

GESTION DU CHARRIAGE SUR LE TORRENT DE MILIBACH POUR LA PROTECTION CONTRE LES INONDATIONS

OPTIMISATION SUR MODÈLE PHYSIQUE

MANAGEMENT OF THE BEDLOAD TRANSPORT OF THE MILIBACH TORRENT FOR FLOOD PROTECTION PURPOSE

A PHYSICALLY-BASED MODEL STUDY

Fadi Hachem¹, Beatrice Herzog², Jean-Louis Boillat³ and Anton Schleiss⁴

RESUME

Le torrent du Milibach présente une capacité hydraulique insuffisante conduisant à des débordements fréquents dans le village de Meiringen notamment. Ce manque de capacité est dû essentiellement à l'accumulation de sédiments dans le lit du cours d'eau pendant les crues. Une solution pour retenir une partie des sédiments charriés et ainsi réduire le flux solide à l'amont de la région à risque a été proposée. Elle consiste en un réaménagement du cours d'eau et en la création de terrasses de déposition sédimentaire sur la rive gauche adjacente. Un modèle physique a été réalisé pour optimiser le projet expérimentalement. Les améliorations ont essentiellement porté sur l'intégration de seuils dans le cours d'eau et de digues transversales sur les terrasses d'alluvionnement.

Mots-clés: Risque d'inondation, charriage, terrasse d'alluvionnement, modèle physique.

ABSTRACT

The Milibach torrent has a limited hydraulic capacity leading to frequent flooding, particularly in the village of Meiringen. The deficit of the river flow capacity is essentially caused by the decrease of the cross-sectional area due to local sediment deposition in the river bed. A protection concept has been proposed aiming to retain a proportion of the river bed load and thus reduce the sediment transport towards the downstream part of the river. The solution consists in adjusting the river channel and creating sediment deposition terraces on its left hand side. The optimization of the project has been done by physical modeling where several configurations were built by adding weirs across the river bed and transversal dikes on the deposition terraces.

Keywords: Flood risk, bed load, sediment deposition terraces, physical model.

INTRODUCTION

Le cours d'eau du Milibach, affluent de l'Aar, prend sa source dans la région de Gummen qui fait partie du bassin versant situé entre Oberhasli et le Canton d'Obwald en Suisse. La vallée de Gummen est couverte d'une couche de débris schisteux relativement importante, qui alimente en sédiments le Milibach pendant les épisodes de forte pluie. Avant de se jeter dans l'Aar, le Milibach traverse les communes de Hasliberg Reuti et de Meiringen. Sa capacité de transport solide diminue sensiblement à Meiringen (moins de 75% de capacité par rapport au tronçon entre Hasliberg Reuti et Meiringen) sous l'effet d'une réduction de sa pente longitudinale. Les sédiments charriés ont alors tendance à se

¹ Dr. Ing. Project Manager, Stucky SA, Renens, Suisse (email: fhachem@stucky.ch)

² Directrice de Herzog Ingenieure AG, Dorfstr. 10, 3073 Gümliigen, Suisse (email: herzog@herzog-ingenieure.ch)

³ Dr. Ing. Chemin de la Brotte 4, 1163 Etoy, Suisse

⁴ Prof. Directeur du Laboratoire de Constructions Hydrauliques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse

déposer sur ce tronçon, conduisant à des débordements pendant les fortes crues. Ce phénomène a été observé durant l'événement d'août 2005, au cours duquel une grande superficie de l'agglomération de Meiringen a été inondée par le débordement du Milibach. La Figure 1 présente la situation générale de la région du projet et indique les débordements de crue observés en 2005 à Meiringen et à Reuti. La Figure 2 montre l'état d'un tronçon du Milibach à Reuti après le passage de la crue de 2005.

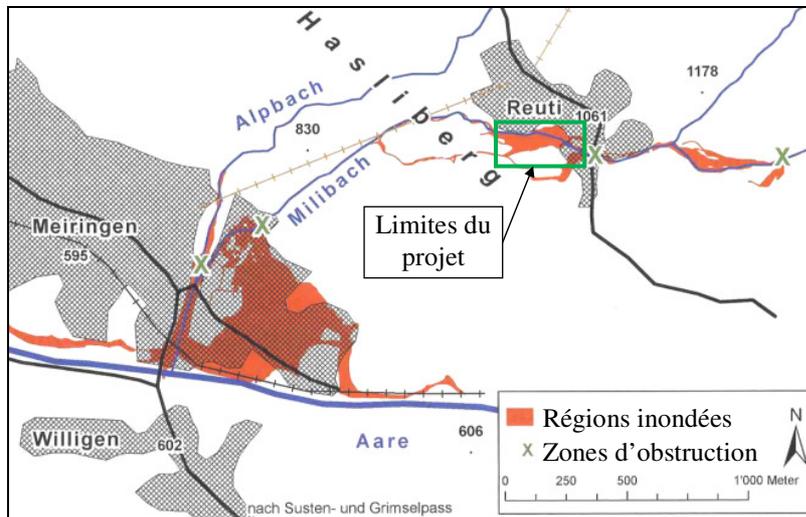


Fig. 1 Plan de situation montrant les limites du projet et les zones inondées lors de la crue de 2005

Fig. 1 Situation map showing the project location and the flooded zones during the 2005 flood event



Fig. 2 Tronçon du Milibach à Reuti après la crue de 2005

Fig. 2 Milibach reach at Reuti after the 2005 flood

Dans le but de résoudre le problème d'alluvionnement et de débordement du Milibach à Meiringen, le bureau d'études "Herzog Ingenieure SA" a proposé une solution d'aménagement du cours d'eau en amont des localités. Elle consiste à créer une zone d'alluvionnement sédimentaire à Reuti pour stocker un certain volume de sédiments durant les crues et ainsi réduire le transport solide à l'aval de cette zone. La charge solide résiduelle peut ensuite traverser Meiringen sans former de dépôts dans le cours d'eau, la capacité hydraulique de ce dernier étant alors suffisante pour faire transiter la crue centennale de dimensionnement. Il faut noter que toutes les crues historiques antécédentes et particulièrement celle de 2005, ont montrées que le transport sédimentaire est résolument associé à un processus de charriage, même si la remobilisation locale de dépôt alluvionnaire peut faire penser à un mécanisme de laves torrentielles.

