

## GESTION DU RISQUE D'INONDATION SUR L'AVANÇON PAR RETENTION DE SEDIMENTS

### OPTIMISATION SUR MODÈLE PHYSIQUE

## FLOOD RISK MANAGEMENT OF THE AVANÇON RIVER BY MEANS OF SEDIMENT RETENTION

### PHYSICAL MODEL BASED STUDY

Tamara Ghilardi<sup>1</sup>, Jean-Louis Boillat<sup>2</sup>, Anton J Schleiss<sup>3</sup>, Gérard De Montmollin<sup>4</sup>, Stéphane Bovier<sup>5</sup>

#### RÉSUMÉ

La capacité de charriage du torrent de l'Avançon à travers la ville de Bex, en Suisse, est insuffisante en situation de crue. En octobre 2000, lors d'un événement de temps de retour estimé à 20 ans, le niveau d'eau a pratiquement atteint la limite de débordement à cause des alluvions accumulées dans le lit de la rivière. Plusieurs mesures de protection ont alors été envisagées, incluant un bassin de rétention des sédiments, placé parallèlement au cours d'eau en amont de la ville. Vu le concept novateur de l'ouvrage de dérivation, composé d'un seuil à engravures dans le cours d'eau et d'un déversoir latéral, il a été jugé nécessaire d'optimiser son fonctionnement sur modèle physique. La forme du déversoir latéral joue en l'occurrence un rôle fondamental pour la dérivation des sédiments.

**Mots-clés:** gestion du risque d'inondation, charriage, rétention de sédiments, modélisation physique.

#### ABSTRACT

The sediment transport capacity of the Avançon mountain river through Bex City, in Switzerland, is insufficient during floods. In October 2000, during a 20 years return period event, the water level rose to danger limit due to the high amount of alluvium accumulated in the river channel. Numerous protection measures have then been taken, including the creation of a sediment retention basin in parallel of the river, upstream from the city. Because of the innovative concept of the derivation system, composed by a sill with orifices in the stream and a lateral weir, it was required to optimize its functioning on a physical model. The form of the lateral weir plays in this case a fundamental role for the amount of derived sediments.

**Keywords** flood risk management, bed load transport, sediment retention, experimental modeling.

#### INTRODUCTION

Sans être 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 ; Hachem et al. 2012). Les conditions locales propres à chaque situation

<sup>1</sup> PhD Tamara Ghilardi. Laboratoire de constructions hydrauliques – Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, EPFL ENAC IIC LCH, GC A3 495 (Bâtiment GC), Station 18, CH-1015 Lausanne (e-mail : tamara.ghilardi@epfl.ch)

<sup>2</sup> Dr. Jean-Louis Boillat. Chemin de la Brotte 4, 1163 Etoy, Suisse

<sup>3</sup> Prof. Anton J. Schleiss. Laboratoire de constructions hydrauliques – Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse

<sup>4</sup> Gérard de Montmollin. STUCKY Ltd, Rue du Lac 33, 1020 Renens VD 1, Suisse

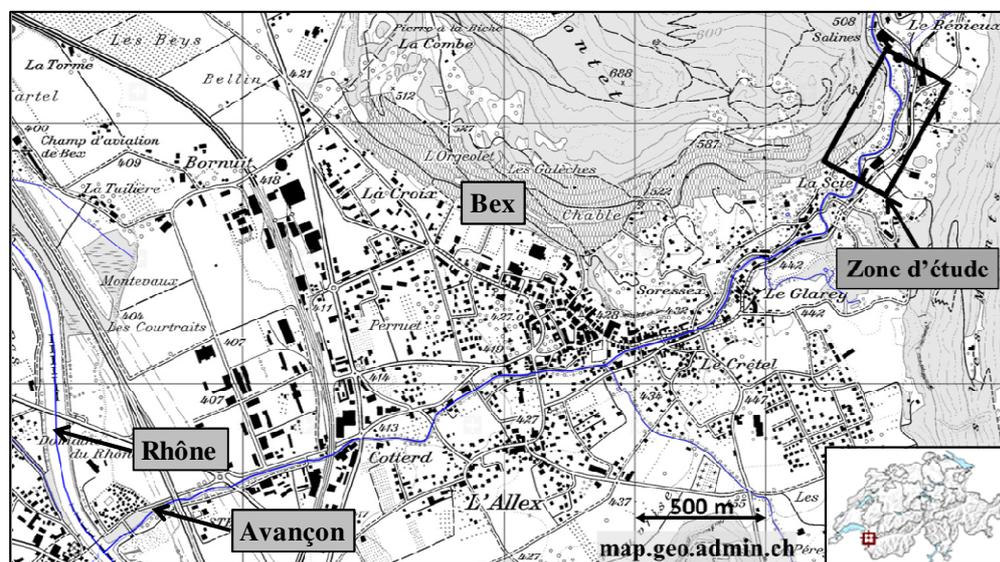
<sup>5</sup> Stéphane Bovier. Service des Eaux Sols et Assainissement, Rue du Valentin 10, 1014 Lausanne, Suisse

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 la dérivation latérale de sédiments sur un tracé en courbe. Dans ces conditions, il a été décidé d'optimiser le présent projet par des essais sur modèle physique.

