

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 92 (2000)
Heft: 7-8

Artikel: Hydraulique de évacuateurs de crue en escalier
Autor: André, Stéphanie
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-940286>

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: 10.02.2026

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

Hydraulique des évacuateurs de crue en escalier

■ Stéphanie André

C'est au Laboratoire d'hydraulique, d'hydrologie et de glaciologie (VAW) de l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich (ETHZ) que ce sont réunis les spécialistes des écoulements à haute vitesse sur les évacuateurs de crue ou barrages en escalier.

A l'occasion de ce séminaire «*Hydraulics of Stepped Spillways*», une cinquantaine d'ingénieurs et de chercheurs représentant onze pays d'Europe, d'Amérique, d'Australie et d'Asie se sont retrouvés du 22 au 24 mars 2000 pour confronter leurs connaissances et leurs réflexions dans ce domaine de l'hydraulique.

Ce premier séminaire marque l'intérêt grandissant pour ces écoulements particuliers sur macro-rugosité, de plus en plus d'actualité avec l'apparition des ouvrages (barrages et évacuateurs de crue) en béton compacté au rouleau (BCR ou «RCC») où l'escalier résulte de la méthode de construction elle-même. Durant ce séminaire rien n'a été oublié par les participants, ni l'écoulement décrit dans ses moindres détails, ni les caractéristiques de la structure, encore moins l'impact de l'un sur l'autre.

Comme l'ont ainsi mentionné les professeurs Hager et Minor (VAW) au cours de la session d'ouverture, tout ce travail mis en commun devait donner confiance en cette nouvelle technique de construction en escalier et répondre aux principales questions des ingénieurs concernant:

- le domaine d'application (débit spécifique maximal) des évacuateurs de crue en escalier;
- la quantité d'énergie résiduelle attendue en pied de chute;
- les dimensions optimales des marches, des murs bajoyers, la qualité du béton utilisé;
- les risques de cavitation et d'érosion des marches malgré l'aération de l'écoulement;
- la fiabilité et les limites de projection des résultats sur modèle au prototype.

Quels sont alors les mots clé les plus appropriés pour rendre compte, très brièvement, de la multitude d'informations transmises pendant ce séminaire ? En voici quelques-uns pour une première prise de contact avec les 24 contributions publiées (voir référence).

Domaines d'application des évacuateurs de crue en escalier

On peut se demander pourquoi l'ouvrage en escalier suscite autant d'intérêt. Les différentes expériences exposées au cours de ce séminaire mettent en valeur les nombreux avantages et l'étendue du champ d'application de ces structures particulières. En effet, les escaliers peuvent être utilisés pour:

- Dissiper l'énergie le long de la structure elle-même grâce à la turbulence induite par les marches. Ils permettent ainsi d'éviter la construction de bassins de dissipation volumineux et coûteux en pied de chute et aussi de limiter l'érosion locale dans cette zone proche des fondations.
- Atténuer les risques de cavitation sur le parement ainsi que l'érosion des marches grâce à l'entraînement d'air naturel dans l'écoulement.
- Augmenter la capacité d'ouvrages existants, en particulier des barrages submersibles: les marches stabilisant le parement aval autorisent la submersion.
- Réduire le taux de gaz dissout, trop élevé en pied de chute des ouvrages lisses et néfaste pour beaucoup d'espèces de poissons (Ahmann, M. L., et Zapel, E. T.).
- Réaérer les eaux usées de mauvaise qualité dans les stations d'épuration ou les cours d'eau eutrophiés (Toombes, L., et Chanson, H.). Le transfert des gaz atmo-

sphériques et l'évaporation des polluants volatiles sont activés grâce à la forte turbulence et à l'aération de l'écoulement sur l'escalier.

Modèle physique

Etant donné la complexité de l'écoulement (milieu turbulent et biphasique) sur un évacuateur de crue en escalier et le grand nombre de paramètres contribuant à son comportement, l'approche expérimentale sur modèle physique est la plus adaptée et la seule qui aboutisse à ce jour à des résultats.

