

Protection des rives en courbe avec des épis submersibles, essais sur modèle physique

Autor(en): **Calderon, Rosa Maria Leon Armas / Heller, Philippe / Scheiss, Anton**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **96 (2004)**

Heft 9-10

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-939593>

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.

Protection des rives en courbe avec des épis submersibles, essais sur modèle physique

■ Rosa María León Armas Calderón, Philippe Heller, Anton Schleiss

Résumé

Afin de prévenir l'érosion des rives des cours d'eau tout en respectant les fonctions écologiques de ces derniers, les épis sont fréquemment utilisés. Toutefois il existe à ce jour peu de méthodes objectives qui permettent leur dimensionnement, notamment dans le cas d'épis submergés lorsque la rivière présente des courbes importantes. Le travail expérimental présenté ci-dessous tend à contribuer à une meilleure compréhension du comportement hydraulique des épis. Une approche systématique cherche à déduire des critères de dimensionnement. Cette étude est effectuée pour quatre débits différents correspondant à des degrés de submersion des épis compris entre 50% et 115%. Elle utilise des épis similaires à ceux développés pour la Thur (canton de Zurich). Elle considère, comme variables d'étude, l'orientation de ces derniers selon l'axe de la rivière ainsi que leur écartement successif.

Pour les cas étudiés, les essais montrent que les épis inclinés vers l'aval ou perpendiculaires à l'axe de l'écoulement offrent une meilleure protection des rives que ceux inclinés vers l'amont. Cette protection des rives entre les épis est cependant garantie pour autant que le niveau d'eau ne submerge pas complètement la crête de l'épi. Par ailleurs la mesure des affouillements entre les épis permet de constater que les meilleures prévisions sont obtenues avec les formules de Hoffmans (1995), Liu (1961) et Ahmad (1953) [1].

Zusammenfassung:

Modellversuche mit überströmbaren Buhnen als Uferschutz in Flusskurven

Nicht zuletzt wegen ihrer gewässerökologischen Vorteile werden Buhnen oft als Uferschutz in Flusskurven eingesetzt. Bis heute existieren kaum allgemein anwendbare Dimensionierungsmethoden, insbesondere was überströmte Buhnen in Flusskurven anbelangt. Die im Artikel beschriebene experimentelle Studie möchte diesbezüglich einen Beitrag leisten, indem mit systematischen Modellversuchen einige Dimensionierungsregeln verdeutlicht werden. Die Studie wurde am Beispiel der an der Thur entwickelten und eingesetzten Buhnen durchgeführt, wobei Abflüsse mit einem Überströmungsgrad zwischen 50% und 115% untersucht wurden. Als Parameter wurden die Neigung und die Abstände der Buhnen betrachtet.

Die Versuche zeigen, dass in Fliessrichtung geneigte oder zur Flussachse senkrechte Buhnen für die untersuchten Fälle einen besseren Uferschutz gewährleisten als gegen die Fliessrichtung geneigte. Der Schutz der unbefestigten Ufer zwischen den Buhnen ist allerdings nur garantiert, solange die Wurzel der Buhne nicht vollständig überströmt ist. Die Kolkmessungen zwischen den Buhnen zeigen, dass diese am besten mit den Formeln von Hoffmans (1995), Liu (1961) und Ahmad (1953) vorausgesagt werden können [1].

garantir, en débit d'étiage, une profondeur d'eau suffisante ainsi que le maintien du transport solide.

Sur le plan écologique, l'implantation d'épis comme moyen de protection des rives constitue une amélioration de la qualité du cours d'eau. Ils contribuent, selon Schager et Peter [2], à la variation de la morphologie de la rivière et favorisent ainsi, comme le montrent Gore [3] et Shields et al. [4], la formation d'habitats pour les poissons. D'après Becker A. et Rey P. (2003) [5], les régions situées autour ainsi que entre les épis constituent un habitat privilégié des poissons. Les petits poissons préfèrent l'espace situé entre les épis très proche des rives et des bancs de graviers. Les poissons de taille moyenne occupent quant à eux l'espace adjacent, toujours situé entre les épis, où le courant est cependant plus important. Les grands poissons disposent librement du « talweg » qui se forme devant la tête des épis. A l'opposé, sur les tronçons rectilignes non aménagés où le courant est presque uniforme, les habitats pour les poissons sont quasiment inexistantes.

Sur le plan architectural, les épis submergés présentent la caractéristique d'être visuellement peu présents. La plus grande partie est effectivement soit submergée, soit enterrée dans le lit majeur. Par ailleurs, pour les rivières essentiellement rectilignes, l'implantation d'épis offre l'avantage de casser quelque peu l'aspect artificiel en créant une impression de courbures.

Les épis sont caractérisés, selon Przedwojsky et al. [6] et Schleiss [7], par les paramètres suivants: orientation par rapport à l'axe de la rivière, écartement successif, degré de submersion selon le débit de la rivière, perméabilité et rugosité, longueur et forme générale des épis. La rivière, quant à elle, est caractérisée par sa pente, sa largeur (lit mineur et lit majeur) ainsi que sa granulométrie. Son régime d'écoulement, déduit directement de la pente, influence de façon importante l'écoulement autour des épis.

