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

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 97 (2005)

Heft: 9-10

Artikel: Importance de la recherche pour la 3e correction du Rhône : changements climatiques et fruite des cerveaux

Autor: Rey-Bellet, Jean-Jacques

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941764

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: 12.07.2025

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

Importance de la recherche pour la 3e correction du Rhône

Changements climatiques et fuite des cerveaux

■ *Jean-Jaques Rey-Bellet*

La troisième correction du Rhône, comme tous les autres projets cours d'eau, doit être conçue en tenant compte de deux grandes thèmes d'actualités en Valais: les changements climatiques et la fuite des cerveaux.

La variation du climat est un fait observé, même si toutes ses implications, notamment sur les risques de crues, sont encore loin d'être identifiées. Il faut y voir l'une des nombreuses incertitudes que doivent prendre en compte les responsables politiques et les spécialistes des dangers naturels. La stratégie de protection contre les inondations que met en place le Canton du Valais, en assurant des solutions souples et en tenant compte de la gestion des événements extrêmes, permet de prendre en compte ces incertitudes liées au caractère aléatoire des phénomènes mais aussi à la connaissance toujours incomplète de notre milieu naturel non homogène. Plus on en sait, plus on sait qu'il faut rester humble face à la nature...

La fuite des cerveaux est aussi une préoccupation: puisque nous constatons que, si les Valaisans acquièrent volontiers une formation supérieure, un nombre appréciable d'entre eux déploie ses activités hors du Vieux Pays. Nous pensions que le canton de Vaud voulait nous aider à bloquer cette fuite grâce à leurs travaux des tunnels de Glion, mais j'ai remarqué que cela rendait également l'entrée en Valais, donc le retour des cerveaux, difficile!

Plaisanterie mise à part, votre présence à tous aujourd'hui montre que le Valais n'est pas si éloigné que cela du monde de la recherche. La mise sur pied de cette journée portant sur la recherche hydraulique en Valais montre à elle seule l'importance de la thématique, sans que j'aie besoin d'un long discours justificatif. Je ne veux toutefois pas manquer l'occasion d'insister sur le nécessaire partenariat relatif à tout grand projet, et à la troisième correction du Rhône en particulier.

L'intégration des acteurs concernés est non seulement nécessaire à l'identification de tous les besoins qui gravitent autour d'un projet, mais aussi indispensable pour en améliorer l'acceptation auprès de la population et de ses représentants. Pour reprendre l'exemple du Rhône, il est inimaginable de présenter un projet qui ne soit pas compris et même porté par ses principaux utilisateurs, à savoir notamment l'agriculture, l'économie, l'environnement ou encore la pêche pour ne citer que ceux-là. Le partenariat est efficace s'il se développe sur des fondements rigoureux. C'est pourquoi le canton du Valais s'est adressé au monde académique, et notamment à l'EPFL, dont je suis issu, pour développer certaines des bases nécessaires à la mise en place de la stratégie de protection contre les crues. Je rappelle tout de suite ici que d'autres projets de recherche sont en développement et notamment l'étude Rhône-Thur qui élabore les bases environnementales de la renaturation des cours d'eau, avec d'autres instituts de recherche en plus de l'EPFL. Dans le domaine de la recherche, une action initiée par le canton en engendre deux nouvelles: d'une part, les instituts de recherche profitent pour développer de leur côté des aspects complémentaires qui bénéficient également au Canton. D'autre part, ces instituts prennent la responsabilité de communiquer leurs résultats non seulement dans des revues spécialisées, ce qui leur fait gagner des points auprès de leur direction, mais aussi auprès du monde de la pratique, spécialistes de l'administration et bureaux d'ingénieurs, ce qui leur fait gagner au moins notre estime.

Pour en revenir à cette journée, une chose me paraît essentielle à dire et à redire: la gestion des risques résiduels est un élément fondamental de la stratégie de protection contre les crues: dimensionner un ouvrage pour un cas de figure bien défini, une crue de × m^3 par exemple, c'est de la technique élémentaire, mais mettre en place un système qui réponde efficacement à des incertitudes (combien de m^3 pour la crue millénale) ou à des cas imprévisibles (les crues extrêmes), ça c'est de la haute stratégie. On peut l'assurer soit en prévenant et en gérant au mieux les crues dès leur formation dans le bassin versant, soit en limitant les inondations là où elles font moins mal (faire la part du feu... à l'eau). Vous aurez reconnu dans cette démarche les projets Minerve et Difuse qui vous seront présentés aujourd'hui.

Le troisième aspect qui vous sera présenté permet d'optimiser les investissements en préservant la possibilité de valoriser l'aménagement du cours d'eau. Bien que le projet de troisième correction du Rhône n'ait pas la responsabilité de cette question, que nous n'allons pas la prendre en compte. La production d'hydroélectricité doit rester possible, sans nécessairement que l'on puisse dire ni où ni comment aujourd'hui: il convient de laisser cette potentialité ouverte, en fixant clairement les règles du jeu relatives à la protection contre les crues, à l'environnement et, de manière générale, à l'utilisation de la plaine dans un réel esprit de synergie. Ce mot à la mode utilisé à toutes les sauces est, pour quelqu'un qui a pratiqué le grec ancien comme moi, plein de signification forte: conjuguer les efforts. C'est ce que je souhaite aujourd'hui comme demain dans ce domaine si compliqué, mais tellement passionnant que sont les crues.