Bien qu'il ne s'agisse pas d'une problématique nouvelle, la gestion sédimentaire des cours d'eau est aujourd'hui d'une grande actualité. La cause de cette préoccupation est liée à de nombreux facteurs, parmi lesquels les effets anthropiques et les changements climatiques occupent une place importante. De nombreux projets de bassins de rétention sédimentaire dans le cours d'eau même ont ainsi été projetés durant les dernières années (Meile et al., 2004; Boillat et al., 2009; Müller et al., 2010). Une nouvelle tendance, consistant à dériver les sédiments excédentaires en dehors du cours d'eau, tend actuellement à se renforcer (Studer et al., 2010; Ghilardi et al. 2012). Les conditions locales propres à chaque situation ne permettent cependant pas de généraliser les solutions trouvées. Il en est ainsi pour le présent projet, à caractère novateur et dont la situation locale particulière impose l'épandage de sédiments dans la zone riveraine du cours d'eau. Dans ces conditions, il a été décidé d'optimiser le système par des essais sur modèle physique.

Cet article décrit le projet d'aménagement, présente l'étude expérimentale faite au Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), et illustre les étapes de réalisation de la solution finale optimisée.

DESCRIPTION DU PROJET

Le projet consiste à aménager trois zones d'épandage en rive gauche du cours d'eau, sur une longueur de 350 m environ. La construction d'un nouveau pont routier entre les terrasses 1 et 2, ainsi que l'adaptation du tracé, du profil en long (réduction de la pente du lit de 13% à 5%) et de la section

transversale du cours d'eau existant font également partie du projet proposé par le Bureau d'ingénieurs (Figs. 3, 4 et 5). La réduction de la pente longitudinale est obtenue par l'implantation de deux rampes en blocs à l'extrémité aval des terrasses 2 et 3.

Les hydrogrammes de dimensionnement du projet sont présentés sur la Figure 6. Les deux évènements centennaux (HQ100, averse et longue durée) sont utilisés pour optimiser le projet, avec l'objectif que le volume solide transitant à l'aval ne dépasse pas 25% du volume entrant. Une fois la solution finale optimisée, une crue extrême (EHQ) est simulée pour évaluer le risque résiduel. Une crue à deux pics consécutifs de période de retour de 30 ans est également examinée pour tester la robustesse du système en cas de crues successives. Un intervalle de 12 heures avec un débit de base conséquent de $2 \text{ m}^3/\text{s}$ (crue annuelle) est considéré pour séparer les deux crues de la Fig. 6d. Un débit de $5 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondant à une période de retour de 7 ans, a été choisi pour définir le débit seuil de débordement du cours d'eau en rive gauche.

Les débits sédimentaires à l'entrée de la zone de projet ont été estimés par la formule VAW 1983 (Smart et Jäggi, 1983), qui permet de calculer la capacité de transport solide du bief du cours d'eau à Milchhäuslibrücke juste en amont de Reuti. Dans cette estimation, la section du cours d'eau est considérée comme rectangulaire de largeur égale à 4 m, la pente longitudinale est uniforme et égale à 10% et la rugosité de surface correspond à un coefficient de Strickler $K=25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. Une série d'analyses granulométriques du mélange sédimentaire déposé après l'évènement de crue de 2005 montre que le diamètre moyen des grains, d_m , est de 11 cm environ. Ce résultat est confirmé par les levés en ligne effectués sur le site (Fehr, 1987). Sur la base de ces investigations, les diamètres caractéristiques des sédiments transportés par le Milibach s'établissent comme suit: $d_{90} = 30 \text{ cm}$, $d_m = 11 \text{ cm}$ et $d_{30} = 1 \text{ cm}$.

Les solidogrammes calculés, correspondant à chacun des hydrogrammes considérés, sont représentés sur la Figure 6.

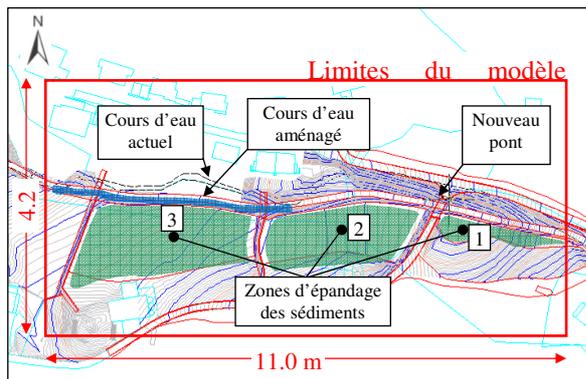


Fig. 3 Vue en plan topographique et limites du modèle physique à l'échelle 1/30

Fig. 3 Topographic plan view and limits of the physical 1/30 scaled model

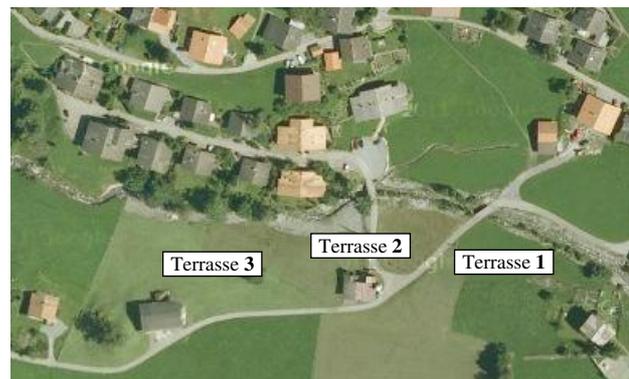


Fig. 4 Emplacement des terrasses 1, 2 et 3 en situation non aménagée

Fig. 4 Location of terraces 1, 2 and 3 before the implementation of the project

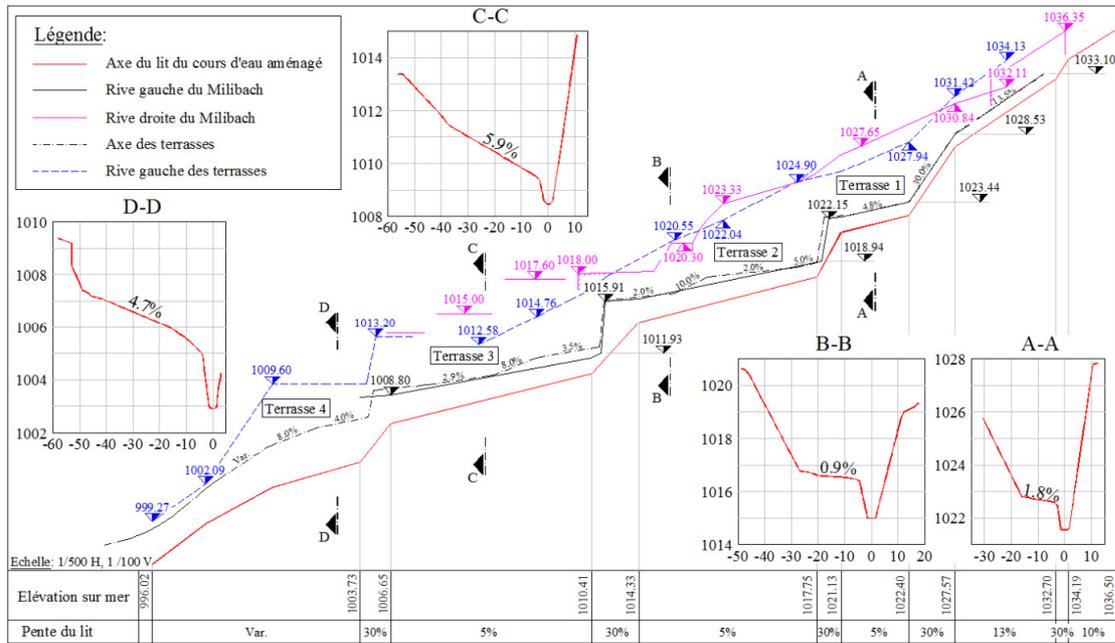


Fig. 5 Profil en long et sections transversales caractéristiques du projet initial
Fig. 5 Longitudinal profile and typical cross-sections of the original project