Pour quatre débits correspondant à quatre degrés de submersion des épis, cette étude analyse l'érosion produite sur le lit et sur les rives du modèle. Quatre séries d'essais avec des orientations et des écartements différents ont généré les résultats nécessaires

1. Introduction

Dans un milieu où l'aménagement du territoire est fortement organisé, l'espace concédé aux rivières est devenu très exigu. C'est pourquoi ces dernières ont été, depuis plus d'un siècle, fortement canalisées avec pour conséquence un accroissement des vitesses d'écoulement et donc une augmentation de l'érosion. Cette érosion est particulièrement sensible dans les courbes. Elle tend, d'une part, à créer des dépôts importants à l'intérieur des courbes et, d'autre part, à

mettre en danger la stabilité des rives extérieures, notamment lors du passage des crues. C'est pourquoi des mesures constructives lourdes, enrochements ou murs de protection, sont souvent mises en place. Cependant, devant les coûts importants de ces dernières ainsi qu'à cause de leurs impacts négatifs, tant visuel qu'écologiques, d'autres méthodes ont été développées. Les épis sont justement de celles-ci. Parallèlement à leur fonction hydraulique principale de protection des rives, les épis permettent également de



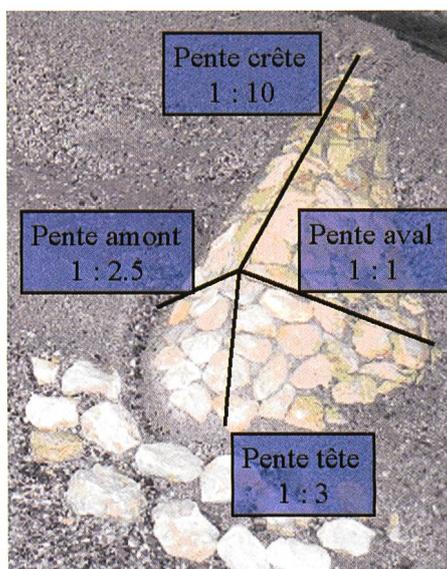


Figure 1. Géométrie des épis utilisés, développés pour la Thur, type F.

pour formuler quelques critères de dimensionnement.

2. Description des essais

2.1 Description de l'installation

Le canal utilisé est formé d'un premier segment droit de 7,5 m de longueur, suivi d'un segment courbe et terminé par un second segment droit de 6 m de longueur. La partie courbe présente un angle de 90° avec un rayon R de 6 m. Le canal mesure constamment 1 m de largeur.

La pompe avec les conduites idoines a une capacité globale de 125 l/s, ce qui représente une valeur largement supérieure aux débits utilisés. La précision de la mesure vaut ± 1 l/s.

L'alimentation en sable, pour maintenir le lit dans un état d'équilibre dynamique, est estimée par la formule de transport total de Graf et Acaroglu [8]. Par ailleurs pour s'assurer de l'obtention d'un état uniforme, les mesures du niveau d'eau ne sont prises qu'au-delà d'un segment initial correspondant à deux fois la largeur, soit environ 2 m après le début du canal.

Le lit est constitué de sable «Sagrave» dont le diamètre moyen des grains (d_m) vaut 0,75 mm. Il a une épaisseur d'environ 15 cm et suit une pente J de 0,4%. Cette géométrie initiale est reconstituée au début de chaque série d'essais. La rive, dont la base mesure 20 cm pour une hauteur de 8 cm, a été construite avec le même sable et possède une section de trapèze rectangle.

2.2 Description des épis

Les épis utilisés ont une forme identique à ceux construits pour la Thur dans le canton de Zürich (type F). La pente de la face latérale

amont est de 1:2,5 et celle de la face latérale aval de 1:1. Longitudinalement, la pente de la crête vaut 1:10. La pente plongeante de la tête vaut, quant à elle, 1:3. A la différence des épis de la Thur construits avec des blocs superposés, ceux élaborés pour les essais sont constitués de béton recouvert par une couche de graviers concassés. S'ils présentent une rugosité similaire au prototype, ils en perdent néanmoins la perméabilité ainsi que la capacité de déformation plastique sur une fondation mouvante. Afin de leur restituer partiellement cette qualité, dès la seconde série d'essais, le sable sous la fondation est renforcé par un rang de blocs d'un diamètre de 4-5 cm environ.

Les épis du modèle ont une longueur de 40 cm. Ils ont été dimensionnés de sorte à ce que le rapport «longueur utile des épis sur largeur du canal» vaille 25%. La figure 1 illustre la géométrie complète. En comparaison, les épis de la Thur ont une longueur utile de 8 m pour un lit mineur de 50 m. Le rapport «longueur utile des épis sur largeur du lit» vaut ainsi 16%. Le modèle ne représente donc approximativement que la moitié extérieure de la largeur d'une courbe typique de la Thur.