Vous, les ingénieurs de la pratique, avez un rôle important à jouer et une responsabilité à prendre. La qualité des projets cours d'eau dépend de la qualité du mandataire et les bureaux ne peuvent prétendre à un niveau d'excellence sans poursuivre en permanence leur formation. Vous en avez une possibilité aujourd'hui, il y en aura d'autres et notamment des cours de perfectionnement pour les projets d'aménagement des cours d'eau: je ne peux que vous inviter à y participer. C'est grâce à des bureaux compétents et à jour avec leurs connaissances que le canton peut garantir la qualité des projets et l'atteinte des objectifs dans le respect de la parcimonie financière. En des périodes où l'argent public se fait rare, ce critère de qualité prend toute son importante.

Je remercie donc tout particulièrement l'association suisse pour l'aménagement des eaux par son directeur, Walter Hauenstein et le laboratoire des constructions hydrauliques par son directeur le prof. Schleiss et son collaborateur Jean-Louis Boillat, d'avoir mis sur pied cette journée de conférence. Je n'oublierai pas la Confédération – qui ne nous oublie pas non plus-, par l'Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG), qui apporte un soutien technique et financier important. Ces considérations me permettent, comme tout bon ingénieur (et j'espère, comme tout bon politique), d'en arriver aux conclusions, en disant:

1. Les changements du climat apportent beaucoup d'incertitudes et de risques. Mais le changement du climat dans les relations entre le monde académique et celui de la pratique, le réchauffement de ce climat là au contraire apporter des certitudes et de la sécurité.
2. Finalement, peu importe la fuite des cerveaux, pourvu qu'ils remontent à la source pour se reproduire!

Adresse de l'auteur

Jean-Jacques Rey-Bellet, Conseiller d'Etat

Autodestruction du couronnement d'une digue fluviale pour le déversement de débits surabondants

■ Jean-Marc Ribi, Johann Pury

Résumé

*Dans le cadre du projet de recherche Difuse, les travaux menés à l'Ecole d'ingénieurs et d'architectes de Fribourg, portaient sur le développement d'un couronnement de digue fluviale, capable de s'autodétruire à l'atteinte d'un niveau de crue extrême, dans la perspective de produire des épanchements à l'endroit voulu. La configuration recherchée devait répondre à des critères d'intégration, offrant une alternative aux solutions techniques existantes. Dans ce but, celle retenue est constituée d'un façonnage de sable standard, dont la forme en trapèze donne le prolongement à la digue sur laquelle elle repose. Le scénario retenu consiste en l'ouverture initiale d'une série de brèches, puis en l'allongement des créneaux, résultant de l'érosion des matériaux intermédiaires, par les flots déversants. La rupture est mobilisée par l'introduction d'eau dans une bouche logée au sommet du parement amont du couronnement, qui elle même alimente une gaine de granulats grossiers qui pénètre dans le massif fusible, dans le but d'y développer rapidement un gradient hydraulique destructeur. Le développement s'est opéré sur 3 modèles réduits, à l'échelle 1:3, où le couronnement occupait une hauteur de 40 cm. A cette taille, il est possible de dégager une fenêtre déversante d'une longueur de 3,5 m en moins de 10 min, à partir d'une brèche. Le débit libéré est alors de 880 l/s. En vraie grandeur, on peut compter avec un capacité d'évacuation de 1,3 m^3/s*m, disponible après 20 min, entre des brèches initiales distantes de 10 m, et sous 1,2 m d'eau.*

Zusammenfassung

*Im Rahmen des FE-Projektes Difuse wurden an der Hochschule für Technik und Architektur Freiburg Untersuchungen zu Notsicherungselementen (fuse plugs) an Flussdeichen durchgeführt. Diese Sicherungselemente befinden sich in der Dammkrone und kommen zum Einsatz, wenn der Wasserspiegel im Gewässer einen bestimmten Höchstwert erreicht. In diesem Fall wird ein Teil des Abflusses in dafür vorgesehene Überflutungsflächen geleitet und der Hochwasserscheitel reduziert. Das in dieser Studie entwickelte Element besteht aus erodierbarem sandigem Material und ersetzt auf einer bestimmten Länge die vorhandene trapezförmige Dammkrone. Es stellt somit eine Alternative zu herkömmlichen technischen Lösungen dar. Im untersuchten Szenario wurden längs der Dammkrone abschnittsweise künstliche Breschen geschaffen. Das durch die Breschen einströmende Wasser erodiert mit zunehmender Zeit das zwischen den Scharten befindliche Sandmaterial, bis schliesslich das gesamte Notsicherungselement verschwunden ist. Das Versagen wird durch Einleitung von Wasser durch eine Öffnung im oberstromigen Abschnitt des Elementes initiiert. Von dort erreicht das Wasser eine aus grobem Kiesmaterial bestehende Filterschicht, welche sich im Kern des Notsicherungselementes befindet. Der darin hervorgerufene hydraulische Gradient führt zur Zerstörung des Elementes. Die Untersuchungen wurden an drei hydraulischen Modellen im Massstab 1:3 durchgeführt. Die Höhe der Dammkrone betrug 40 cm. Unter diesen Bedingungen konnte ausgehend von einer Bresche innerhalb von weniger als 10 min eine seitliche Überfalllänge von 3,5 m mit einem seitlichen Abfluss von 880 l/s realisiert werden. Im Prototyp steht somit bei einem Breschenabstand von 10 m und 1,2 m Überdeckung nach 20 min eine Kapazität von 1,3 m^3/s*m zur Verfügung.*