Tout au long du séminaire, vidéos, diapositives, photographies et visite du laboratoire de la VAW ont fait apprécier les différentes maquettes récentes d'évacuateurs de crue en escalier. Ces modèles ont deux vocations:

- Soit ils représentent des ouvrages à construire ou à réhabiliter et permettent d'optimiser le dimensionnement de l'escalier et de la structure pour répondre aux



Figure 1. Mur latéral en BCR du bassin de dissipation du barrage de Tarbela, Pakistan. (VAW, 1980)

conditions hydrologiques et environnementales du site.

- Soit ils servent d'outil de recherche pour l'analyse du comportement des écoulements à haute vitesse sur marches dans le but de proposer des lois fiables et des recommandations pour le dimensionnement d'ouvrages en escalier quelconques.

Instrumentation

Au cours de ce séminaire, la confrontation des différentes campagnes d'essais sur modèle ou prototype a permis de rendre compte des instruments de mesure utilisés pour caractériser l'écoulement sur escalier: sonde électromagnétique, sonde résistive, sonde à fibre optique pour les profils de concentration d'air et de vitesse du mélange eau-air; tube de Pitot et vélocimètre pour la vitesse de l'eau claire; capteur piézorésistif pour la pression; piézomètre et limnimètre pour la hauteur d'eau; caméra vidéo ultra-rapide et marqueur pour l'observation de l'écoulement.

La difficulté principale reste la détermination de la hauteur du mélange eau-air, compte tenu de l'aspect mousseux de la surface libre. Trois techniques sont utilisées:

- estimation directe dans l'écoulement,
- déduction d'après les profils verticaux de concentration d'air,
- calcul à partir de la hauteur d'eau conjuguée dans le bassin de dissipation (équation de conservation de la quantité de mouvement).

Effet d'échelle

Pour représenter correctement les caractéristiques des écoulements à surface libre, aérés et turbulents, trois similitudes devraient être simultanément appliquées: Froude (pour les forces de gravité), Reynolds (pour les forces de viscosité) et Weber (pour la tension superficielle). Ceci n'est pas réalisable sur modèle physique. Les effets de gravité restant prédominants, tous les essais sont menés en similitude de Froude. Dans ces conditions, peut-on projeter avec fiabilité les résultats sur prototype?

Monsieur R.M. Boes a étudié en particulier les effets d'échelle et les limites d'application des essais sur modèle. Les mesurés de profils verticaux de concentration d'air et de vitesse à différentes échelles montrent que ces effets sont négligeables pour des nombres de Reynolds supérieurs à 105 et de Weber supérieurs à 100 ainsi que pour des installations d'échelle supérieure au 1:15 (pour des marches standards d'ouvrages en BCR). Autrement, ils deviennent importants, mais heureusement conduisent à des résultats du côté de la sécurité: l'aération est sous-estimée (l'impact

de l'écoulement sur la structure est donc surestimé) et les vitesses sont surestimées (la quantité d'énergie dissipée est donc sous-estimée).

Régimes d'écoulement

Deux régimes d'écoulement peuvent être observés sur les évacuateurs de crue en escalier, selon le débit spécifique, la hauteur d'eau critique sur la crête, la pente et les dimensions des marches:

- Le régime en nappe («nappe-flow»), pour des débits ou pentes faibles. L'écoulement heurte chaque marche comme un jet et au-dessous, une cavité d'air est piégée.

Deux types de «nappe flow» ont été observés par Pinheiro, A.N., et Fael, C.S.:

- celui isolé avec le développement partiel ou total d'un ressaut hydraulique en aval de l'impact du jet sur la marche,
- celui partiel, où seul une partie de la nappe d'eau vient au contact de la marche, le reste décollant.



Figure 2. «Nappe flow» sur un escalier.
(André, S., LCH 1999)

- Le régime en mousse («skimming flow»), pour les grands débits et les fortes pentes. L'écoulement mousse au-dessus des marches, amorti par des cellules de recirculation emprisonnées entre les marches. Les techniques de visualisation utilisées par Sánchez Juny, M., et al., mettent en valeur l'existence de deux couches:

- la couche supérieure au-dessus du «pseudo-fond» constitué par les arrêtes des marches, quasi-uniforme en aval du point de début d'aération,



Figure 3. «Skimming flow» sur un escalier.
(André, S., LCH 1999)

- la couche inférieure, sous ce «pseudo-fond», contenant des cellules de recirculation tridimensionnelles.