L'Avançon est un affluent du Rhône, situé dans les Préalpes vaudoises sur les contreforts du massif des Muverans. La ville de Bex est située sur le cône de déjection de l'Avançon (Fig. 1), dans la zone naturelle de dépôt sédimentaire constituée à la sortie des gorges, là où le torrent rejoint la plaine.

Les études de risque (Stucky SA et SESA, 2002) ont montré l'important potentiel de dommages existant en traversée de Bex, de part et d'autre du cours d'eau. Dans cette situation, le Canton de Vaud, la ville de Bex et la Confédération suisse se sont regroupés juridiquement dans l'« Entreprise de Correction Fluviale de l'Avançon » (ECF Avançon) pour mettre en œuvre un concept de protection. Celui-ci inclut l'augmentation du gabarit hydraulique de l'Avançon en traversée de Bex ainsi que la création d'une zone d'épandage des sédiments en amont de la ville (Fig. 1). D'autres mesures de protection ont également été réalisées sur des torrents latéraux, en particulier la Croisette et le Bey de Sérisson. Le Tableau 1 présente les principales caractéristiques du bassin versant de l'Avançon.

Le présent article traite de la conception, de l'étude expérimentale sur modèle et de la réalisation de la zone d'épandage de sédiments précitée.



**Fig. 1** Situation et localisation du projet sur l'Avançon, en amont de la ville de Bex

**Fig. 1** General map and location of the project on the Avançon river, upstream from Bex City

**Tab. 1** Principales caractéristiques du bassin versant en amont de Bex

**Tab. 1** Main characteristics of the catchment area upstream from Bex

Surface [km <sup>2</sup> ]	77.3	Débit moyen [m <sup>3</sup> /s]	3.9
Pente locale de la rivière [%]	4.7	Débit de crue [m <sup>3</sup> /s]	
Largeur plein bord du lit [m]	33	Q <sub>30</sub> (Temps de retour = 30 ans)	60
Altitude maximale [ms.m.]	3209.7	Q <sub>100</sub> (Temps de retour = 100 ans)	79
Altitude moyenne [ms.m.]	1746.6	Q <sub>300</sub> (Temps de retour = 300 ans)	96
Altitude minimale [ms.m.]	468.9		

Dans l'histoire de l'Avançon, des crues majeures se sont produites en 1910 (Fig. 2), 1927, 1929 et 2000. Tous ces événements sont caractérisés par d'importants dépôts sédimentaires en amont et en traversée de la ville de Bex. Depuis le milieu du siècle passé, différents travaux de correction ainsi que le curage du lit ont permis de réduire sensiblement le risque de débordement. Cependant, lors de la crue d'octobre 2000, caractérisée par un débit de pointe de 40 m<sup>3</sup>/s correspondant à une période de retour de 20 ans environ, un transport sédimentaire massif a été observé. Il en a résulté un dépôt de l'ordre de 8'000 m<sup>3</sup> en traversée de Bex, avec une surélévation du lit du cours d'eau de l'ordre de 1.5 à 2.0 m. Le gabarit hydraulique résiduel se limitait alors à 0.5 m environ par endroits.

Suite à cet événement, une étude a été effectuée (Stucky SA et SESA, 2002) à l'échelle du bassin versant de l'Avançon, dans le but d'établir la carte des aléas et processus. Cette étude a montré que de grandes quantités de matériaux pouvaient être mobilisées par le réseau hydrographique. Compte tenu des caractéristiques hydrauliques de l'Avançon et de ses affluents, le potentiel d'apports solides en amont de Bex se révèle également très important, de l'ordre de quelques dizaines de milliers de mètres cubes lors de fortes crues.

La présence de nombreux bâtiments sur les berges du cours d'eau en traversée de Bex rend impossible une augmentation significative du gabarit hydraulique. De même, l'accroissement de pente du profil en long par suppression de seuils n'est applicable que sur des tronçons relativement limités. Dans une telle situation, la problématique du charriage ne pouvait être réglée qu'en amont de la zone urbanisée, sous la forme d'une zone d'épandage de sédiments.