2.3 Description des quatre configurations

La forme et la taille des épis de même que la granulométrie du substrat et la pente initiale du lit sont fixées pour toute la durée des essais. Les variables se limitent à l'orientation φ et l'écartement L entre les épis. L'étude de différentes orientations par rapport à celle de différents écartements a toutefois été privilégiée. Les principaux critères d'évaluation sont les affouillements du lit et la stabilité de la rive en fonction de quatre débits prédéfinis.

Au total trois orientations φ sont étudiées avec les angles suivants: 105° , 75° et 90° dans le tronçon courbe, respectivement 100° , 80° et 90° dans les tronçons droits. L'angle est formé par le croisement des axes de la rivière et de l'épi, mesuré côté amont. Pratiquement, il y a eu deux séries d'essais avec les épis orientés vers l'amont (1^{re} et 2^e série, 105° en courbe et 100° en droite), puis une série orientée vers l'aval (3^e série, 75° et 80°) et enfin une dernière série perpendiculaire à l'axe de l'écoulement (4^e série, 90° et 90°).

Sur la base de recherches théoriques et des valeurs utilisées dans la pratique, des écartements de 80 cm pour les tronçons droits et de 60 cm pour le tronçon courbe sont appliqués pour la 1^{re}, la 3^e et la 4^e séries d'essais. Ces écartements correspondent, en droite, à 4 fois la longueur utile des épis b ($L/b = 4$) et 3 fois en courbe ($L/b = 3$). Lors la 2^e série d'essais, les épis sont rapprochés dans le tronçon courbe jusqu'à une valeur de 40 cm ($L/b = 2$). La transition entre droite et courbe a été faite de manière progressive.

Les trois premiers débits choisis (10, 15 et 20 l/s) pour chaque série d'essais correspondent à un degré de submersion d'environ 50%, 65% et 80%. Le quatrième débit (45 l/s, submersion de 115%) couvre complètement les épis, le plan d'eau dans ce cas se trouve à environ 1 cm au-dessus de la crête des épis. Pour la 4^e configuration, un débit intermédiaire de 30 l/s est également testé. Il correspond à un degré de submersion de 100% exactement.

A ces quatre configurations, une série préliminaire de deux essais sans épi est effectuée avec des débits de 10 l/s et 15 l/s. Le tableau 1 synthétise l'ensemble des essais.

Chaque essai dure 1h15 ce qui correspond au temps nécessaire pour atteindre

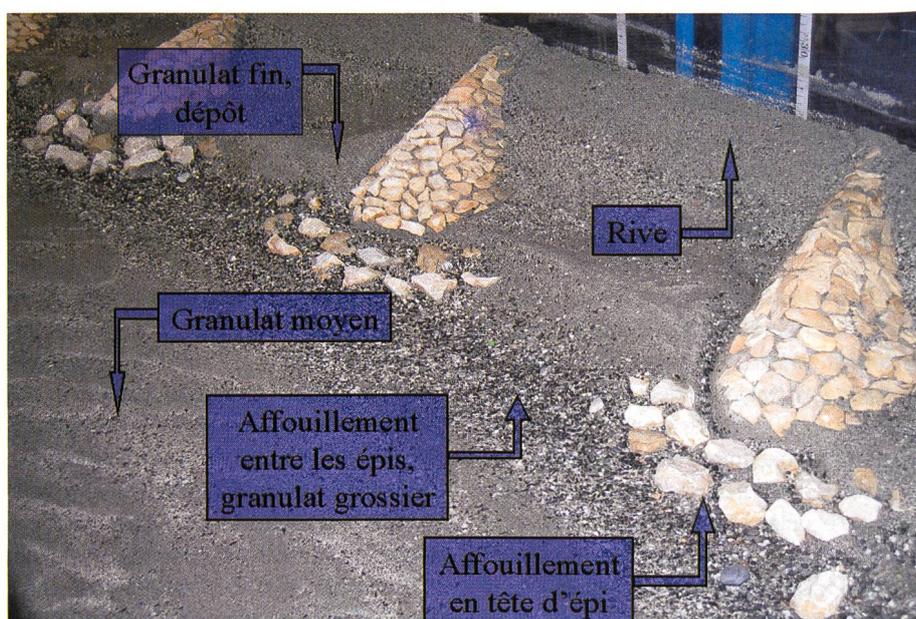


Figure 2. Visualisation des résultats des essais.

l'état d'équilibre du lit, augmenté d'environ quinze minutes.

3. Résultats

Les résultats relevés permettent de distinguer sept aspects différents: formation d'affouillements, comparaison de ceux-ci avec des formules d'estimation, estimation de la rugosité, formation de dépôts entre les épis, cisaillement des rives, distribution du substrat sur le lit et finalement vitesses d'écoulement. La figure 2 situe quelques-uns de ces résultats.

3.1 Formation des affouillements

La formation d'affouillements est une des principales conséquences de la construction d'épis. Ils se forment très rapidement sur un lit parfaitement uniforme et sont présents même avec des débits faibles.