1. Introduction

Précédemment, la mesure principale de protection contre l'inondation des terres riveraines consistait en l'accroissement incessant de la capacité d'écoulement du cours d'eau. Aujourd'hui, cette pratique laisse sa place à une stratégie de gestion des crues, reconnaissant le risque d'inondation. Elle consiste en la volonté de générer, en cas de crue extrême, des épanchements vers des terres réservées, pour la sécurisation d'autres parties du territoire. L'objectif du projet Difuse est d'apporter des connaissances et des solutions, pour l'aménagement d'ouvrages de déversement. Dans ce but, les travaux menés à l'Ecole d'ingénieurs et d'architectes de Fribourg, portaient sur le développement d'un couronnement de digue, offrant la capacité d'évacuation requise pour le contrôle du niveau de crue dans le fleuve.

Si le contrôle de la crue extrême est l'objectif apparent, il faut aussi garantir la protection des terres réservées contre des débordements abusifs, soit à l'occasion de crues non dommageables et par conséquent, plus fréquentes. Dès lors, le dispositifs débits excédentaires croissants, au-delà. Cet effet ne peut être obtenu que par l'abaissement du seuil déversant ou l'élévation de la ligne d'eau. Pour des raisons opérationnelles, c'est la première option qui a été retenue.

Le scénario suivi consiste à organiser l'ouverture d'une série de brèches localisées sur le couronnement de la digue, et à favoriser l'érosion de la matière qui les sépare, par les flots déversants. A terme,

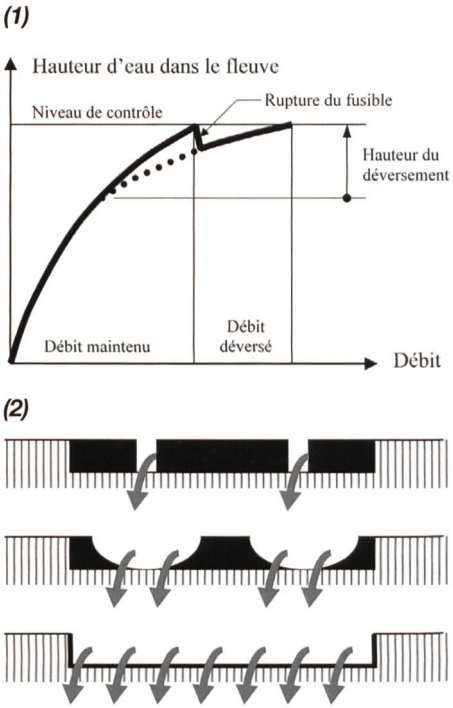

Figure 1. Fonction hauteur/débit modifiée par le déversement (1). Scénario d'ouverture (2).

une fenêtre est intégralement dégagée à cet effet, sur une longueur correspondante aux débits à déverser. Le problème est donc la mise au point de cette procédure, en développant l'organe fusible et en précisant la fonction d'allongement de l'ouverture déversante au cours du temps.

2. Principe de rupture

Afin de se référer à de réelles conditions d'utilisations, des ordres de grandeurs ont été tirés de situations examinées dans le cadre de la 3ème correction du Rhône, où la consigne est de déverser 1 à 1,5 $m^3/s.m^1$, avec une hauteur d'eau de 1 à 1,5 m. On parle donc d'un déversement sur environ 300 m, afin de libérer plus de 400 m^3/s.

Dans la recherche de solutions, l'intérêt s'est tourné vers des aménagements offrant une apparence paysagère intégrée. Ainsi, la configuration retenue résulte du façonnage de granulats locaux standard, dont la géométrie en trapèze à bases horizontales, correspond au prolongement du corps de la digue, sur lequel il repose.

Recherchant la dislocation de la couverture végétale qui ne manquera pas de s'enraciner, le principe qui paraissait le plus indiqué pour générer l'ouverture des brèches, est celui de l'érosion du milieu poreux par les écoulements internes. L'idée est donc d'incorporer localement dans le massif du couronnement, une singularité qui favorise l'apparition rapide d'un gradient hydraulique destructeur.

Dans ce sens, l'analyse de publications retraçant le déroulement d'inondations récentes révèle que le plus souvent, les ruptures de digues apparaissent à l'endroit où des corps étrangers y ont été incorporés de manière indélicate: poteaux, arbres, palplanches, murs, etc. Parmi les situations compromettantes rapportées, on trouve les terriers creusés horizontalement depuis le parement amont de la digue.

3. Développement du dispositif fusible

Afin de développer le principe de rupture retenu, l'élaboration de la structure interne du dispositif fusible s'est opérée sur 2 modèles réduits, en écoulement frontal. Considérant les ordres de grandeurs, les moyens disponibles et la volonté de réduire les effets d'échelles perturbateurs, le rapport géométrique choisi est de 1/3. Ainsi, le couronnement est reproduit avec une hauteur de 0,4 m, une grande base de 1,40 m et des talus inclinés à 2/3, ce qui laisse une largeur sommitale de 0,2 m.