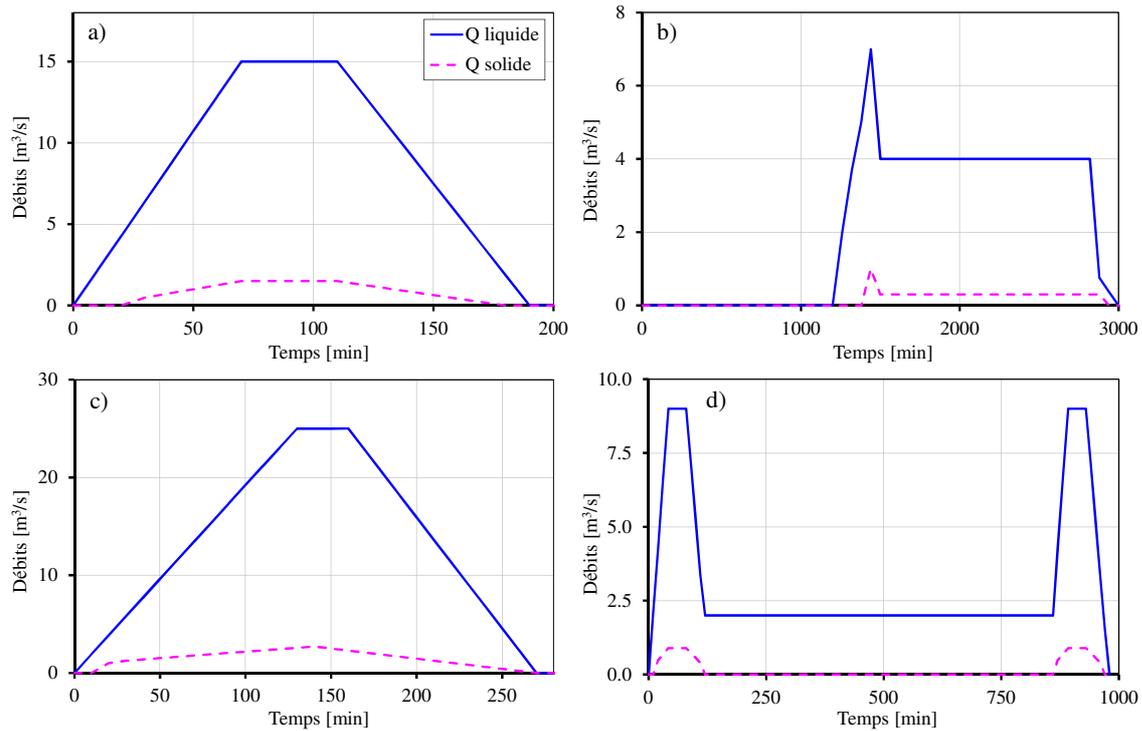


Fig. 6 Hydrogrammes et solidogrammes utilisés pour l'optimisation et la vérification du projet: a) HQ100, ($Q_{\max}=15 \text{ m}^3/\text{s}$, averse); b) HQ100, ($Q_{\text{constant}}=7 \text{ m}^3/\text{s}$, longue durée); c) EHQ ($Q_{\max}=25 \text{ m}^3/\text{s}$); d) deux crues moyennes consécutives, ($Q_{\max}=9 \text{ m}^3/\text{s}$)

Fig. 6 Water and sediment hydrographs used to optimize and verify the project: a) HQ100, ($Q_{\max}=15 \text{ m}^3/\text{s}$, storm); b) HQ100, ($Q_{\text{constant}}=7 \text{ m}^3/\text{s}$, long duration); c) EHQ ($Q_{\max}=25 \text{ m}^3/\text{s}$); d) two consecutive medium floods, ($Q_{\max}=9 \text{ m}^3/\text{s}$)

MODELISATION PHYSIQUE

Le modèle a été construit à l'échelle 1/30 dans les limites indiquées sur la Figure 3. La topographie a été façonnée à l'aide de sable déposé entre des profils en travers en PVC. Ce support a été couvert

d'une mince couche de mortier de ciment pour reproduire la topographie du cours d'eau et des zones d'épandage (Fig. 7).

Le modèle a été exploité en similitude de Froude selon les transformations données au Tableau 1. Le débit amont était assuré par pompage et mesuré à l'aide d'un déversoir triangulaire à la sortie d'un bassin amont équipé d'un limnimètre. Les sédiments étaient injectés manuellement dans le tronçon à forte pente du cours d'eau situé à l'entrée du modèle.

Le mélange sédimentaire a été préparé à partir de plusieurs classes de sédiments dans le but de reproduire la courbe cible correspondant à la distribution granulométrique du lit du cours d'eau. La Figure 8 montre la courbe granulométrique cible à l'échelle du modèle et celle du mélange utilisé.

A la fin de chaque essai, un bilan volumétrique sédimentaire était établi. Ce bilan inclut le volume retenu dans le cours d'eau et les zones d'alluvionnement. L'efficacité de chaque configuration testée a été évaluée sur la base du rapport des volumes de sédiments stockés et injectés dans le modèle ainsi que sur le respect de l'objectif opérationnel de l'aménagement (moins de 25% du volume solide transitant vers l'aval). Après chaque essai, des profils transversaux sur les sédiments déposés ont été levés en plusieurs sections réparties sur l'ensemble du modèle. L'évolution des dépôts dans le cours d'eau au passage du pont routier traversant le Milibach a été suivie en permanence afin d'évaluer le risque d'obturation par les sédiments. Des photos zénithales ont également été prises à intervalle de temps régulier pour suivre le développement du processus dynamique de déposition de sédiments dans les différentes zones d'épandage.