Dans la succession d'épis, deux zones se distinguent clairement par des affouillements (cf. figure 2). La première se situe entre les épis, sur une ligne de courant qui passe juste devant les épis. Elle a une forme plutôt allongée. La seconde se situe à la tête même des épis avec une forme qui suit la fondation de ces derniers. Les affouillements sont définis comme la différence entre le niveau de fond moyen et le niveau correspondant au point le plus profond de la fosse. Le niveau de fond moyen est calculé à partir des mesures effectuées sur la section transversale du canal à l'endroit de la fosse.

Les mesures d'affouillement en tête d'épi après le passage d'un débit de 20 l/s (submersion des épis de 80%) montrent clairement une augmentation des affouillements en courbe par rapport à ceux en droite. Les affouillements maximaux sont situés au milieu de la courbe. D'autre part, la profondeur des affouillements formés lorsque les épis sont inclinés vers l'amont (7,2 cm au milieu de la courbe) est beaucoup plus grande que dans le cas des épis inclinés vers l'aval (3,85 cm) ou perpendiculairement à l'axe (3,74 cm). La figure 3 synthétise ces résultats. Il convient toutefois de modérer cette constatation. La fondation des épis, renforcée dès la 2^e série d'essais par un rang supplémentaire de graviers, est probablement responsable d'une grande partie de la réduction de ces affouillements. Aucune des mesures effectuées ne permet de séparer ces deux causes.

Dans la deuxième série d'essais un cinquième débit de 10 l/s (submersion des épis de 50%), succédant à l'essai de 45 l/s (submersion des épis de 115%), a simulé le retour à un niveau normal après une crue. Les affouillements maximaux formés en tête d'épis lors du passage de la crue (7,57 cm au milieu de la courbe à 45 l/s) sont largement recouverts pendant l'essai suivant (2,66 cm au

Débit, l/s	Submersion des épis, %	Configuration 0		Configuration 1		Configuration 2		Configuration 3		Configuration 4	
		en droite L = / φ = /	en courbe L = / φ = /	en droite L = 80 φ = 100°	en courbe L = 60 φ = 105°	en droite L = 80 φ = 100°	en courbe L = 40 φ = 105°	en droite L = 80 φ = 80°	en courbe L = 60 φ = 75°	en droite L = 80 φ = 90°	en courbe L = 60 φ = 90°
10	50		x		x		x		x		x
15	65		x		x		x		x		x
20	80				x		x		x		x
30	100						x				x
45	115				x		x		x		x
10	50						x				x

Tableau 1. Résumé des essais effectués.

	Amont de la courbe	Début de la courbe	Milieu de la courbe	Fin de la courbe	Aval de la courbe	Résumé	
						en droite	en courbe
Ahmad, K_A	1,07	1,16	1,15	1,17	1,07	1,07	1,16
Liu, K_L	0,79	0,91	0,90	0,92	0,78	0,79	0,91
Dietz, ω	7,80	9,10	8,85	9,15	7,90	7,85	9,00
Hoffmans, K_B	0,89	1,05	1,05	1,07	0,91	1,06	0,90

formules qui donnent les meilleurs résultats

Tableau 2. Coefficients de calages des formules d'affouillements.

même point). Le plus important lors d'une crue est donc uniquement de garantir la stabilité de l'ouvrage tandis que les affouillements sont ensuite naturellement recouverts.

3.2 Estimation des affouillements

Lors de la construction d'épis, il est capital de pouvoir estimer la profondeur des affouillements afin de poser l'ouvrage sur une fondation durable. Les formules que donne la littérature sont nombreuses. Elles ne sont cependant strictement applicables qu'aux affouillements formés entre les épis et non à ceux formés à la tête de ces derniers. Dans le cadre de ce travail, quatre formules sont comparées aux résultats mesurés: Ahmad (1953), Liu (1961), Dietz (1969) et Hoffmans (1995) [1].

Ahmad (1953)

$$y_{m,e} + h_0 = K_A K'_A (q/1 - m)^{2/3} \quad (1)$$

Liu et al. (1961)

$$y_{m,e} = K_L h_0 (b/h_0)^{0.4} F_r^{1/3} \quad (2)$$

Dietz (1969)

$$y_{m,e} + h_0 = \omega q/U_c \quad (3)$$

Hoffmans (1995)

$$y_{m,e} = h_0 \left((1 - m)^{-2/3} - 1 \right) + K_B b \tanh(h_0/b) \quad (4)$$

avec :

- $y_{m,e}$ profondeur de l'affouillement
- h_0 profondeur moyenne à l'amont de l'épi
- K_A facteur de correction pour la formule de Ahmad
- K'_A $2,14 \cdot g^{-1/3}$
- q débit unitaire
- m rapport longueur utile de l'épi sur largeur de la rivière, b/B
- K_L facteur de correction pour la formule de Liu
- ω facteur de correction dû à la turbulence pour la formule de Dietz
- U_c vitesse critique
- K_B facteur de correction pour la formule de Hoffmans

Les formules qui donnent les meilleures approximations sont celles de Hoffmans, Liu et Ahmad (cf. figures 4 et 5). Bien que la formule de Dietz tient également compte de la granulométrie du substrat, elle ne produit pas, dans ce cas-ci, de meilleurs résultats.