3.1 Modèle étroit

Dans le but de tester un grand nombre de configurations, le couronnement est construit entre 2 plaques de verre distantes de 15 cm. Il est façonné avec du sable sec, à granulométrie resserrée entre 0,4 à 1 mm, fourchette centrée dans celle plus étendue, des sables standards 0 à 3 mm. Sa perméabilité a préalablement été mesurée à $2*10^{-3}$ m/s. Le parement amont est imperméabilisé, et une fois le plan d'eau représentatif du niveau de contrôle dans le cours d'eau stabilisé, le massif fusible est alimenté par l'ouverture d'une vanne qui libère l'écoulement d'une cuve à niveau constant, elle même ajustée au niveau de contrôle.

Suivant une procédure évolutive, des cheminements privilégiés sont organisés dans le massif de sable, à l'aide de boulettes d'argile expansé. Les variantes testées sont préalablement sélectionnées parmi l'ensemble des idées, à l'aide d'un logiciel de simulation des écoulements permanents dans une digue. Le paramètre significatif est le temps écoulé entre l'instant de la mise en eau et celui de l'affaissement de la plate-forme supérieure. Il est tiré de l'enregistrement des hauteurs mesurées par un capteur à ultrasons placé à son endroit.

Si lors des premiers essais le temps caractéristique s'élevait à 12 min, la rupture de la solution retenue apparaît après 2½ min. Elle est caractérisée par l'intégration d'une couche de 10 cm de granulats grossiers posée sur le parement amont et d'une gaine de même constitution pénétrant horizontalement le massif à mi-hauteur, jusqu'à son axe de symétrie.

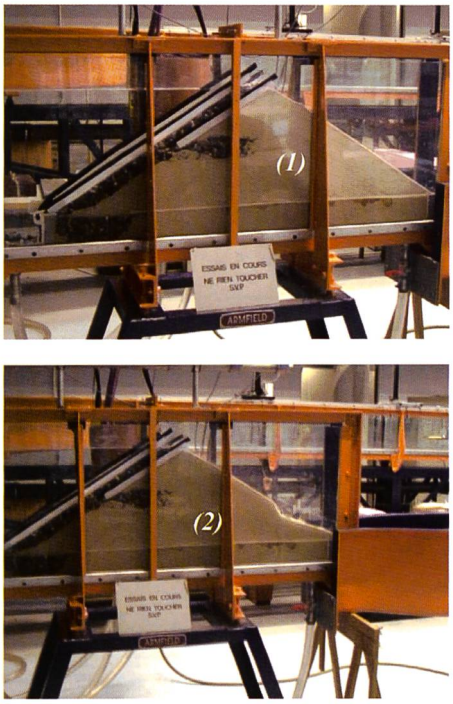

Figure 2. Modèle étroit: solution retenue, (1) imprégnation – (2) affaissement.

3.2 Modèle large

Une fois la structure interne définie dans le plan vertical, il s'agit de préciser sur un modèle plus large, la configuration transversale, favorable à la franche et rapide ouverture d'une brèche bien localisée. Ainsi, le couronnement a été reproduit à la même échelle (1/3), et avec les mêmes caractéristiques que celles mentionnées précédemment. Seule, la dimension transversale a été portée à 1,20 m.

La procédure d'élaboration à nouveau évolutive, est basée sur la juxtaposition des particularités suivantes:

- La gaine de granulats grossiers est soit absente, soit réalisée sur toute la largeur du banc, soit centrée. Dans le cas de l'essai 8, la gaine centrée est prolongée à son extrémité, par 2 ailes, le tout formant un T couché.
- Les parois verticales et le plancher horizontal entre lesquels est façonnée la portion de couronnement, sont soit lisses soit rugueux.
- Le sable de granulométrie 0,4 à 1 mm, est mis en œuvre de manière identique pour chaque essai (essuyage préalablement, couches compactées), sauf pour l'essai 5 pour lequel le sable est sec.
- L'eau est introduite dans le fusible, soit sur toute la largeur du modèle, soit de manière centrée en regard de la gaine de granulats grossiers susmentionnée.

La configuration de l'essai 4 est celle qui répond le mieux aux objectifs: la gaine étroite et centrée permet de dégager en 2½ minutes, une brèche franche et bien localisée. L'état d'aspérité de l'assise, ainsi que le degré d'humidité du sable peuvent influencer les résultats de manière ap-

Figure 3. Banc d'essais large
1. Réserve d'eau amont
2. Siège du fusible
3. Dessableur
4. Bac de rétention
5. Sondes ultrasons
6. Caméra frontale

Figure 4. Introduction d'eau dans le fusible (vue d'amont): (1) sur toute la largeur, (2) centrée sur la gaine.