**Fig. 2** Travaux de remise en état de l'Avançon après l'inondation de 1910 (Stucky SA, 2002)

**Fig. 2** Rehabilitation works of the Avançon river after the flood event of 1910 (Stucky SA, 2002)

## PRÉSENTATION DU PROJET

Afin d'éviter la déstabilisation du lit du cours d'eau et d'améliorer son intégration paysagère, la zone d'épandage du Bévieux sur l'Avançon n'a pas été conçue comme un dépotoir « classique » dans le lit même du cours d'eau. Les nombreuses observations réalisées sur ce type de dépotoirs, montrent qu'ils retiennent la majeure partie des sédiments charriés, quel que soit le débit et non seulement en périodes de crue. A l'aval de tels dépotoirs, une importante érosion du lit est souvent observée, conduisant à une déstabilisation des berges et parfois à la ruine de seuils transversaux. Cet affouillement est la conséquence directe du déficit sédimentaire résultant de la rétention en amont.

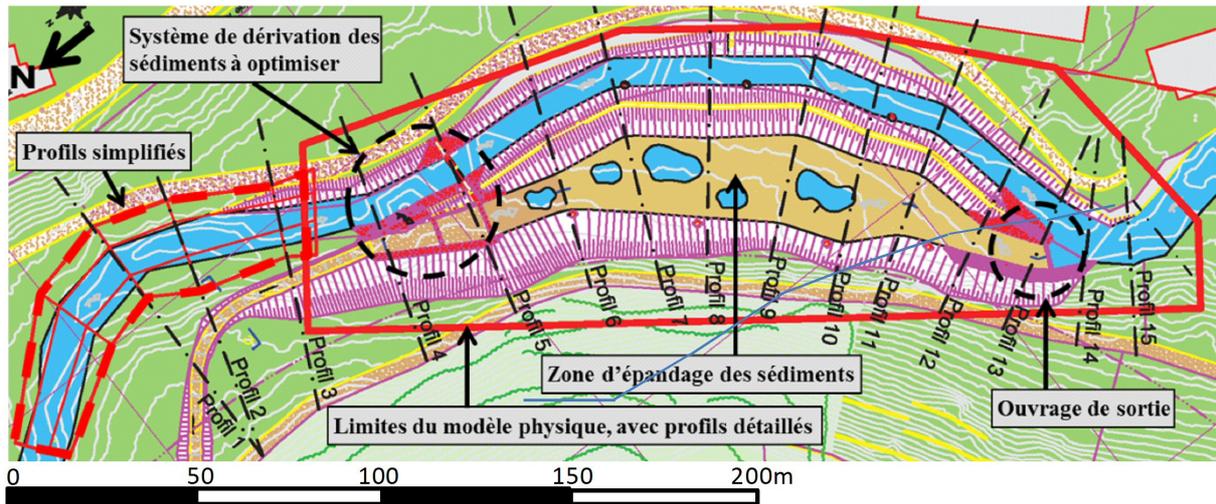
La fonction de la zone d'épandage du Bévieux n'est donc pas de retenir tout le charriage transitant par l'Avançon, mais uniquement les volumes excédentaires lors des crues de période de retour supérieure ou égale à vingt ans. De tels événements peuvent apporter des quantités de sédiments de l'ordre de 17'000 m<sup>3</sup> à 25'000 m<sup>3</sup> environ. Pour le dimensionnement de la zone d'épandage des critères relativement précis ont ainsi été définis, tels que reportés dans le Tableau 2.

La zone d'épandage est dimensionnée pour une crue centennale. Elle offre une capacité de stockage de l'ordre de 12'000 m<sup>3</sup>. De plus, un volume d'environ 8'000 m<sup>3</sup> peut être stocké dans le lit de l'Avançon sur le secteur proche de l'ouvrage. Lors d'un événement centennial, l'apport résiduel de sédiments en traversée de Bex devrait alors correspondre à la capacité de charriage de l'Avançon en aval de la zone d'épandage.

D'un point de vue fonctionnel, le système de régulation est caractérisé par trois éléments (Fig. 3) : un ouvrage d'entrée, un bassin de rétention sédimentaire et un ouvrage de sortie. L'ouvrage d'entrée a pour but de réguler le déversement vers la zone d'épandage d'une partie des débits, solide et liquide, amenés par l'Avançon. Le bassin de rétention ou zone d'épandage est l'étendue sur laquelle les matériaux charriés vont se déposer. Finalement, l'ouvrage de sortie doit permettre d'optimiser la capacité de stockage sédimentaire du bassin et assurer le retour du débit liquide vers l'Avançon.