Le tableau 2 donne les valeurs des coefficients qui approchent le mieux les mesures. Les figures 4 et 5 illustrent les deux meilleures estimations trouvées pour les affouillements mesurés au milieu et à la fin de la courbe.

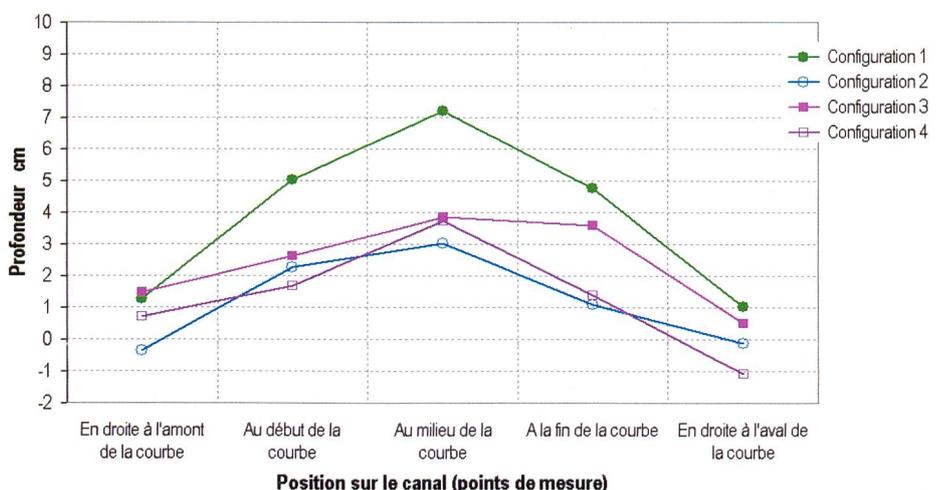


Figure 3. Affouillements en tête des épis selon les configurations pour un débit de 20 l/s.

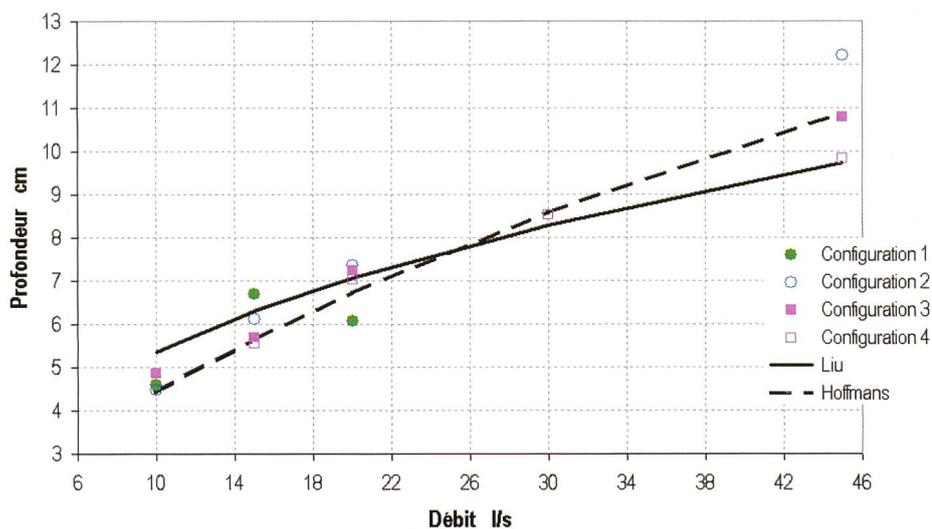


Figure 4. Estimation des affouillements, entre les épis, au milieu de la courbe.

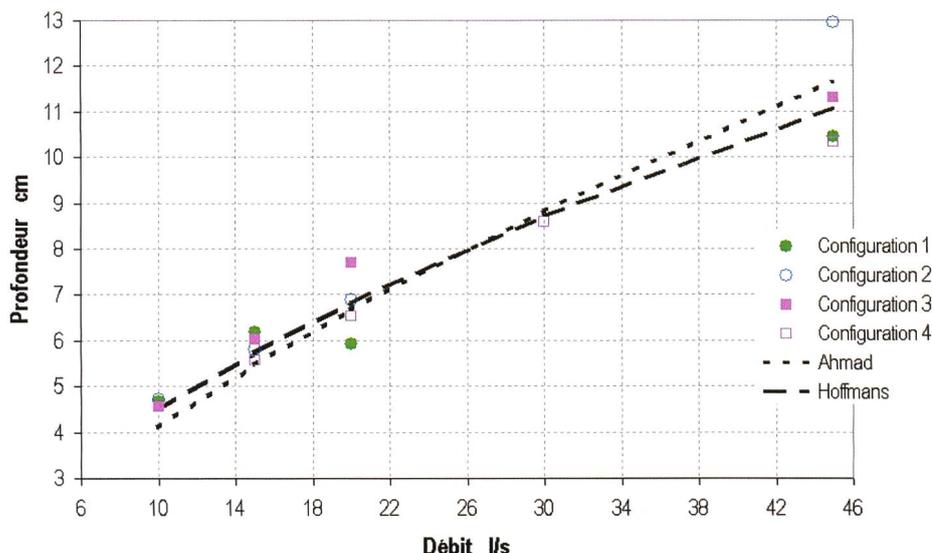


Figure 5. Estimation des affouillements, entre les épis, à la fin de la courbe.