Les spécificités des 8 configurations les plus représentatives se résument ainsi:

Configuration	1	2	3	4	5	6	7	8
Sable	humide	humide	humide	humide	sec	humide	humide	humide
Introduction d'eau	large	large	centrée	centrée	centrée	large	centrée	centrée
Gaine pénétrante	non	non	non	centrée	centrée	large	centrée	T
Revêtement	lisse	rugueux	lisse	lisse	fond rugueux	lisse	fond rugueux	lisse
Temps de rupture	4'48	3'20	10'11	2'35	3'13	2'16	2'49	1'56
Forme du glissement	linéaire	langue	linéaire	niche étroite	niche étroite	linéaire	niche large	linéaire
Position de la brèche	aléa-toire	bi-latérale	aléa-toire	centrée	centrée	aléa-toire	centrée	centrée

Tableau 1. Caractéristiques des principaux essais en écoulement frontal, sur le modèle large.

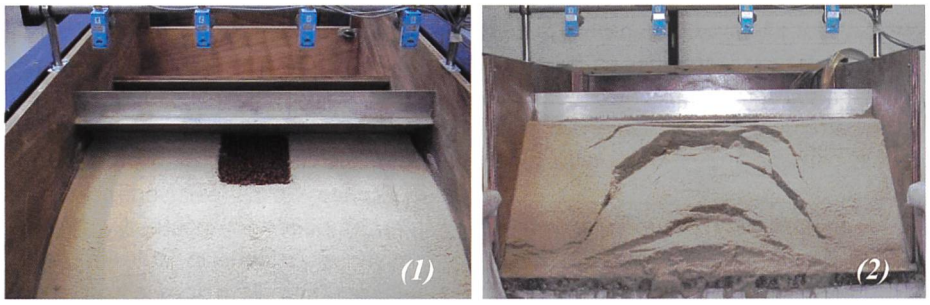

Figure 5. Essai 4 (vue d'aval): confection de la gaine (1), ouverture de la brèche (2).

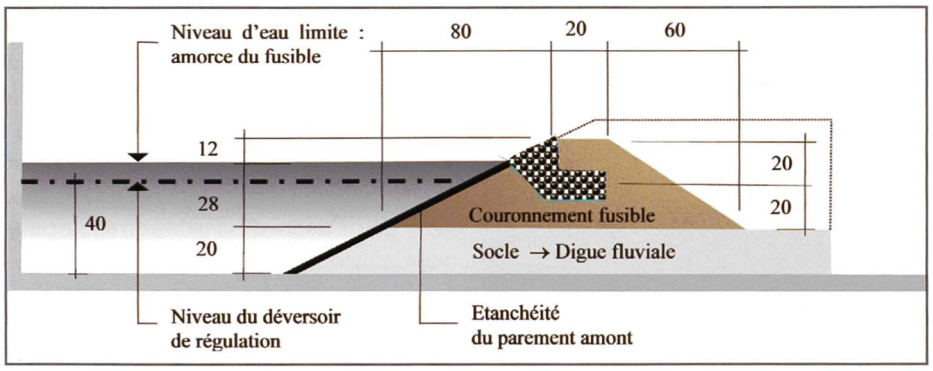

Figure 6. Coupe transversale du couronnement fusible sur le modèle à écoulement longitudinal.

préciable. Ces observations pourront être valorisées en phase de projet.

4. Modélisation de l'allongement de l'ouverture déversante

4.1 Mise en œuvre

Sur la base de l'étude sur modèles réduits, nous produisons une solution pour l'ouverture de la brèche. Dans les 2 phases, les écoulements sont frontaux, et la représentativité des essais est limitée à l'instant où le couronnement s'affaisse. Au-delà, la surverse entre en jeu, et le plan d'eau amont s'abaisse. Dès lors, il est important de valider ses conclusions dans le cas d'un écoulement amont tangentiel, avec un plan d'eau plus persistant, conformément à la réalité. Selon le scénario annoncé, il s'agit aussi et surtout, d'étudier l'évolution de l'érosion de la matière qui sépare 2 brèches, occasionnée par les flots déversants.

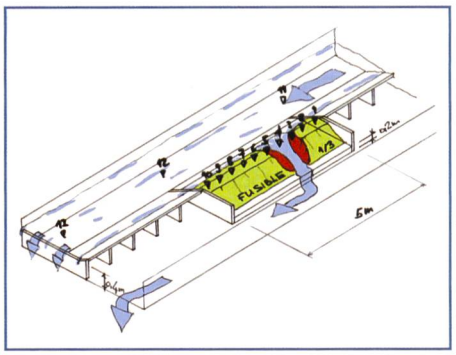

Figure 7. Isométrie du couronnement fusible dans le modèle à écoulement longitudinal.

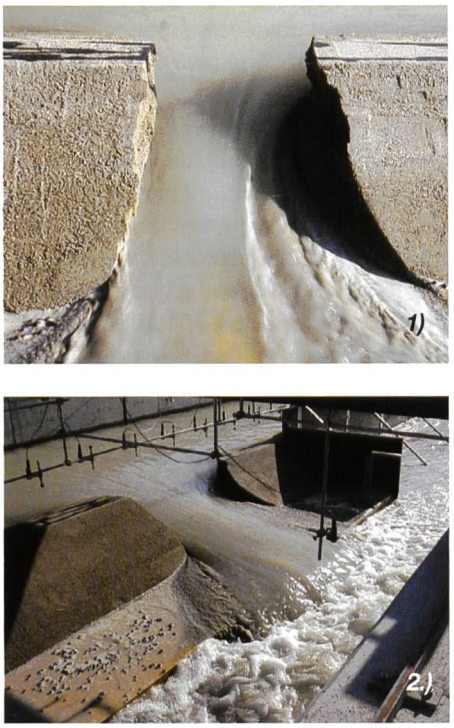

Figure 8. 1) Ouverture de la brèche 2) Allongement de l'ouverture.