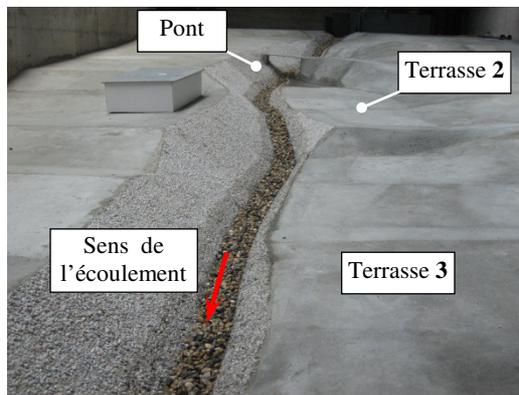


Fig. 7 Photo du modèle physique, construit conformément au projet du Bureau d'ingénieurs
Fig. 7 Photo of the physical model built according to the Consultant Engineer's project

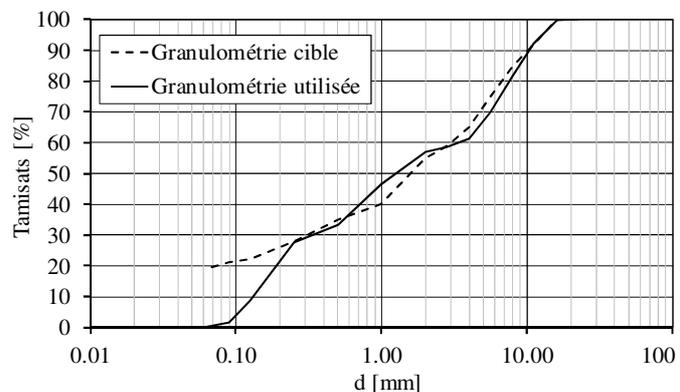


Fig. 8 Courbe granulométrique cible des sédiments à l'échelle du modèle et celle du mélange utilisé dans les essais
Fig. 8 Grain size curves of prototype sediments adapted to the model scale and sediment mixture used for the tests

Tab. 1 Facteurs d'échelle des principaux paramètres du modèle physique

Tab. 1 Scale factors of the main parameters of the physical model

Paramètre physique	Rapport d'échelle	Facteur d'échelle
Longueur [m] / Pression [m de colonne d'eau]	$L_p/L_m = P_p/P_m = \lambda$	30
Vitesse [ms^{-1}] / Temps [s]	$V_p/V_m = t_p/t_m = \lambda^{1/2}$	5.48
Débit [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]	$Q_p/Q_m = \lambda^{5/2}$	4930

L représente les longueurs, *P* les pressions en mètre de colonne d'eau, *V* les vitesses de l'écoulement, *t* le temps, *Q* les débits et λ le facteur d'échelle. Les indices *p* et *m* correspondent aux mesures effectuées sur prototype et modèles, respectivement.

L represents the lengths, *P* the pressures in meter of water column, *V* the flow velocities, *t* the time, *Q* the discharge and λ the scale factor. The subscripts *p* and *m* correspond to the measurements carried out in the prototype and the model, respectively.

RESULTATS

Après une série d'essais préliminaires à débit constant de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ et un apport sédimentaire de l'ordre de $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$, il s'est avéré que la configuration initiale proposée ne favorise pas les dépôts sédimentaires dans les zones prévues. La pente longitudinale du lit du cours d'eau à 5% est trop raide, générant des vitesses d'écoulement et une capacité de charriage trop élevées. Dans ces conditions, l'écoulement reste concentré dans le lit du cours d'eau et les débordements ne se produisent pas

comme souhaité, notamment le long de la troisième terrasse d'alluvionnement. La pente transversale de cette zone de dépôt (égale à 5%) se révèle trop importante. Sur la base de ces premières observations, les modifications suivantes ont été apportées au modèle:

- réduction supplémentaire de la pente du lit du cours d'eau pendant des événements de crue, par l'implantation de quatre seuils avec grilles de 90 cm de hauteur sur prototype (3 cm sur modèle) pour retenir les matériaux charriés ;
- construction de deux épis (petites digues de 1.5 m de hauteur à l'échelle prototype) à la limite aval des terrasses 2 et 3 ; la fonction de ces ouvrages est de guider la restitution de l'eau vers le cours d'eau ;
- aplanissement de la 3^{ème} terrasse en réduisant sa pente transversale de 5% à 1% ; ce réaménagement a été effectué par une rotation de la plate-forme de 4% autour de la ligne de la rive gauche du cours d'eau ;
- ajout d'une rugosité de surface sur le croûtage en ciment du modèle, afin de mieux reproduire la résistance due à la végétation sur les terrasses 2 et 3.

La nouvelle configuration du projet est illustrée par un dessin schématique en 3D (Figure 9) et représentée sur le modèle par la photo de la Figure 10. L'efficacité et la robustesse du nouvel aménagement ont été évaluées par simulation des crues présentées à la Figure 6.

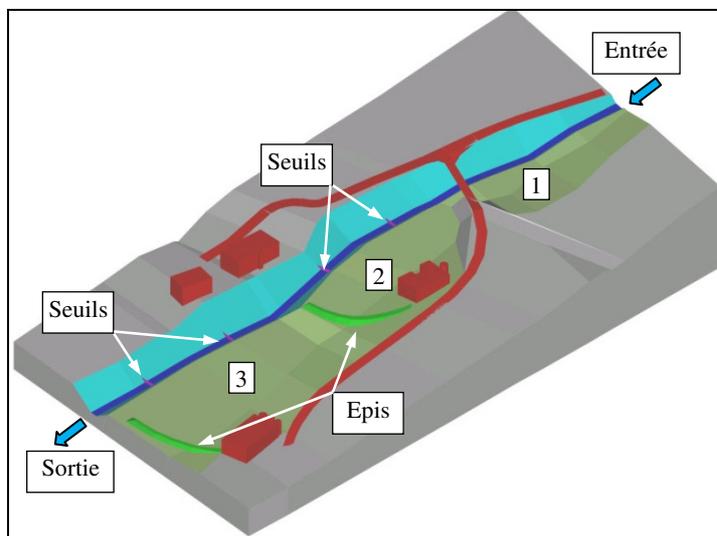


Fig. 9 Schéma 3D du projet incluant les modifications apportées à la suite des essais préliminaires

Fig. 9 Schematic 3D view of the project including the modifications completed after the preliminary tests