La surface entre ces deux couches, lieu de cisaillements importants, fluctue: soit elle heurte les arrêtes des marches, soit elle passe au-dessus.

Comme décrit notamment par Fratino, U., et al., le passage d'un régime à l'autre se fait par une phase de transition difficile à décrire car les caractéristiques des deux régimes interviennent. L'écoulement est très instable, mais aucune vibration ou autre manifestation violente n'a été remarquée sur modèle. Cette phase reste à être étudiée.

Il est à noter que le phénomène de «Roll waves» (forme d'instabilité de l'écoulement) a été observé dans de nombreux essais mais n'a pas fait l'objet d'étude particulière.

Critère d'initialisation des régimes

La détermination du critère d'initialisation des régimes de «nappe flow» et «skimming flow» a fait l'objet de nombreuses études analytiques mais surtout empiriques. Les synthèses graphiques des lois-critères existantes et des points expérimentaux mettent en évidence la grande dispersion des résultats. Il n'est pas encore possible de caractériser les critères d'initialisation en une formulation générale.

Cellules de recirculation

Comme mentionné précédemment, ces cellules (ou vortex) de recirculation, piégées au pied de la marche, sous la nappe supérieure d'eau quasi-uniforme, sont caractéristiques du «skimming flow».

L'analyse vidéo de cette structure turbulente (Mateos Iguácel, C., et Elviro García, V.; Yasuda, Y., et Ohtsu, I.) met en évidence que le fluide, emprisonné dans la cellule, tourne avec des fréquences et pendant des durées différentes, pour être éjecté par la suite à fréquences irrégulières dans l'écoulement principal. A ce comportement complexe s'ajoute la tridimensionnalité des courants de circulation.

Les techniques de visualisation actuelles demandent à être améliorées pour quantifier avec fiabilité la taille des cellules, leur vitesse de rotation, les pressions et fréquences mises en jeu, ce qui permettrait de mieux comprendre leur contribution à la dissipation de l'énergie.

Début d'entraînement d'air («point of inception»)

Les marches sont le «catalyseur» de l'aération naturelle de l'écoulement. Elles sont en effet responsables de l'augmentation de la couche limite turbulente qui, lorsqu'elle atteint la surface libre de la nappe d'eau, provoque l'entraînement d'air.

La localisation du point de début d' entraînement d'air est d'un grand intérêt pour l'ingénieur car il délimite la zone à risque de cavitation. Sa position par rapport à la crête de l'évacuateur dépend principalement de la hauteur des marches, de la pente de l'ouvrage et du débit spécifique. Elle peut être déterminée:

- soit par l'observation sur modèle (Chamani, M.R.; Hager, W.H., et Boes, R.M.),
- soit par l'analyse des profils de concentration d'air (Matos, J., et al.).

Cette dernière technique place le début de l'aération plus en amont que l'observation, avec une profondeur d'eau locale plus faible. Cette différence vient de la difficulté d'observation objective de l'écoulement fortement turbulent.

Pressions sur l'escalier

Les mesures de pressions moyennes pour le «skimming flow» montrent que celles-ci ne sont négatives que sur la face verticale des marches, et d'autant plus au voisinage de l'arrête extérieure.

Dans le détail, les mesures continues des pressions, menées par Sánchez Juny, M., et al., font apparaître que:

- Le long de l'évacuateur, les fluctuations de pression sont beaucoup plus importantes en amont du point de début d'aération. C'est dans cette zone également et sur les faces verticales des marches que résident les pressions minimales et négatives.
- Sur la marche elle-même, les pressions restent positives sur la face horizontale et maximales au voisinage de l'arrête extérieure, au niveau de l'impact de la nappe d'eau.
- Les fluctuations de pression reflètent la structure de l'écoulement, mettant en évidence l'existence de la couche supérieure quasi-uniforme et des cellules de recirculation dans la couche inférieure.
- L'ensemble des pressions augmentent sous l'accroissement du débit.