**Tab. 2** Critères de dimensionnement des ouvrages de dérivation et de rétention sédimentaire  
**Tab. 2** Design criteria for the sediment derivation and retention system

Événement	Débit de pointe	Volume transporté	Volume stocké dans la zone d'épandage	Volume stocké dans l'Avançon
Annuel ( $Q_1$ )	26 m <sup>3</sup> /s	Non défini	0 m <sup>3</sup>	Non modifié
Vingtennal ( $Q_{20}$ )	45 m <sup>3</sup> /s	17'000 m <sup>3</sup>	6'000 m <sup>3</sup>	~6'000 m <sup>3</sup>
Centennal ( $Q_{100}$ )	79 m <sup>3</sup> /s	25'000 m <sup>3</sup>	12'000 m <sup>3</sup>	8'000 m <sup>3</sup>
Tri-centennal ( $Q_{300}$ )	96 m <sup>3</sup> /s	Non défini	Idem	Idem
Extrême ( $Q_{ext}$ )	120 m <sup>3</sup> /s	~50'000 m <sup>3</sup>	Idem	Idem

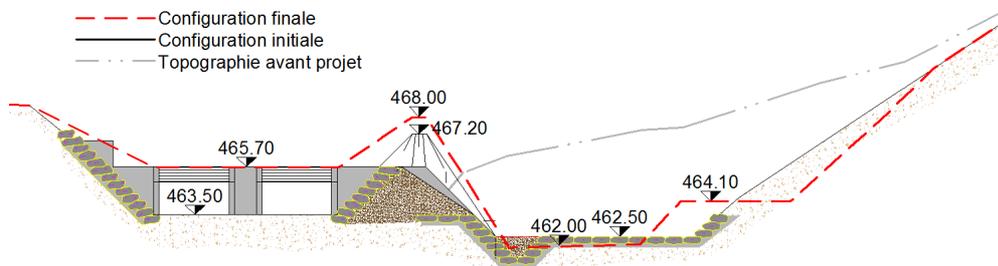


**Fig. 3** Vue en plan de la zone d'étude avec les limites du modèle physique au 1/30

**Fig. 3** Topographic plan view of the project zone with borders of the 1/30 physical scaled model

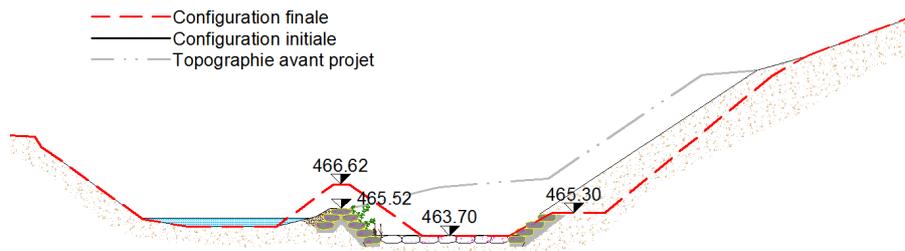
L'ouvrage d'entrée est composé d'un seuil placé en travers de l'Avançon (Fig. 4) et d'un déversoir latéral sur la rive droite amont (Fig. 5). Le seuil est subdivisé en deux pertuis à engravures d'une largeur de 3.20 m chacun. Les engravures permettent de glisser des linteaux pour obturer la partie supérieure des pertuis et ainsi créer une section à deux orifices surmontés d'un déversoir. En crue, la limitation de débit induite par cette structure provoque un exhaussement de la ligne d'eau amont et conduit au déversement d'une partie de l'écoulement vers la zone d'épandage. Les linteaux de fermeture de la partie supérieure des pertuis sont ajustables, permettant une modification ultérieure éventuelle du fonctionnement de l'ouvrage.

Le déversement sur le seuil latéral est initié dès que le débit de l'Avançon dépasse la crue annuelle. Pour les crues plus importantes, le ralentissement provoqué par le seuil a pour effet de favoriser l'alluvionnement du lit en amont et consécutivement la surélévation du plan d'eau.

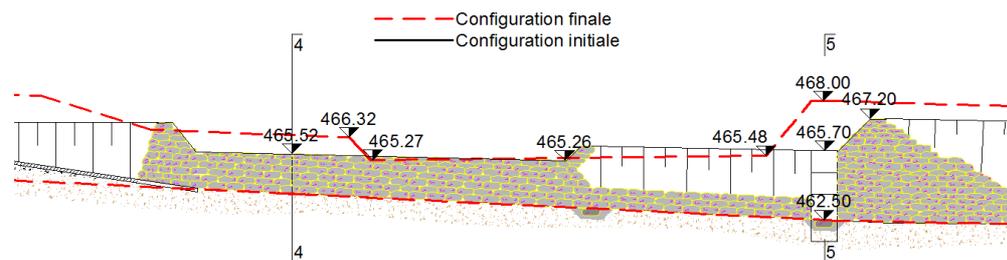


**Fig. 4** Profil en travers N 5. Pertuis à engravures dans la configuration initiale (C1) et dans la configuration optimisée (C6, ligne traitillée rouge). La ligne traitillée-pointillée grise représente la topographie d'origine