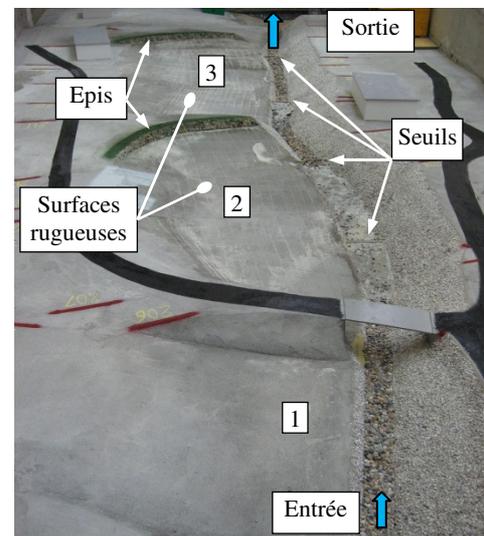


Fig. 10 Le modèle physique modifié après les essais préliminaires

Fig. 10 The physical model as modified after the preliminary tests

Pour la crue centennale de la Fig. 6a (HQ100, $Q_{max}=15 \text{ m}^3/\text{s}$, averse), le bilan des volumes de sédiments déposés sur le modèle à la fin de l'essai montre que la nouvelle configuration retient environ 91% du volume sédimentaire provenant de l'amont. Le volume solide déposé sur les zones d'épandage est réparti à raison de 11% sur la terrasse 1, 45% sur la 2 et 44% sur la 3. Grâce aux mesures périodiques effectuées durant l'essai, l'évolution temporelle du débit liquide ainsi que des volumes solides introduits et sortant du modèle a pu être reconstituée (Fig. 11a). Le volume de sédiments sortant (courbe verte de la Fig. 11a), montre un léger dépassement du seuil limite imposé, pendant la période située entre 23 et 26 minutes du début de l'essai. Le maximum de débit solide sortant du modèle a été détecté à la fin du palier maximal de la crue, lorsque des sédiments déposés dans le cours d'eau et dans les dépotoirs ont été remobilisés. Il convient de remarquer que les hydrogrammes et solidogrammes théoriques proposés n'ont pas été fidèlement reproduits durant les premiers essais. Des mesures logistiques ont été prises dans le but de mieux respecter ces données pendant la phase d'optimisation du projet.

Pour la crue centennale de longue durée (Fig. 6b), le bilan des volumes sédimentaires après le passage de la crue montre un taux de rétention de l'ordre de 88%. Un dépôt solide conséquent a été observé dans le bief situé à l'amont du pont. A cet endroit, les sédiments s'accumulaient de l'aval vers l'amont

pour atteindre, après 120 minutes d'essai, la limite amont du modèle. Ces dépôts n'ont toutefois pas mis en danger le pont ni la route en rive gauche. Une revanche minimale de 1.05 m à l'échelle prototype (3.5 cm sur modèle) subsistait à la fin de l'essai. Malgré une interruption à la moitié de la durée de test, le système est resté stable avec des débits solides sortants toujours inférieurs aux débits seuils imposés. Pour une crue similaire à l'échelle prototype, le tronçon du cours d'eau pourra se remplir de 12000 m³ de sédiments. Au-delà, le front supérieur des dépôts se développera vers l'amont, hors des limites du tronçon reproduit sur modèle.

Deux essais de crue extrême (Fig. 6c) ont ensuite été réalisés. Etant donné les importantes quantités de sédiments introduites dans le modèle (entre 0.2 et 0.55 l/s), il s'est révélé difficile de reproduire exactement les solidogrammes de base pendant ces essais. La configuration aménagée selon les Figures 9 et 10 s'est avérée capable de retenir environ 35% à 40% des sédiments injectés dans le système lors de ces crues extrêmes. Un pic de débit sédimentaire sortant de l'ordre de 4.9 m³/s prototype (1 l/s sur modèle) a été observé pendant le passage du débit maximal de crue. Un phénomène de lessivage de sédiments s'est également produit durant la séquence comprise entre 18 et 20 minutes du début des essais. Pendant cette période, les sédiments stockés dans le cours d'eau en phase de montée de crue ont été remobilisés sous l'effet de l'augmentation du débit.

Il convient de remarquer, que le volume de stockage de 6480 m³ (240 l sur modèle) représente la capacité maximale du système aménagé sur le Milibach à Reuti en épisode de crue extrême.

Les résultats obtenus par la simulation de deux crues moyennes consécutives montrent que la deuxième crue génère des dépôts sédimentaires supérieurs à ceux de la première. Le volume de sédiments purgés entre les deux crues était de l'ordre de 5.5 m³ sur prototype (0.2 l sur modèle), ce qui constitue environ 2% du volume sortant du modèle. La Figure 11d montre que le débit de sédiments qui transite est bien inférieur au seuil imposé et que le comportement du système face à une telle crue est très stable.

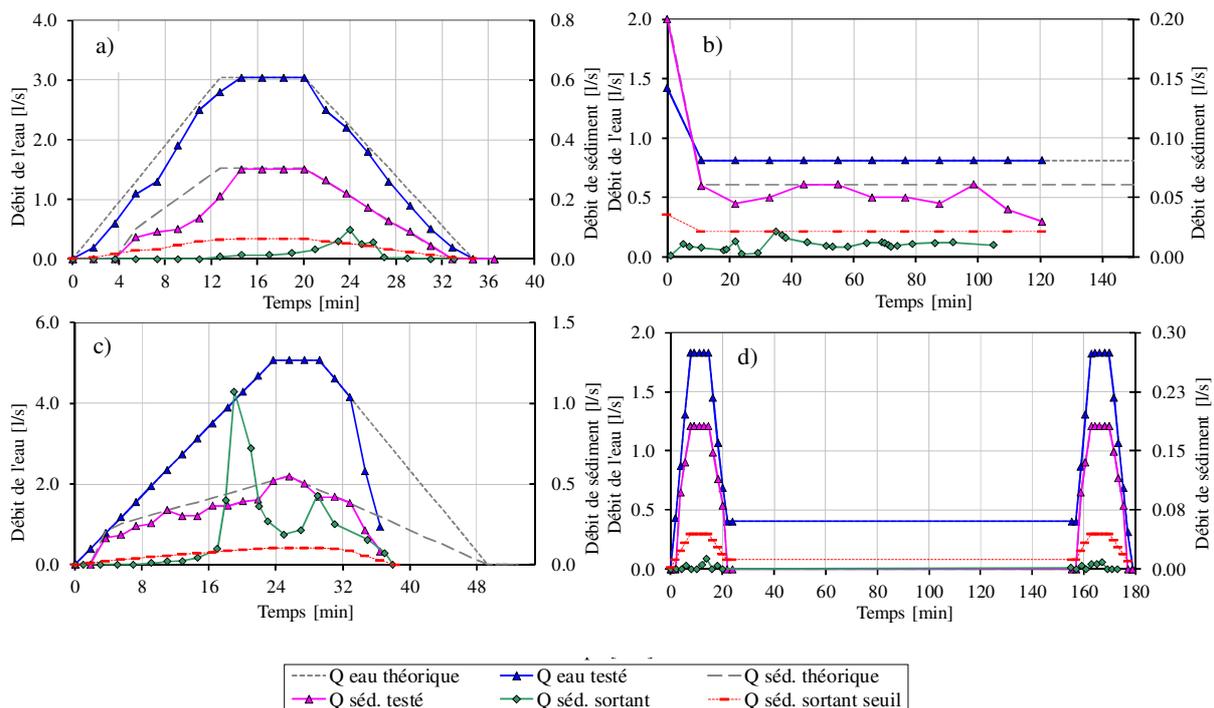


Fig. 11 Evolution temporelle des débits d'eau et de sédiments entrant et sortant du modèle: a) pour la crue HQ100, (Q_{max}=15 m³/s, averse); b) pour HQ100, (Q_{constant}=4 m³/s, longue durée); c) pour EHQ (Q_{max}=25 m³/s); d) pour deux crues moyennes consécutives, (Q_{max}=9 m³/s)