A ce stade de connaissances, il apparaît sur modèle que les pressions minimales restent en dessous de la pression critique pour un risque de cavitation. Mais aucune conclusion n'est tirée quant au prototype.

Cavitation

Les photographies de parement d'évacuateurs de crue lisses, montrées par Minor, H.-E., rappellent que la cavitation est malheureusement d'actualité pour ce type d'ouvrage.

Plusieurs facteurs peuvent initier cette cavitation: les surfaces irrégulières et les joints saillants. La technique utilisée pour l'éviter consiste à aérer artificiellement le parement.

Dans le cas des évacuateurs de crue en escalier, l'aération de l'écoulement est naturelle et le seuil critique de 8% d'air, conseillé pour éviter la cavitation, est assuré près du fond, à une distance en aval du «point of inception» d'environ six fois la hauteur d'eau en ce point (Matos, J., et al.). Le risque de cavitation persiste donc à l'amont de cette limite, d'autant plus que dans cette zone, les pressions sur les faces verticales des marches sont négatives et fluctuent fortement.

Coefficient de frottement

La détermination du coefficient de frottement d'un évacuateur de crue en escalier reste un point plutôt obscur pour l'ingénieur chargé du dimensionnement. Si l'on se penche en effet sur la représentation graphique proposée par Chanson, H., et al., qui synthétise les coefficients de frottement obtenus sur de nombreux modèles, on ne peut que constater la grande dispersion des résultats pour des conditions comparables.

Contrairement aux évacuateurs de crue lisses, sur les escaliers, les pertes de charge sont surtout dues aux effets de forme (impact du jet sur la marche, ressaut hydraulique, décollement, cellule de recirculation), plus qu'au frottement sur les marches. De plus, l'écoulement n'est pratiquement jamais uniforme et il est très aéré. Par conséquent, utiliser les lois classiques de pertes de charge telles que Manning-Strickler ou Darcy-Weisbach peut être considéré comme «un abus d'application».

Chanson, H., et al. proposent alors de déterminer le coefficient de frottement à partir de l'équation de conservation de la quantité de mouvement et, sur cette base, de définir:

- une loi expérimentale de type Colebrook-White pour les faibles chutes (pente inférieure à 20°),
- une loi analytique adimensionnelle ajustée aux mesures pour les fortes pentes (supérieures à 20°),

prenant en compte l'aération de l'écoulement.

L'ensemble des auteurs affirment que le coefficient de frottement diminue lorsque la profondeur d'eau en amont augmente. Par contre, ce coefficient augmente avec la rugosité relative (hauteur de la marche \times cosinus de la pente de l'ouvrage) pour les ouvrages de pentes inférieures à 45° environ. Cette tendance semble s'inverser pour les pentes plus fortes (Peruginelli, A., et Pagliara, S.; Boes, R.M., et Minor, H.-E.), mais ce point reste à être étudié plus en détail, de même que l'effet de la forme de la marche.

Dissipation d'énergie

Comme mentionné ci-dessus, l'énergie est

essentiellement dissipée par la turbulence provoquée par les marches.

Deux méthodes de détermination du taux d'énergie dissipée ressortent des présentations:

- l'une directe, qui prend en compte le coefficient de frottement (équation de perte de charge le long du coursier), ce qui implique la mesure de la hauteur d'eau et/ou de la vitesse du mélange eau-air ainsi que de la concentration en air,
- l'autre indirecte, qui consiste à calculer l'énergie résiduelle en pied de chute sur la base des mesures des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique dans le bassin de dissipation et de l'équation de conservation de la quantité de mouvement.

Une comparaison des résultats entre ces deux méthodes n'est pas proposée.