**Fig. 4** Cross section Nr. 5. Sill with orifices in the original configuration (C1) of the project and in the optimized configuration (C6, dashed red line). The dashed-dotted grey line represents the initial topography



**Fig. 5** Profil en travers N 4, au droit du déversoir latéral dans la configuration initiale (C1) et dans la configuration optimisée (C6, ligne traitillée rouge). Le traitillé-pointillé gris représente la topographie d'origine  
**Fig. 5** Cross section Nr. 4, across the lateral weir in the original configuration (C1) of the project and in the optimized configuration (C6, dashed red line). The dashed-dotted grey line represents the original topography



**Fig. 6** Profil en long sur le déversoir latéral à l'amont du seuil à engravures, dans les configurations initiale du projet (C1) et optimisée (C6, ligne traitillée rouge). La position des profils en travers 4 et 5 est indiquée  
**Fig. 6** Profile over the lateral weir upstream of the sill with orifices in the original (C1) and optimized (C6, dashed red line) configurations of the project. The position of cross sections 4 and 5 is indicated

En situation de crue, la zone d'épandage doit être entièrement inondée. De par sa faible pente et sa grande largeur, l'écoulement sera fortement ralenti à cet endroit, favorisant le dépôt des matériaux charriés. Le profil en travers à double niveaux réalisé dans la partie amont de la zone (Figs. 4 et 5) permet de réduire la capacité de charriage à cet endroit, lorsque le bassin est rempli, et de contribuer au retour du cours d'eau dans son lit naturel.

Après chaque crue ayant généré un déversement important, la zone d'épandage doit être curée et son état originel reconstitué. Une telle opération devrait intervenir en moyenne tous les 10 à 20 ans. L'ouvrage de sortie est l'endroit où les écoulements se concentrent avant de retourner dans l'Avançon. La vitesse, et par conséquent l'énergie de l'écoulement, sont plus importantes dans cette zone. Afin d'éviter tout risque d'affouillement ou de déstabilisation de la digue, l'ouvrage de sortie est renforcé à l'aide d'enrochements.

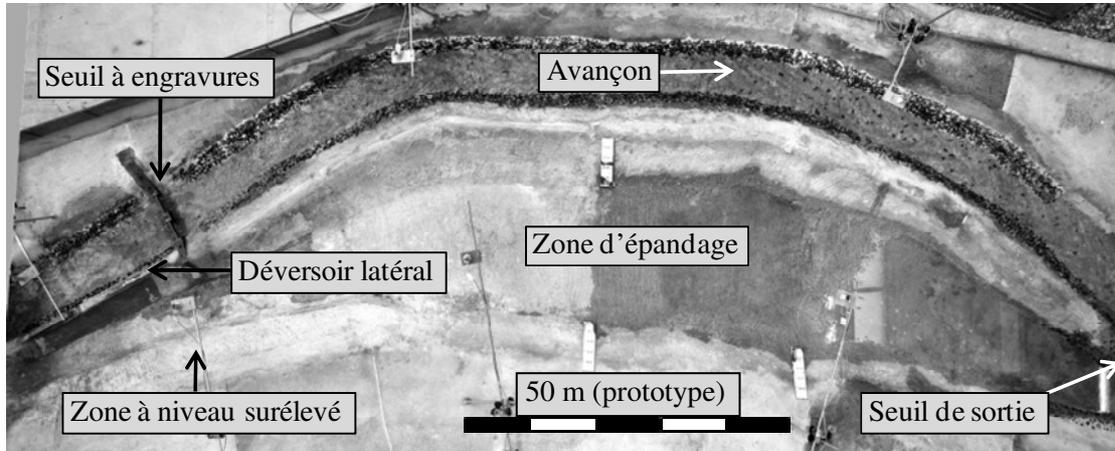
## MODÉLISATION PHYSIQUE

Le modèle physique de l'Avançon a été construit à l'échelle 1/30 au Laboratoire de Constructions Hydrauliques de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, dans les limites indiquées sur la Fig. 3. La partie centrale de la maquette a été réalisée en mortier de ciment (Fig. 7). La partie amont de la rivière caractérisée par une forte courbe a été reproduite en PVC, à partir de profils en travers simplifiés. La modélisation de ce tronçon permet de reproduire le comportement tridimensionnel des flux liquide et solide à l'approche de l'ouvrage de dérivation. Le déversoir latéral et le seuil à engravures, susceptibles de subir des ajustements, ont été construits en PVC et intégrés au modèle de manière à être facilement modifiables.