Fig. 11 Time evolution of the water and sediment flows entering and leaving the model: a) for the flood HQ100, (Q_{max}=15 m³/s, storm); b) for HQ100, (Q_{constant}=4 m³/s, long duration); c) for EHQ (Q_{max}=25 m³/s); d) for two consecutive medium floods, (Q_{max}=9 m³/s)

Une première tentative d'optimisation a été réalisée en modifiant la courbure du tracé du cours d'eau au passage des deux dépotoirs situés à l'aval du pont (ajout de deux contre-courbes en rive droite). Cette configuration a été testée avec les crues centennale (averse) et extrême. Les modifications

apportées à la configuration de base dans l'objectif de favoriser l'apport sédimentaire sur les terrasses n'ont pas donné les résultats escomptés. Au contraire, les volumes solides stockés sur le modèle sont restés inférieurs à ceux obtenus précédemment (69% au lieu de 91% pour la crue centennale et 24% au lieu de 40% pour la crue extrême). Il a également été remarqué que la configuration modifiée avait tendance à stocker les sédiments avant le passage du débit maximal de crue, provoquant une remobilisation des dépôts pendant et après le pic de crue. Le changement de courbure du lit favorise l'orientation de l'écoulement vers les zones de dépôt mais aussi la remobilisation des dépôts déjà constitués.

Les changements apportés au modèle durant la première phase d'optimisation ont été supprimés et deux nouvelles modifications ont été introduites. Elles concernent le remplacement des seuils sur le cours d'eau par des grilles. L'objectif visé est de favoriser la migration piscicole et de réduire la pente longitudinale du lit entre les seuils 3 et 4 de 5% à 3% lors des crues. Les hauteurs de grilles ont été fixées de sorte qu'un débit de base de 5 m³/s (période de retour de 7 ans) ne produise pas de débordement en rive gauche après la formation de dépôts par colmatage des grilles. La nouvelle configuration du modèle a été testée en respectant fidèlement les crues de projet de la Figure 6. Les évolutions temporelles mesurées des débits liquides et sédimentaires sont très similaires à celles de la Figure 11.

Cette solution qui répond bien aux objectifs fixés, a été considérée comme optimale. Le volume de sédiments stockés sur le modèle pendant la crue centennale à $Q_{\max} = 15 \text{ m}^3/\text{s}$ représente plus de 90% du volume entrant dans le Milibach à l'amont de Reuti. La Figure 12a montre une comparaison des volumes cumulés entrant et sortant du modèle pendant la crue centennale, pour les configurations avant et après optimisation du projet. Pour la crue extrême (Fig. 12b), la configuration optimisée est capable de retenir jusqu'à 53% des sédiments arrivant de l'amont. Un pic de débit sédimentaire sortant, de l'ordre de 3.7 m³/s sur prototype (0.75 l/s sur modèle), a été observé. La configuration finale du projet est illustrée par les photos de la Figure 13, prises à sec et à la fin des essais. Le profil en long à l'axe du cours d'eau ainsi que les modifications apportées au projet de base sont présentés à la Figure 14.

Le cours d'eau aménagé et optimisé permet le passage d'un débit de base de 5 m³/s sans déversement latéral en rive gauche. Il permet également de retenir les volumes de sédiments présentés dans le Tableau 2.

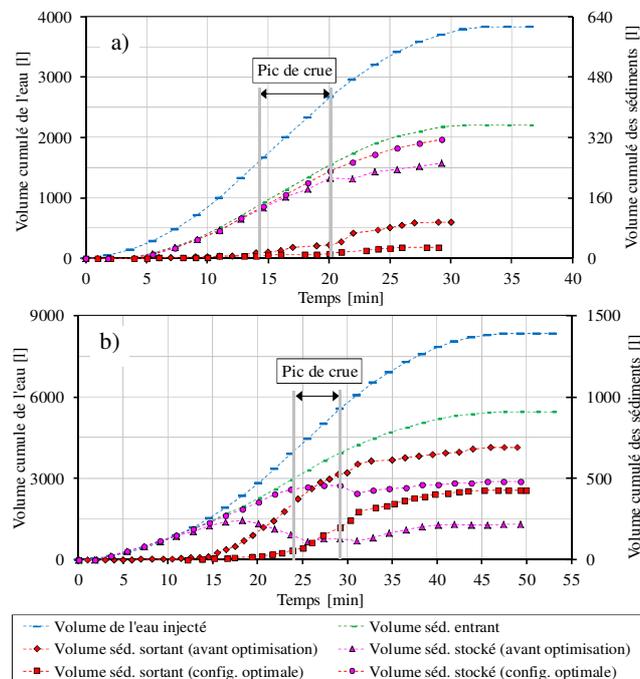


Fig. 12 Evolution temporelle, à l'échelle du modèle, des volumes cumulés de sédiments stockés et transités vers l'aval: a) pour la crue HQ100, ($Q_{\max}=15 \text{ m}^3/\text{s}$, averse); b) pour la crue EHQ ($Q_{\max}=25 \text{ m}^3/\text{s}$)

Fig. 12 Time evolution, at the model scale, of the cumulative volumes of deposited and transited sediments: a) for the flood HQ100, ($Q_{\max}=15 \text{ m}^3/\text{s}$, storm); b) for the flood EHQ ($Q_{\max}=25 \text{ m}^3/\text{s}$)