Une comparaison des affouillements mesurés entre les épis à ceux mesurés à la tête des épis ne permet pas de donner une relation précise entre eux. Les écarts sont variables. Le rapport est parfois positif et d'autres fois négatif. Au mieux, cette comparaison montre que les différents affouillements sont du même ordre de grandeur. Ainsi les formules utilisées permettent-elles uniquement une estimation grossière de la profondeur à laquelle l'épi doit être fondé.

3.3 Estimation de la rugosité

Afin de donner une estimation de la rugosité additionnelle générée par les épis, la relation de Manning-Strickler est appliquée. La rugosité équivalente est composée à partir de la rugosité du fond, de la rugosité de la paroi intérieure du canal et de la rugosité due aux épis (paroi extérieure du canal). La rugosité du fond K est calculée par la formule (5) [7].

$$K = \frac{21.1}{(d_{90})^{1/6}} \quad (5)$$

On obtient ainsi pour le fond une rugosité de 57. La rugosité de la paroi intérieure est fixée arbitrairement à 80, puisqu'il s'agit de la paroi lisse du canal d'essai. La rugosité des épis est alors calculée selon leurs orientations. Le tableau 3 résume ces valeurs moyennées sur l'ensemble des débits.

3.4 Formation de dépôts entre les épis

L'accumulation de dépôts entre les épis est, pour le lit de la rivière, une autre conséquence majeure due à la construction des épis. Ces dépôts contribuent positivement à la variation de la morphologie du lit et sont bénéfiques d'un point de vue écologique pour autant qu'ils ne soient pas trop abondants. Lorsque le transport solide est plus grand que la capacité de transport, les dépôts entre les épis deviennent trop importants et peuvent, à la rigueur, recouvrir complètement les épis. La figure 6 présente ce résultat.

Les dépôts forment en droite des lentilles allongées tandis qu'en courbe ils for-

ment plutôt un triangle ou un T renversé. La figure 7 montre un tel dépôt obtenu en courbe. Le sommet de ces dépôts se trouve généralement juste à l'amont de l'épi. Les dépôts, au fil de l'essai, se déplacent en direction de la rive. Avec un fort débit (45 l/s, submersion des épis de 115%), ils sont érodés et disparaissent complètement.

Les observations faites pendant les essais ont permis de constater une corrélation entre la formation d'un tourbillon situé entre les épis et la position des dépôts relevée après l'essai. Aucune mesure quantitative n'a cependant été faite à ce sujet.

3.5 Cisaillement des rives

Les observations ont tout d'abord validé les épis comme ouvrage de protection des rives à l'aide d'une série préliminaire de deux essais sans épi. Ces deux essais montrent clairement que la rive du canal est fortement atteinte pour un débit de 10 l/s (hauteur d'eau d'environ 2 cm) et totalement détruite pour un débit de 15 l/s. Cette observation est valable pour la rive droite comme pour la rive courbe. Le calcul théorique par le diagramme de Shields-Yalin [8] montre que, pour une hauteur d'eau de 2 cm et avec le sable «Sagrave» considéré, la tension adimensionnelle de frottement τ sur les rives est déjà supérieure à la tension critique.

Dans la première série d'essais, avec les épis orientés vers l'amont, les rives commencent d'être sérieusement atteintes au milieu de la courbe dès un débit de 15 l/s (submersion des épis de 65%) et sont complètement détruites au passage des 45 l/s (submersion des épis de 115%). Cette destruction, même pour un petit débit, s'explique par la présence d'une onde qui oscille perpendiculairement à l'axe du canal. La variation régulière du plan d'eau entre les épis attaque ainsi la rive qui prend une forme semi-circulaire concave de plus en plus marquée au fil de l'essai. La figure 8 illustre ce résultat. Finalement l'eau atteint la paroi du canal ce qui marque la fin de la mesure. Dans les tronçons droits les dommages sont beaucoup plus faibles. Les oscillations sont également inexistantes.

Le rapprochement des épis en courbe (2^e série d'essais) n'améliore pas significativement les résultats précédents.

Configuration des épis	Coefficient de rugosité moyen K_s
Configuration 1	26
Configuration 2	21
Configuration 3	22
Configuration 4	36

Tableau 3. Rugosité équivalente selon Strickler des épis, selon les configurations.

Dans la troisième série, avec les épis orientés vers l'aval, les rives en droite et en courbe sont complètement protégées pour les trois premiers débits (10, 15 et 20 l/s). Avec le passage de 45 l/s (submersion des épis de 115%) les rives au milieu de la courbe sont complètement détruites. En droite les rives ne sont toutefois que partiellement endommagées. Les oscillations, relevées lors de la première série, sont également absentes. La destruction en courbe s'explique par le courant de submersion qui est rejeté par la crête de l'épi contre la rive. Une modification de la forme de l'épi serait donc nécessaire pour cette configuration. Dans le cas d'épis orientés vers l'amont (1^{re} série) ce courant est rejeté naturellement contre la rivière.