En phase de calage du modèle, un ajustement de la rugosité du lit et des berges du cours d'eau a été nécessaire. Pour ce faire, les lignes d'eau mesurées dans le lit de la rivière, sans dérivation vers le bassin de rétention, ont été comparées à celles obtenues par simulation numérique à l'aide du logiciel HEC-RAS avec des coefficients de rugosité adéquats.

Pour la mesure en continu des lignes d'eau, onze sondes à ultrasons ont été installées sur le modèle, tant dans la zone d'épandage que dans le lit de l'Avançon. Des photographies zénithales ont été prises chaque minute, afin de suivre l'évolution séquentielle du front de sédiments dans la zone d'épandage. Les apports solides ont été effectués de manière continue, sur une base volumétrique. A trois stades de chaque essai, l'alimentation était arrêtée et les niveaux de sédiments relevés dans chaque profil en

travers (profils 4 à 14, Fig. 3). Ces interruptions ont été provoquées à la pointe de la crue, à la fin de la crue et après la séquence de purge suivant la crue. Durant cette dernière phase, le débit caractéristique de fin de crue était maintenu constant à travers le modèle. Une durée de purge de 6h à l'échelle prototype a été simulée pour l'ensemble des essais. Aucun apport de sédiments n'a été effectué pendant cette phase, dont le but était d'évaluer la capacité d'auto-curage du cours d'eau.



**Fig. 7** Vue zénithale de la partie centrale du modèle physique

**Fig. 7** Picture from above of the central part of the physical model

Pour le transfert des résultats du modèle hydraulique au comportement réel de l'Avançon, la maquette a été exploitée en similitude de charriage (critère de Shields) pour ce qui est du transport solide et en similitude de Froude pour les écoulements, c'est-à-dire en conservant le rapport entre forces d'inertie et de gravité (Tab. 3). Dans ce type de modélisation, les hypothèses suivantes sont admises:

- Les sédiments sont constitués de matériaux granulaires non cohésifs, ils sont caractérisés par une granulométrie étendue et par leur masse volumique; la distribution granulométrique sur modèle est définie de manière à respecter le critère de Shields pour l'initiation du mouvement sédimentaire ;
- Les pertes de charge sont tributaires de la géométrie locale et de la rugosité des parois et du fond;
- Le débit solide, introduit à l'entrée du modèle, reproduit les volumes de charriage observés lors des crues.

**Tab. 3** Facteurs d'échelle des paramètres hydrauliques et géométriques du modèle (m : modèle ; p : prototype)

**Tab. 3** Scale factors of the hydraulic and geometrical parameters of the model (index m : model ; p : prototype)

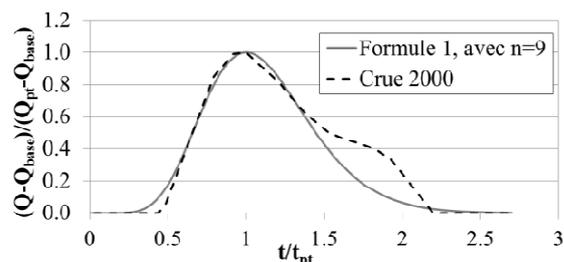
Paramètre physique	Rapport d'échelle	Facteur d'échelle
Longueur L [m] / Pression P [m de colonne d'eau]	$L_p/L_m = P_p/P_m = \lambda$	30
Vitesse V [ $\text{ms}^{-1}$ ] / Temps t [s]	$V_p/V_m = t_p/t_m = \lambda^{1/2}$	5.48
Débit Q [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ]	$Q_p/Q_m = \lambda^{5/2}$	4930

Afin de définir une forme représentative d'hydrogramme pour la simulation des crues, l'événement d'octobre 2000 a été adopté comme référence et l'équation de Maxwell (1) (Hager and Sinniger, 1985) a été utilisée pour l'ajustement d'une forme théorique optimale.

$$Q(t) = Q_{pt} \left( t/t_{pt} \exp(1 - t/t_{pt}) \right)^n \quad (1)$$

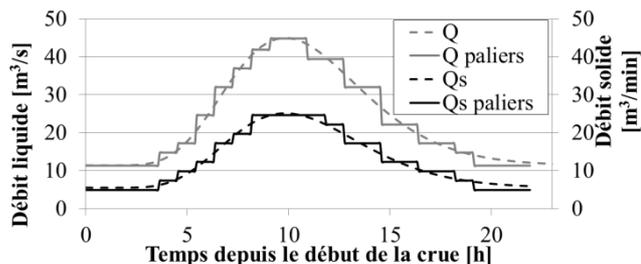
$Q(t)$  est le débit  $Q$  à un instant  $t$ ,  $Q_{pt}$  le débit de pointe,  $t_{pt}$  le temps de montée et  $n$  un facteur de forme. La représentation adimensionnelle de l'ajustement de la crue d'octobre 2000, obtenu avec un facteur de forme  $n=9$ , est présentée à la Fig. 8, avec  $Q_{base}$  le débit de base de la crue. L'hydrogramme est ensuite ajusté par paliers, pour la simulation sur modèle, en respectant le volume de la crue (Fig. 9).