Ces connaissances sont retirées d'essais effectués sur un 3ème modèle, caractérisé par l'écoulement longitudinal de 400 l/s, en circuit fermé. Reprenant toujours la même échelle et les mêmes dimensions de profil, le couronnement est aménagé sur une longueur de 5 mètres, avec du sable de standard de gravière (0 à 3 mm et $K = 4*10^{-4}$ m/s après lessivage des fines).

Le fusible est constitué d'une bouche rectangulaire logée au niveau de contrôle, soit au sommet du talus amont, qui alimente une gaine tubulaire d'abord plongeante verticalement puis pénétrante horizontalement dans le profil du couronnement, selon la configuration précédemment élaborée. La gaine est constituée de granulats grossiers, enveloppés dans un géotextile. L'étanchéité du parement amont est assumée par une feuille PVC raccordée à la bouche, et capable de se

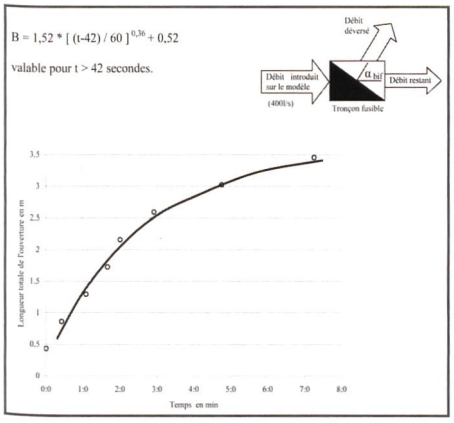

Figure 9. Fonction d'allongement.

Temps	t	min	1	2	3	4	5	6	7
Débit déversé	Q_{dev}	l/s	280	328	360	372	388	396	400
Longueur de l'ouverture	B	m	1,5	2,3	2,6	2,9	3,1	3,3	3,5
Hauteur d'eau moyenne	H	m	0,35	0,31	0,29	0,27	0,26	0,25	0,24
Coefficient de déversement.	C_{dev}	-	0,90	0,83	0,89	0,91	0,94	0,96	0,97
Coefficient de bifurcation	C_{bif}	-	0,65	0,60	0,65	0,66	0,69	0,70	0,72
Angle de bifurcation	α_{bif}	°	90°	98°	90°	87°	80°	77°	72°

Tableau 2. Paramètre et coefficients représentatifs de l'allongement de l'ouverture.

déchirer sous l'action des flots déversants. La déformation de la bande sommitale est suivie par 10 capteurs ultrasons et la ligne d'eau dans le fleuve par 3 autres. Le niveau d'eau dans celui-ci est fixé par un déversoir de régulation, qui avant rupture, est franchi par les 400 l/s. A la fin de l'essai, ce même débit s'écoule intégralement par l'ouverture dégagée par la destruction du couronnement.

4.2 Résultats

Les premiers essais, ont montré d'une part, la stabilité du couronnement avant l'atteinte du niveau de contrôle, et la conformité de l'ouverture de la brèche avec les essais antérieurs. En particulier, il est à relever que la brèche s'ouvre perpendiculairement à l'axe de l'écoulement dans le fleuve. Cette observation permet d'attribuer aux essais du fusible en écoulement frontal, une représentativité pour le cas réel de son positionnement latéral. Dans ce même contexte, est apparu l'allongement de l'ouverture déversante, nettement plus marqué vers l'aval que vers l'amont. Ce constat a permis de rapprocher le fusible du bajoyer amont.

Les essais concluants montrent un déroulement de l'allongement en 2 phases. Partant de l'ouverture perpendiculaire de la brèche, l'axe de l'écoulement déversant fait un angle avec celui de l'écoulement dans le fleuve, qui se maintient à 90° pour dégager un créneau de 2,3 m, en 2 minutes. Par la suite, l'angle de bifurcation (α_{bif}) tend vers 70° et la destruction du couronnement se déroule plus graduellement, jusqu'à l'atteinte du bajoyer aval. L'ouverture maximale de 3,5 m, limitée par les dimensions du modèle, est atteinte après 7 min, sans compter le temps de rupture du fusible. Par lissage, la fonction d'allongement proposée est la suivante, avec la longueur de l'ouverture B [m] et le temps t [sec]: $B = 1{,}52 * [(t-42)/60]^{0{,}36} + 0{,}52$ valables pour $t > 42$ secondes.

Les débits déversés à travers l'ouverture (Q_{dev}), sont déduits des enregistrements de niveaux d'eau au droit des 13 sondes, et de la mesure du débit introduit sur le modèle par les pompes. Le coefficient de déversement (C_{dev}) est calculé à l'aide de la relation du seuil épais ($Q_{dev} = C_{dev} * B * H^{3/2}$).