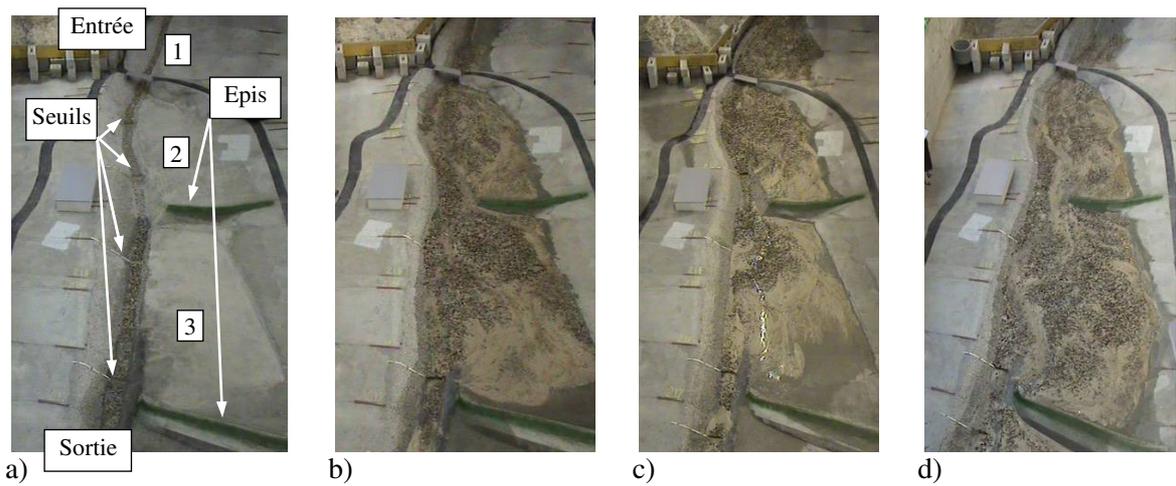


Fig. 13 Vue zénithale de la configuration optimisée sur modèle: a) sans sédiments; b) après HQ100, ($Q_{\max}=15 \text{ m}^3/\text{s}$, averse); c) après HQ100, ($Q_{\text{constant}}=4 \text{ m}^3/\text{s}$, longue durée); d) après la crue extrême EHQ ($Q_{\max}=25 \text{ m}^3/\text{s}$)
Fig. 13 Top view of the optimized configuration on model: a) without sediments; b) after HQ100, ($Q_{\max}=15 \text{ m}^3/\text{s}$, storm); c) after HQ100, ($Q_{\text{constant}}=4 \text{ m}^3/\text{s}$, long duration); d) after extreme flood EHQ ($Q_{\max}=25 \text{ m}^3/\text{s}$)

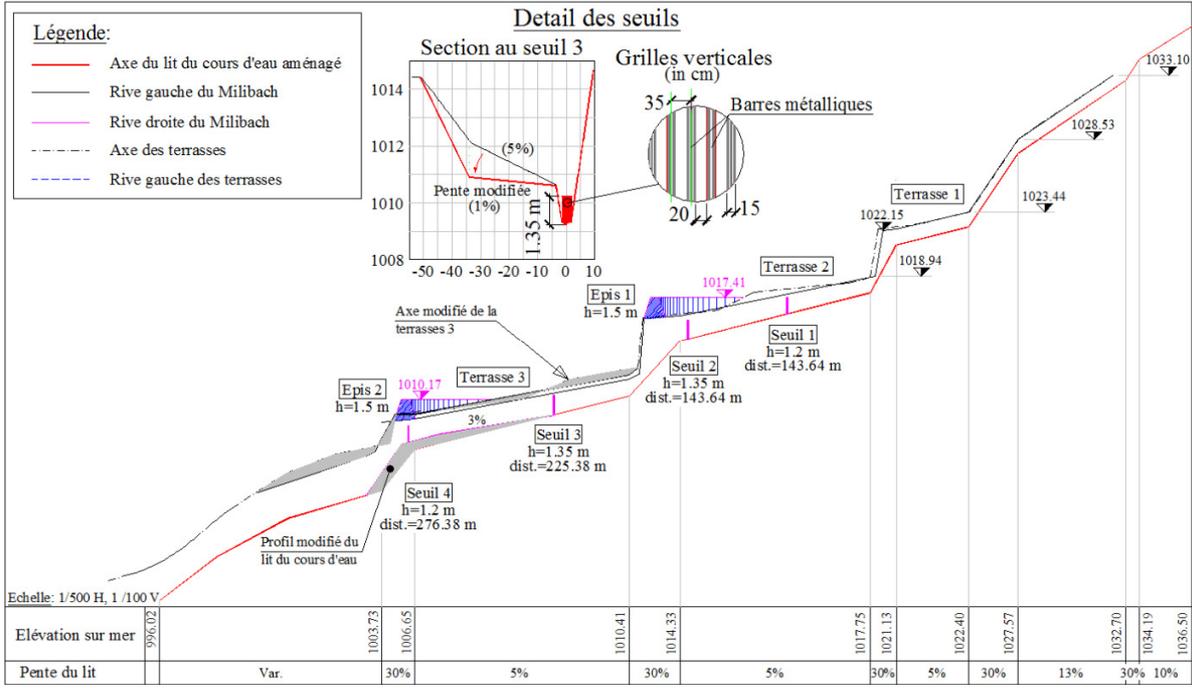


Fig. 14 Profil en long et section transversale à l'axe du seuil 3 du projet optimisé
Fig. 14 Longitudinal profile and cross-section at the weir axis Nr.3 of the optimized project

Tab. 2 Récapitulatif des résultats expérimentaux sur la configuration finale (à l'échelle prototype)
Tab. 2 Summary of the experimental results on the final configuration of the project (prototype scale)

Type de crue	Volume amont de sédiments [m ³]	Volume retenu de sédiments [m ³]	Volume aval de sédiments [m ³]	Rétention [%]
HQ100, ($Q_{\max}=15 \text{ m}^3/\text{s}$, averse)	9400	8630	770	92
HQ100, ($Q_{\text{constant}}=4 \text{ m}^3/\text{s}$, longue durée)	12700	11475	1225	90
EHQ ($Q_{\max}=25 \text{ m}^3/\text{s}$, extrême)	24550	12950	11600	53
Deux crues consécutives, ($Q_{\max}=9 \text{ m}^3/\text{s}$)	8720	8450	270	97

REALISATION DU PROJET

Les enseignements tirés des essais sur modèle physique ont été intégrés au projet d'exécution parallèlement à la réalisation des travaux.

Il a ainsi été observé sur le modèle physique que le retour des écoulements vers le cours d'eau à l'extrémité aval des terrasses s'effectuait à haute vitesse. Afin d'éviter l'érosion à cet endroit, les épis de fermeture des terrasses ont été réalisés sous la forme de murs de soutènement en béton (Figs. 15 et 16). Ce choix s'imposait en raison de la faible résistance du sol limoneux-sableux en place. Ces murs de fermeture dépassent de 1.50 m le niveau de la terrasse amont.