Dans la quatrième série, avec les épis perpendiculaires, les rives restent totalement intactes pour les débits de 10, 15, 20 et 30 l/s (submersion des épis de 50, 65, 80 et 100%) c'est à dire tant que les épis restent, au plus, juste submergés. Avec le passage de 45 l/s (submersion de 115%), les rives au milieu de la courbe sont complètement détruites. Cette destruction massive et soudaine, présente surtout dans les troisième et quatrième séries, peut s'expliquer par une tension superficielle de frottement accrue. Le courant de submersion, sans être directement agressif, n'est pas positivement dirigé vers la rivière. Cette submersion peut cependant aussi être le fruit d'un effet de bord. Dans le modèle testé, la queue des épis se termine contre la paroi du canal sans être suffisamment enterrée. Avec le passage d'un débit qui submerge totalement l'épi, un écoulement parasite se produit entre celui-ci et la paroi. Dès lors la rive est doublement attaquée ce qui peut expliquer sa rupture brutale.

3.6 Distribution du substrat sur le lit

La répartition du substrat sur le lit (cf. figure 2) aboutit au même résultat pour chaque essai. Le substrat à granulométrie fine se dépose entre les épis, le substrat à granulométrie moyenne se dépose à l'intérieur de la courbe tandis que le substrat le plus gros est le dernier à résister aux affouillements (en tête des épis et entre les épis). Il se forme ainsi un « talweg » de granulats grossiers.

3.7 Vitesses d'écoulement

Les mesures indiquent des vitesses au droit des épis, indépendamment de la configuration, toujours inférieures à 0,75 m/s. En droite cependant, elles sont légèrement plus importantes qu'en courbe. Le rapport vitesse courbe sur vitesse droite vaut ainsi 92%.

Les vitesses, entre les épis, parallèle à l'écoulement et proche de la rive restent très faibles. La moyenne de tous les essais vaut



Figure 6. Recouvrement des épis par sédimentation dans le tronçon rectiligne.

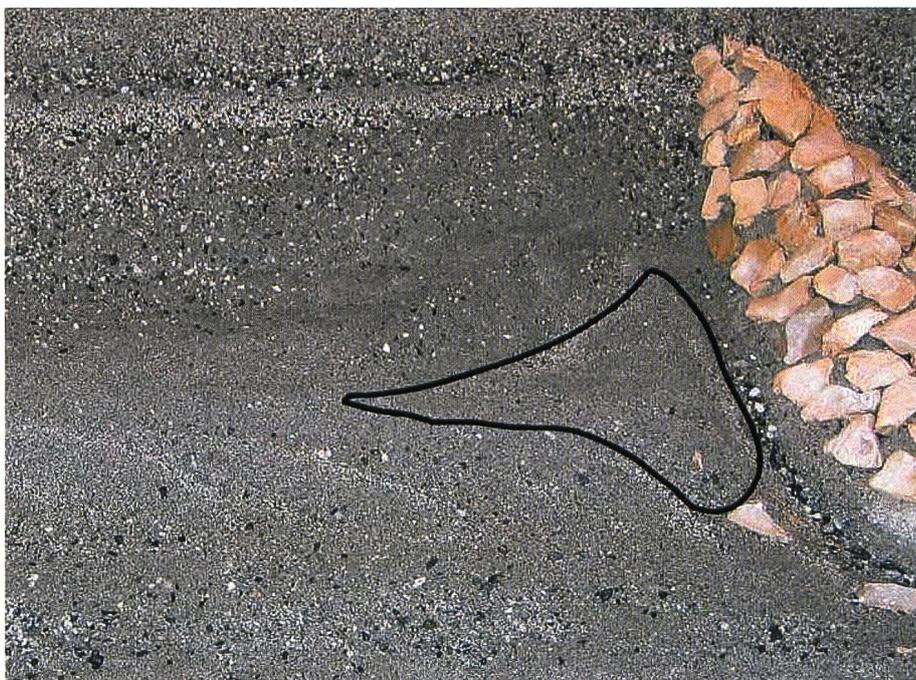


Figure 7. Forme des dépôts entre les épis en courbe.



Figure 8. Erosion semi-circulaire de la rive en courbe.

0,15 m/s. L'instrumentation n'a toutefois pas permis de mesurer le véritable vecteur vitesse ainsi que les effets tridimensionnels complexes qui se produisent au pied des épis.

4. Conclusions

Pour les paramètres étudiés ($J = 0,4\%$, $R/b = 30$), cette étude montre premièrement que les épis perpendiculaires ou orientés vers l'aval sont les plus efficaces pour la protection des rives. De part la forte dépendance entre l'écoulement et la forme des épis, cette constatation n'est valable que pour ce type d'épi. De façon générale cependant la protection des rives est assurée avec des épis perpendiculaires ou orientés vers l'aval pour autant qu'ils ne soient pas complètement submergés. De ce fait, les épis placés dans les courbes doivent être surélevés afin de tenir compte de l'inclinaison naturelle du plan d'eau sous l'effet de la force centrifuge.