Quant à l'optimisation de la quantité d'énergie dissipée, les études comparatives sur modèles (canal lisse, en escalier et en enrochement, Peruginelli, A., et Pagliara, S.) montrent que:

- pour les faibles pentes, ce sont les enrochements qui dissipent le plus d'énergie,
- pour les évacuateurs de crue en escalier, l'addition d'une rugosité sur les marches rectangulaires ou d'un rebord («end-sill») augmente le taux de dissipation,
- les marches larges sont de meilleurs dissipateurs que les marches courtes,
- les chanfreins importants de 45° sur l'arrête des marches, quoique positifs du point de vue constructif (réduction des pressions sur l'extrémité des marches à l'impact de la nappe d'eau) diminuent significativement la quantité d'énergie dissipée (Mateos Iguacel, C., et al.),
- la quantité d'énergie dissipée diminue avec l'augmentation du nombre de marches et de la hauteur critique en amont, quelque soit la pente,
- le taux de dissipation augmente avec la pente pour le «skimming flow» alors que la tendance s'inverse pour le «nappe flow».

Les essais menés par Yasuda, Y., et al. sur des évacuateurs de crue lisses et en escalier montrent que la zone du ressaut en pied de chute est fortement réduite grâce aux marches (jusqu'à 50% pour des pentes supérieures à 19° et des profondeurs d'eau importantes dans le bassin de dissipation). L'effet dissipateur des marches permet donc de réduire significativement l'énergie résiduelle et donc la taille du bassin de dissipation.

De tous les essais sur modèle ressortent différentes expressions de la perte d'énergie donnant souvent des ordres de grandeurs dispersés.

Distance crête de l'évacuateur – première marche

La configuration optimale proposée par Mateos Iguacel, C., et al., ainsi que Boes, R.M. consiste en une crête en ogive suivie, à une distance très proche, des premières marches d'abord de très faibles hauteurs, puis qui augmentent progressivement jusqu'à atteindre le point de tangente («point of tangency») du parement. Cela évite le décollement de l'écoulement au début de l'escalier et décale le début de l'entraînement d'air au maximum vers l'amont.

La discussion reste ouverte car cet aspect a été peu étudié sur modèle.

Bloc de stabilisation sur les petits barrages submersibles

Le cas des escaliers constitués par des blocs se rencontre principalement pour des barrages-digues submersibles, soumis à de faibles débits spécifiques. Ces blocs protègent le parement contre l'érosion lors de la submersion et assurent la stabilité de l'ouvrage.

Contrairement à la technique du béton compacté au rouleau, c'est l'hydrodynamique de l'écoulement qui est utilisée pour stabiliser les blocs préfabriqués en béton: les pressions induites par l'impact de la nappe d'eau ou les cellules de recirculation, ainsi que le dispositif d'infiltration entrent en synergie pour plaquer le bloc contre le parement. Les résultats sur prototypes sont convaincants.

Deux spécialistes dans ce domaine, Baker, R., et Frizzell, K.H., fournissent les règles de dimensionnement des blocs et décrivent en détail le comportement hydraulique de l'écoulement sur l'escalier, comparable, d'ailleurs, à celui sur les ouvrages en BCR.

Technique du béton compacté au rouleau (BCR)

Cette technique s'utilise de plus en plus fréquemment pour construire les barrages ou réhabiliter des ouvrages existants car les avantages sont nombreux: coût faible, facilité de construction, effet dissipateur des marches, meilleure intégration dans le paysage.

Ditchey, E.J., et Campbell, D.B., décrivent les différentes variantes de cette technique de construction, développées pour s'adapter aux conditions hydrologiques, climatologiques et géologiques particulières à chaque site.

Construire un barrage en BCR consiste à couler sur place une couche uniforme de béton frais, peu fluide, et à la compacter au rouleau en une couche standard de 30 cm de hauteur (jusqu'à 1,2 m par superposition de plusieurs couches). L'empilement des couches de plus en plus étroites conduit à la structure en escalier.