Pour les crues de projet, le volume total de sédiments charriés par l'Avançon a été évalué par le bureau d'étude (Tab. 2 ; Stucky SA et SESA, 2002). Afin de définir le solidogramme correspondant, la formule VAW 1983 (Smart et Jäggi, 1983), applicable aux rivières à forte pente, a été utilisée. Un débit solide est ainsi calculé pour chaque palier et un facteur correctif est appliqué pour ajuster le volume de sédiments requis (Fig. 9).



**Fig. 8** Comparaison adimensionnelle entre la crue d'octobre 2000 et l'ajustement proposé

**Fig. 8** Dimensionless comparison between the October 2000 flood and the theoretical adjustment



**Fig. 9** Hydrogramme Q et solidogramme  $Q_s$  de la crue vingtennale, avec ajustement par paliers

**Fig. 9** Hydrograph Q and sediment hydrograph  $Q_s$  of the 20 years flood event, with adjustment by steps

Les caractéristiques granulométriques des échantillons sédimentaires prélevés in situ, ainsi que celles calculées en similitude puis finalement utilisées sur le modèle, sont reportées dans le Tableau 4. La fraction fine de la courbe granulométrique, très variable selon les endroits de prélèvement, n'a pas été considérée sur modèle car elle est associée à un transport en suspension.

**Tab. 4** Granulométrie du lit du cours d'eau, à l'échelle du modèle (critère de Shields) et utilisée pour les essais

**Tab. 4** Grain size distribution on prototype, at model scale (Shields criteria) and used during tests

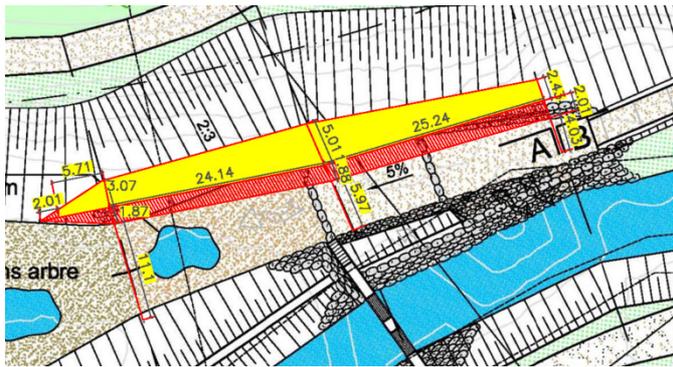
	Prototype [cm]		Similitude 1/30 (Shields) [mm]		Utilisé sur modèle [mm]
	min	max	min	max	moy
<b>d<sub>90</sub></b>	10.9	31.0	3.640	10.3	5.6
<b>d<sub>65</sub></b>	5.2	7.1	1.813	2.405	1.7
<b>d<sub>50</sub></b>	3.0	3.8	1.158	1.393	0.9
<b>d<sub>30</sub></b>	1.1	1.4	0.549	0.670	0.45