Les affouillements au pied des épis peuvent être très importants en cas de crue. Cependant comme ils sont remplis rapidement dès la décrue, il est peu probable de pouvoir les mesurer in situ. Ils ne doivent néanmoins pas être négligés. Parmi les mesures constructives adéquates, on peut citer les structures souples qui permettent de s'adapter instantanément aux déformations du lit de la rivière. D'autre part les fondations

doivent être posées suffisamment profondément. Les formules de Hoffmans (4), Liu (2) et Ahmad (1) donnent une approximation de la profondeur des affouillements entre les épis. Les valeurs des coefficients sont données dans le tableau 2. Ils sont toutefois fortement dépendants des épis utilisés.

Finalement la destruction et la reconstruction du lit de la rivière au passage d'une crue permettent, par un processus dynamique, de rajeunir le milieu écosystémique. Ce phénomène, pour autant qu'il ne mette pas en danger les ouvrages et les rives, est généralement perçu positivement pour l'écologie.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier tout particulièrement Monsieur Matthias Oplatka (Abteilung Wasserbau, AWEL Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Baudirektion Kanton Zürich) pour son aide précieuse apportée tout au long de ce projet effectué dans le cadre du travail pratique de diplôme de Madame Rosa María León Armas Calderón à l'EPFL.

Bibliographie

- [1] Hoffmans G. J. C. M. and Verheij H. J. (1997). «Scour Manual», A. A. Balkema, Rotterdam.
- [2] Schager E. and Peter A. (2002). «Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau en Suisse – Poissons – Niveau R (région)», Version

pour la consultation des Cantons, EAWAG, Suisse.

- [3] Gore J. A. (1985). «The Restoration of Rivers and Streams, Theories and Experience», Butterworth, USA.
- [4] Shields D. F. Jr., Cooper C. M. and Scott S. (1995). «Knight Experiment in Stream Restoration», Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 121, N° 6, p. 494–502, USA.
- [5] Becker A. and Rey P. (2003). «Fischökologische Begleituntersuchung, Thurkorrektur», HYDRA.
- [6] Przedwojski B., Blazejewski R. and Pilarczyk K. W. (1995). «River Training Techniques, Fundamentals Design and Applications», A. A. Balkema, Rotterdam.
- [7] Schleiss A. (2003). «Aménagement des Cours d'eau», Cours polycopié EPFL, Lausanne, Suisse.
- [8] Graf W. H. and Altinakar M. S. (2000). «Hydraulique Fluviale», Traité de Génie Civil de L'EPFL, Vol. 16, PPUR, Lausanne, Suisse.

Adresse des auteurs

Rosa María León Armas Calderón, Ing. en Environnement Dipl. EPFL,
 rosamaria.leonarmascalderon@epfl.ch
 Philippe Heller, Ing. Civ. Dipl. EPFL,
 philippe.heller@epfl.ch
 Anton Schleiss, Prof. Dr., Directeur du Laboratoire de Constructions Hydrauliques, EPFL, CH-1015 Lausanne, anton.schleiss@epfl.ch



Ihr Partner für:

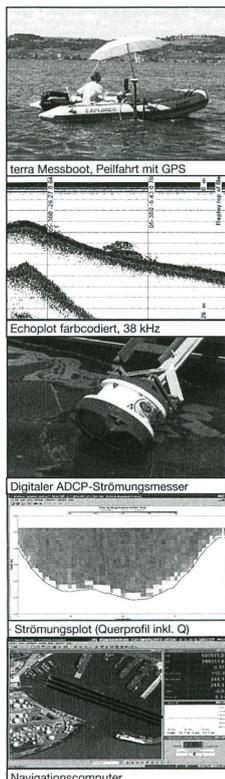
- Hydrographie
- Strömungsmessung
- Durchflussmessung
- Ingenieurvermessung
- autom. Messsysteme
- GPS / Navigation

Mit modernsten Geräten:

- digitale Echolote mit 38, 120, 200 und 710 kHz
- digitaler Sidescan mit 120 kHz
- ADCP Strömungsmesser Rio Grande mit 600 kHz
- Trimble RTK-GPS (Genauigkeit $\pm 2-3$ cm in Lage und Höhe)
- Navigations- und Positionierungssysteme

<http://www.terra.ch>
 e-mail: terra@terra.ch

Obstgartenstrasse 7, 8006 Zürich, Tel. 043 255 20 30
 In der Briese 19, D-79865 Grafenhausen, Tel. 07748 1235



«5. Umweltpreis der Schweiz 2005» der Stiftung Pro Aqua-Pro Vita

www.messe-schweiz

Gesucht: Innovative Umweltprojekte
Geboten: 50'000 Schweizer Franken
Angebot gültig bis: 15. Dezember 2004

Jetzt bewerben!
www.umweltpreis.ch

in Kooperation mit