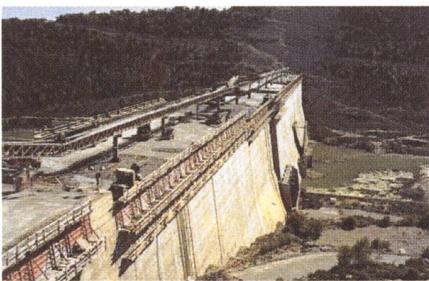


Figure 4. Construction en BCR du barrage de Rialb, Espagne. (Schleiss, A., 1998)

C'est dans la manière d'arrêter la couche de béton que diffèrent les variantes de construction:

- le BCR non coffré, de ce fait peu compacté avec la face verticale extérieure des marches qui prend une pente égale à son angle de repos,
- le BCR arrêté où le béton est coulé contre une paroi d'arrêt temporaire, ce qui permet de mieux le compacter et d'améliorer la finition de la marche,
- le BCR arrêté avec un coffrage conventionnel ou glissant. La structure est alors beaucoup plus résistante et les arrêtes sont bien nettes,
- le BCR avec des éléments d'arrêt préfabriqués en béton pour des marches très résistantes et durables,
- le BCR enrichi au mortier, coulé sur la surface non compactée de la couche puis consolidé par vibration pour un escalier à surface lisse, très résistant.



Figure 5. Construction en BCR du barrage de Knellpoort, Afrique du Sud. (Water Power & Dam Construction, novembre 1989)

Accidents sur les évacuateurs de crue en escalier

Hubert Chanson, avec son expérience des ouvrages en escalier, a clos le séminaire en montrant, à travers un film, les deux seuls cas de mauvais fonctionnement d'évacuateurs de crue en escalier. La «faille» ne venant pas des escaliers eux-mêmes mais de la mauvaise conception de l'ouvrage sur le site, il y a ainsi de quoi être rassuré sur la fiabilité de telles structures!

Tous ces travaux de recherche réalisés sur le comportement hydraulique des écoulements sur escalier pentu, conduisent

aux réponses attendues par l'ingénieur. Elles concernent les règles de dimensionnement des évacuateurs de crue en escalier rectangulaire (BCR) ou formé avec des blocs. Sans les énoncer, puisqu'elles sont décrites dans les «proceedings», il est à noter cependant qu'elles permettent d'estimer pour des conditions hydrologiques données:

- le type du régime d'écoulement attendu,
- la localisation du point de début d'entraînement d'air,
- la délimitation de la zone à risque de cavitation,

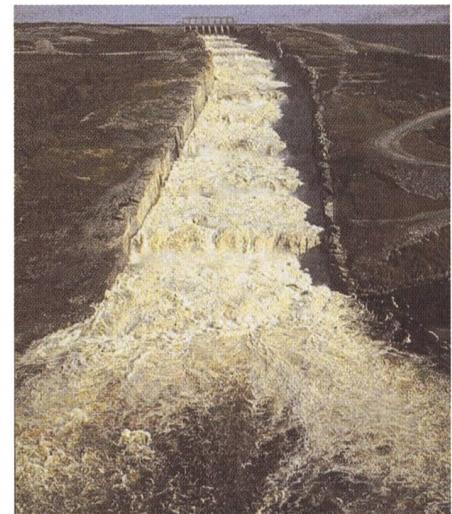


Figure 6. Evacuateur de crue en cascade de la Grande, Canada 1984.

- le dimensionnement des marches et la qualité du béton,
- la quantité d'énergie résiduelle en pied de chute,
- les dimensions des murs bajoyers de protection.

Quelques progrès sont encore attendus, notamment sur la détermination plus précise du coefficient de frottement (donc de l'énergie dissipée), les contraintes attendues sur les marches ou encore la forme optimale des marches pour dissiper au mieux l'énergie. L'ingénieur ou le chercheur peut tout de même être rassuré quant à l'avenir des «stepped spillways» puisque les quelques ouvrages existants ont résisté à de fortes crues et sont toujours intacts.

Référence

Minor, H.-E., Hager, W. H. (2000): «Proceedings of the international workshop on Hydraulics of Stepped Spillways». A.A. Balkema: Rotterdam, Brookfield. ISBN 90 5809 135X, march 22–24, 2000.

Adresse de l'auteur: Stéphanie André, docteure, Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH), Département de Génie Civil, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, CH-1015 Lausanne. E-mail: stephanie.andre@epfl.ch