Le coefficient de bifurcation (C_{bif}) exprime l'influence de l'angle de bifurcation (α_{bif}) sur la capacité de déversement. Il est calculé en rapportant le coefficient de déversement à la valeur correspondante d'un même écoulement mais frontal, sur un seuil épais ($C_{bif} = C_{dev}/1{,}37$). Ainsi ce coefficient passe de 1,0 (pour $\alpha_{bif} = 0°$) à 0,65 (pour $\alpha_{bif} = 90°$). Les valeurs intermédiaires calculées par interpolation linéaire, vont dans le sens des observations, et s'inscrivent dans les fourchettes figurant dans la littérature (Lautrich, 1966).

5. Paramètres en vraie grandeur

L'ensemble des études sur modèles réduits a été mené à l'échelle géométrique 1/3. Compte tenu de dimensions proches de la réalité, l'utilisateur a la liberté d'extrapoler les résultats selon d'autres proportions, soit 1/4 voire 1/5. Ceci dit, les indications mentionnées dans ce chapitre sont référées à l'échelle 1/3. Les paramètres sans indice correspondent au modèle. Les paramètres avec l'indice zéro correspondent à la réalité. Le processus développé met en activité 2 phénomènes hydrauliques distincts, à savoir les écoulements souterrains pour la rupture du fusible, et les écoulements à surface libre pour l'allongement de l'ouverture déversante. C'est pourquoi, il y a lieu de transposer les paramètres hydrauliques selon des règles de similitudes distinctes.

5.1 Similitude des écoulements en milieu poreux

Le nombre de Reynolds (Re = V*D / = K*I*D/) est significatif de la similitude des écoulements en milieux poreux ($Re = Re_0$). Le terme de vitesse est donné par la loi de Darcy (V = K*I), et celui de longueur est le diamètre (D) des granulats (souvent D_{10}). Comme la viscosité (v) et le gradient (I) sont les mêmes sur le modèle qu'en vraie grandeur, la perméabilité et le diamètre liés entre eux, ne peuvent pas être différents ($K = K_0$ et $D = D_0$). Or la loi de Darcy n'est valable qu'en cas de stabilité du milieu poreux. Cette condition n'est donc pas respectée lors de la rupture du fusible. Des expériences traitent des effets de turbulence qui conduisent à la destruction du massif, sans déboucher sur des règles de similitude établies. Toutefois, des approximations permettent de croire que D/D_0 est compris entre 1 et $(L/L_0)^{1/2}$. C'est pourquoi, nous proposons de réaliser le couronnement en vraie grandeur avec du sable standard 0 à 3 mm, en correspondance avec le matériau utilisé pour les essais (sable 0,4 à 1,0 mm).

5.2 Similitude des écoulements à surface libre

En conservant le nombre de Froude, l'analyse dimensionnelle permet de donner

	Sur modèle (1/3)	En réalité (3/3)
Hauteur d'eau amont (= du fusible)	H = 0.4 m	H_0 = 1.2 m
Longueur de l'ouverture	B = 3.5 m	B_0 = 10.5 m
Temps d'ouverture (yc rupture du fusible)	t_B = 10 min	t_{B0} = 17.3 min
Débit écoulé sur l'ouverture ($Q_{dev} = B*H^{3/2}$)	Q_B = 0.9 m^3/s	Q_{B0} = 13.8 m^3/s
Débit unitaire	q_B = 0.3 $m^3/s*m$	q_{B0} = 1.3 $m^3/s*m$

Tableau 3. Comparaison des valeurs déterminantes en réalité et sur modèle.

des échelles propres à chaque paramètre, en se référant à l'échelle géométrique (L/L_0). Ainsi, le temps réel est $t_0 = t / (L/L_0)^{1/2}$, et le débit réel est $Q_0 = Q / (L/L_0)^{5/2}$. A l'échelle géométrique 1/3, les valeurs en jeu pour le déversement dans l'ouverture libérée sont les suivantes: En référence aux cas envisageables dans le cadre de la 3ème correction du Rhône, il faudrait compter avec une longueur totale de l'ouverture d'environ 300 m, pour le déversement de 400 m^3/s, pour autant que la hauteur moyenne dans le fleuve (sur la longueur de l'ouverture) soit de l'ordre de 1,2 m. Cette disposition serait rythmée par l'installation de 30 éléments fusibles, distants de 10 m. Ceci dit, la problématique de la forme de la ligne d'eau au passage du déversoir reste à étudier de cas en cas, et les scénarios d'enchaînement des ruptures à développer.

6. Conditions de mise en œuvre – Recommandations

Si nos travaux apportent des résultats conceptuels, la mise en œuvre des solutions proposées doit encore franchir le cap du projet d'exécution. Bien que laissée aux soins de l'utilisateur, l'étude des détails constructifs tiendra compte des indications mentionnées.

6.1 Stabilité du couronnement avant rupture

Le parement amont du couronnement est soumis à la contrainte de cisaillement imposée par l'écoulement principal dans le fleuve. Dans le cas d'une hauteur d'eau H_0 = 1,2 m, d'une pente longitudinale i = 1 ‰, et d'une pente de parement amont de 1/2 , une couverture végétale maigre offrira une résistance suffisante. Rappelons dans ce but que le choix d'un mécanisme de rupture du fusible par érosion interne a précisément été préféré, parce qu'il donnait l'avantage de déstabiliser un revêtement végétal. Cet effet ne sera toutefois exploitable qu'à la condition d'un enracinement superficiel.

