complétées par des dispositifs de dissipation d'énergie dimensionnés en fonction de l'importance du risque.
- Pour des hauteurs de déversement (prototype) supérieures à 1,0 m, l'implantation de macro-rugosités (blocs de béton de formes diverses) peut s'avérer nécessaire. La dimension des éléments et leur écartement dépendront des volumes déversés et de la hauteur de la digue.
- En pied de digue, une zone de réception des eaux sera spécialement aménagée. Sa longueur sera d'environ 1,1 x la longueur du fusible et sa largeur dépendra de la hauteur de la lame déversante. Cette zone sera, par exemple, comblée jusqu'à environ 2.0 m de profondeur par de la grave II (0/100 mm) ou grave I (0/63 mm) compactée en couches d'au moins 0,3 m. La protection du pied de digue par des gros blocs, par prolongation horizontale du revêtement (cf. 7.4.a) ou autres mesures bien connues est évidemment envisageable. Ces aménagements n'ont pas été développés ici puisque l'aspect environnemental était prépondérant pour cette étude.
- Le système d'évacuation des eaux est fortement dépendant de la topographie et de la géologie du site concerné. Nous ne pouvons, à ce stade de l'étude, donner seulement quelques recommandations générales, le choix définitif, lié aux conditions locales spécifiques du projet, est laissé à l'ingénieur du projet. Toutefois, il nous paraît intéressant de créer une zone de rétention au moyen de contre-digues, puis de relâcher les eaux après abaissement du niveau d'eau dans le cours d'eau. Cette rétention artificielle, sous forme de lac ou d'étang (bassin amortisseur) est intéressante du point de vue environnemental et demeure un très bon destructeur d'énergie en pied de digue (cf. 7.4.b)

Yverdon, le 28.2.2005

Bibliographie

- Dr. J.-L. Boillat, Hydraulique II et réseaux d'assainissement – cours EPFL [1999].
- E. Bollaert, Prof. Dr. A. Schleiss, Transient water pressures in joint and formation of rock scour due to high-velocity jet impact – EPFL – LCH – [2002].
- G.J.C.M. Breusers et H.J. Randkivi, Scouring – IAHR – A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield [1991].
- M. Carlier, Hydraulique générale et appliquée – Editions Eyrolles, Paris [1980].
- Ven Te Chow, Open-channel hydraulics – McGraw-Hill International Editions [1973].
- Braja M. Das, Advanced Soil Mechanics – Editions Taylor & Francis, Washington [1997].
- Soleyman Emami, Prof. Dr. A. Schleiss, Erosion protection downstream of diversion tunnels using concrete prisms Design criteria based on a systematic physical model study – EPFL – LCH [2004].
- Walter H. Graf et M.S. Altinakar, Hydraulique fluviale – Traité de Génie civil de l'EPFL, tomes 1 et 2 – Presses polytechniques et universitaires romandes [1993].
- W. H. Hager, Wastewater hydraulics – Editions Springer [1999].
- G.J.C.M. Hoffmans and H.J. Verkeij, Scour Manual IAHR – A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield – [1997].
- Dr. M. Jäggi, Flussbau – ETHZ Abt. II, VIII und XC [1995].
- A. Lencastre, Manuel d'hydraulique générale – Eyrolles/Paris [1966].
- P. Manso, Prof. Dr. A. Schleiss, Stability of lining by concrete elements for surface protection of overflow earthfill dams – EPFL – LCH [2004].
- OFEG, Protection contre les crues des cours d'eau – directives [2001].
- H. Scheuerlein, Die Wasserentnahme aus geschiebeführenden Flüssen Editions Ernst & Sohn, Berlin [1984].
- Prof. Dr. A. Schleiss, Aménagements hydrauliques – cours EPFL [2004].

Adresse de l'auteur

Prof. Jacques Bonvin

Ecole d'Ingénieurs du Canton de Vaud

Département EC + G

1401 Yverdon-les-Bains

+41-79-220 71 51

www.eivd.ch

jacques.bonvin@eivd.ch