D'autre part, afin de réduire la potentialité de rétention des corps flottants au passage des grilles-seuils, celles-ci ont été réalisées avec des barreaux métalliques horizontaux et non verticaux comme testés sur modèle (Figs. 15 et 17). La grille est dimensionnée de manière à provoquer une perte de charge identique à celle testée sur modèle. Il est en effet démontré en pratique qu'une grille verticale à mailles serrées nécessite davantage de travail de maintenance.

Les extrémités aval des rampes de blocs (Fig. 18) sont stabilisées par des seuils intégrés dans le lit du cours d'eau pour éviter l'affouillement.



Fig. 15 Terrasses 2 et 3 en rive gauche du cours d'eau à la fin des travaux. Les épis de fermeture des terrasses et les grilles-seuils dans le lit sont visibles

Fig. 15 Terraces 2 and 3 on the left side of the river at the end of work. The closing groynes of the terraces and the grid-sills across the river are visible



Fig. 16 Mur de soutènement entre les terrasses, vue d'aval

Fig. 16 Downstream view of the separation walls between terraces



Fig. 17 Détail de l'aménagement d'une grille-seuil

Fig. 17 Detailed fitting of a grid-sill



Fig. 18 Rampe en blocs entre les terrasses 2 et 3

Fig. 18 Blocks ramp between terraces 2 and 3

Avec ces quelques améliorations à caractère constructif, l'aménagement a été exécuté conformément au plan de la Figure 19.

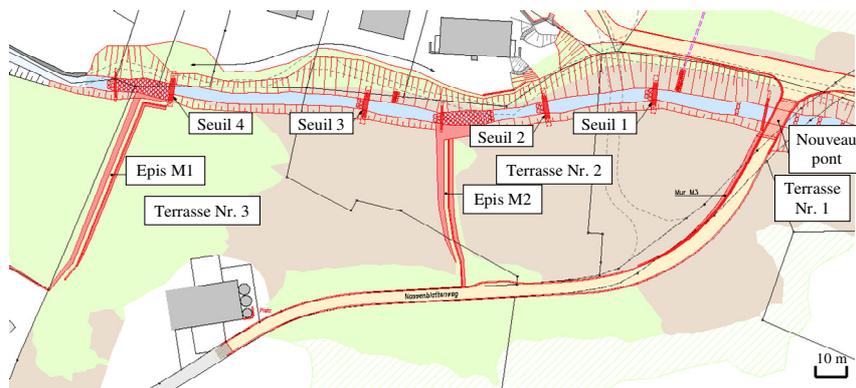


Fig. 19 Plan de l'aménagement conforme à l'exécution

Fig. 19 Plan view of the executed project

CONCLUSION

Dans le but de résoudre le problème d'alluvionnement et de débordement du Milibach à Meiringen, le projet d'aménagement d'un tronçon de cours d'eau, situé en amont de la zone à risque, a été testé et optimisé selon une approche itérative par des essais sur modèle réduit. Le projet prévoyait l'aménagement du profil en long du cours d'eau et la création de trois zones d'épandage sédimentaire, sous forme de terrasses en rive gauche. Les crues de projet centennales ont été utilisées pour optimiser la configuration proposée, avec comme objectif la rétention de 75% du volume des sédiments entrant sur le tronçon. La crue extrême (EHQ) et une crue à deux pics successifs de période de retour 30 ans ont été utilisées pour évaluer le risque résiduel et vérifier la robustesse de la solution optimisée.

A la suite de plusieurs séries d'essais effectuées sur le modèle physique à l'échelle 1:30, les modifications suivantes ont été apportées à la proposition initiale du Bureau d'ingénieurs:

- réduction de la pente longitudinale du lit du cours d'eau au moyen de quatre grilles-seuils ;
- implantation d'épis de fermeture de 1.5 m de hauteur à la limite aval des terrasses sédimentaires, afin de favoriser l'alluvionnement et maîtriser le volume de sédiments remobilisé dans ces zones ; ces petites digues, de 1.5 m de hauteur, servent aussi à guider l'écoulement pour sa restitution vers le cours d'eau principal ;
- aplanissement de la plate-forme du 3^{ème} dépotoir en réduisant sa pente transversale de 5% à 1% ; ce réaménagement est obtenu par une rotation de la plate-forme de 4% autour de la ligne de rive du cours d'eau.

Les résultats du modèle physique ont ensuite été interprétés pour une réalisation constructive par l'ingénieur du projet. En particulier, les fondations d'ouvrages, les protections contre l'affouillement et la taille des blocs à utiliser devaient être définies, car les essais sur modèle ont été exécutés sur fond dur.

Le système choisi d'une rétention de matériaux charriés sur des terrasses d'épanchement a confirmé sa fonctionnalité. Il présente un avantage certain pour le maître d'ouvrage, au niveau des frais de maintenance relatifs au déblayage des alluvions, comparativement à un dépotoir classique installé sur le cours d'eau. Le fait que le système ne supprime pas complètement le charriage sédimentaire est également bénéfique du point de vue écologique et pour la stabilité du lit à l'aval de l'aménagement.

RÉFÉRENCES

- Fehr R. (1987). Einfache Bestimmung der Korngrößenverteilung von Geschiebematerial mit Hilfe der Linienzahlanalyse, Schweizer Ingenieur und Architekt, Sonderdruck Heft 38/1987, pp. 1104-1109.
- Boillat J.-L., Geiges-Mayaud M., Teyssie Ph. (2009). Auslaufbauwerk des Geschiebesammlers Fromatta, Wasser Energie Luft, 101. Jhrg., Heft 1/2009, pp. 32-36.

- Ghilardi T., Boillat J.-L., Schleiss A., De Montmollin G., Bovier S. (2012). Gestion du risque d'inondation sur l'Avançon. Optimisation sur modèle physique, 12th Congress INTERPRAEVENT 2012, Grenoble, France.
- Meile T., Bodenmann M., Schleiss A., Boillat J.-L. (2004). Umsetzung des Hochwasserschutzkonzeptes der Gemeinde Brig - Glis im Kanton Wallis, Internationales Symposium INTERPRAEVENT 2004 – Riva/Trient, Themenkreis VII, pp. 219-230.
- Müller M., Bieri M., Ribeiro Martins J., Boillat J.-L., Schleiss A. (2010). Barrage de Lavey. Etudes physique et numérique des écoulements et du transport solide dans le Rhône, La Houille Blanche, 6/2010, pp. 60-67.
- Smart G.M., Jäggi M.N.R. (1983). Sediment transport on steep slopes, Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Nr. 64, ETHZ, Zürich.
- Studer M., Hachem F., Boillat J.-L. (2010). Experimental design of a diversion structure of granular debris flows, River Flow 2010, Braunschweig, Germany, Ed. Dittrich, Koll, Aeberle & Geisenhainer (eds), Bundesanstalt für Wasserbau, ISBN 978-3-939230-00-7, 2010, pp. 1363-1369.