La stabilité du couronnement avant rupture est dépendante de l'étanchéité du parement amont. Lors du choix du matériau de la couche imperméable, il y a lieu de considérer la faculté de dislocation de celle-ci lors de la rupture du couronnement. Une couche d'argile paraît indiquée dans ce but. S'il s'agit d'une couverture synthétique, il faudra l'appliquer en bandes et étudier leur recouvrement. Parlant de stabilité, nous relevons les résultats d'une tentative infructueuse de conformer la pente des parements du couronnement

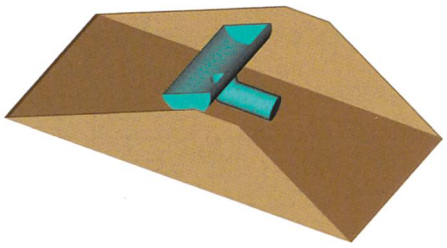

Figure 10. Représentation tubulaire du dispositif fusible.

fusible à celle de la digue qui le supporte, soit à 1/2 (26°). En effet, si le parement aval est réalisé à 1/2, le fusible peine à se rompre alors que des percolations abondantes et continues apparaissent en pied rapidement. Il est donc important de ne pas donner au parement aval une pente inférieure à 2/3. Cette expérience met par ailleurs en évidence la nécessité de drainer l'interface entre le couronnement et la digue qu'il surmonte.

6.2 Viabilité du couronnement fusible

Pour des questions de commodité, nous avons constitué le dispositif fusible sous forme d'un corps de granulats grossiers, par ailleurs flottants. Il se trouve que si ce dispositif est opérationnel en laboratoire, la question de sa viabilité reste préoccupante: L'embouchure logée dans la partie sommitale du couronnement, restera-t-elle bien dégagée? Le boyau de granulats grossier ne va-t-il pas se colmater par l'intrusion de fines? Quelle surveillance et quel entretien nécessite-t-il? La compétence de l'ingénieur praticien peut venir à bout de pareilles préoccupations.

Alors qu'un système tubulaire rigide pourrait être envisageable, nous accordons notre préférence à un dispositif déformable, qui ne constitue pas un point dur dans la continuité du couronnement. Pour remédier à l'intrusion de fines il est souhaitable de l'envelopper dans un géotextile. Il y a cependant lieu de se préoccuper de sa perméabilité car en sens inverse lors de la destruction, il doit être diffusant.

7. Conclusions générales

Selon les objectifs initiaux, l'étude de l'autodestruction du couronnement de digues fluviales pour la gestion de crues extrêmes par épanchements, aboutit sur une solution intégrée, autant par son apparence, que par sa constitution, ainsi que par les mécanismes activés. Il n'empêche que notre contribution est volontairement limitée au stade morphologique. En effet, il nous paraît illusoire d'aborder la partie constructive sans une référence concrète, quand bien même les essais ont permis de toucher certains points pratiques importants. Les résultats produits constituent donc une base de projet, alors que toute l'attention doit encore être accordée pour amener la solution au stade opérationnel. Le cas échéant, les installations expérimentales et le savoir faire acquis, sont tenus à disposition de tout intéressé. Enfin, les résultats de cette étude ne sauraient être détachés de ceux issus des 3 autres volets du projet Difuse.

Remerciements

Ce projet a été financé par la Commission fédérale pour la Technologie et l'Innovation, l'Office Fédéral des Eaux et de la Géologie, le Service des routes et cours d'eau du Canton du Valais, l'Etablissement Cantonal fribourgeois d'Assurance des Bâtiments et la Haute Ecole Spécialisée de la Suisse Occidentale. Nous remercions ces partenaires pour leur confiance. Notre reconnaissance va également au Laboratoire de Constructions Hydrauliques de l'EPFL.

Bibliographie

H. Armbruster-Veneti (1999) Über das Versagen von Erddämmen, Wasserwirtschaft 89. Jahrgang, N° 10, pp. 504–512

T. Boisseau, N. Camp'Huis, A. Gautheron (1997) Stratégie d'écrêtement des crues fortes de la Loire moyenne, Agence de l'eau Loire-Bretagne.

K. Broich (2000) Simulation of the impact Dam-break experiments using different calculation methods, University of Federal Armed Forces Munich.

R. Lautrich (1966) Der Abwasserkanal, Verlag Wasser und Boden.

M. Lino, P. Mériaux, P. Royet (1999) Méthodologie de diagnostic des digues appliquée aux levées de la Loire moyenne, édition Cemagref, ISBN 2-85362-524-9.

M. J. Franca, A.B. Almeida (2000) A computational model of rockfill dam breaching caused by overtopping, Journal of Hydraulic Research Vol 42, N° 2.

A. Rozov (2003) Modeling of washout of dams, Journal of Hydraulic Research Vol 41, N° 6, pp. 565–577

P. Volkart (1989) Notentlastungen der Reuss im Abschnitt See-Amsteg, ETHZ-VAW.

Adresse des auteurs

Jean-Marc Ribi, professeur EIA-FR,

Johann Pury, collaborateur scientifique EIA-FR,

Institut de la Construction et de l'Environnement,

Ecole d'ingénieurs et d'architectes de Fribourg

Boulevard de Pérolles 80,

1700 Fribourg, Suisse

++41 26 429 66 84

http:// www.eif.ch / jean-marc.ribi@eif.ch