## RESULTATS

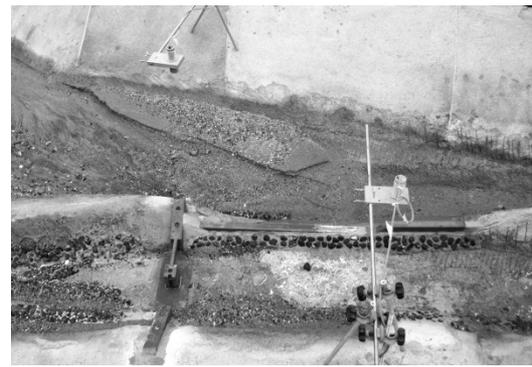
L'objectif prioritaire de ce projet étant la protection de la ville de Bex contre les crues rares, les essais ont débuté par l'optimisation de l'ouvrage de dérivation pour la crue centennale. Dans la configuration initiale (C1), il a d'emblée été remarqué que les volumes de rétention fixés comme objectif n'étaient pas atteints. En outre, un problème majeur est apparu lors de la purge après crue où le processus d'auto-nettoyage du cours d'eau n'était pas amorcé. L'écoulement prioritaire continuait de transiter par la zone d'épandage, en remobilisant une part importante des sédiments accumulés. Ce comportement était lié à la configuration particulière de la digue latérale, dont la partie située à proximité du seuil à engravures était plus haute qu'à son extrémité amont. L'effet de courbe a également un effet significatif sur le comportement hydraulique et sédimentaire à cet endroit. Afin de corriger les défauts observés, le seuil à engravures a été déplacé légèrement vers l'amont dès la configuration C3, de manière à ce que le courant arrive presque perpendiculairement sur l'ouvrage. L'effet de courbe n'est cependant pas le principal facteur d'influence sur la dérivation des sédiments vers la zone d'épandage. La hauteur, forme et position des différentes parties du déversoir latéral ont révélé un impact déterminant sur le comportement général du système. Finalement, la création d'un lit majeur (Fig. 10) rétrécissant la partie amont du bassin, introduite à partir de la configuration C4, a contribué à atteindre l'objectif d'auto-nettoyage en fin de crue.

Dans toutes les configurations testées, le remplissage de la zone d'épandage commence par une accumulation de sédiments dans sa partie centrale, après l'élargissement de section et l'uniformisation du fond (profil 7, Fig. 3). Le remplissage progresse ensuite tant vers l'aval que vers l'amont et, une fois le fond de la zone d'épandage couvert de sédiments, l'épaisseur des dépôts augmente rapidement. A l'entrée du bassin, dans la partie à double lit, des dépôts importants se constituent jusque sur le lit majeur (Fig. 11). Une fois le niveau de ce dernier atteint par les sédiments, l'écoulement perd de sa puissance consécutivement à l'augmentation de la surface d'écoulement. Les sédiments se déposent alors sur toute la largeur à l'entrée de la zone d'épandage. La hauteur de dépôt s'accroît et obstrue de plus en plus le passage vers la zone d'épandage. Cet obstacle a pour effet de progressivement réorienter l'écoulement vers le seuil à engravures, dès la fin de la crue centennale et pendant la

séquence de purge qui suit. C'est ce processus qui permet l'auto-nettoyage du cours d'eau et la préservation du dépôt sédimentaire constitué dans la zone d'épandage.



**Fig. 10** Plan de situation de la partie amont de la zone d'épandage avec une section à double lit (en jaune la partie horizontale du lit majeur)

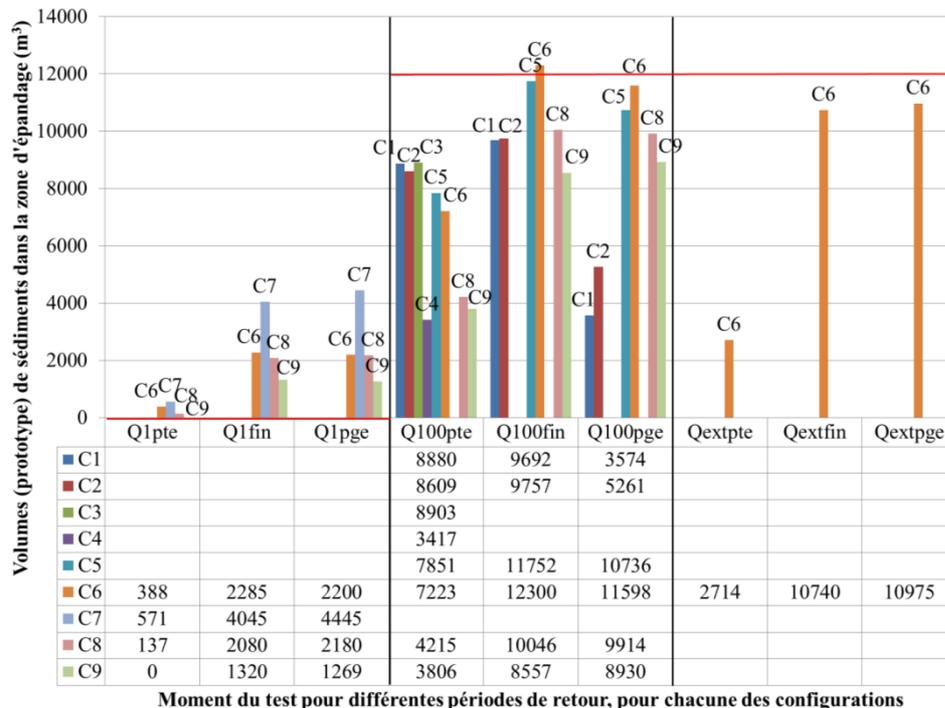


**Fig. 11** Remplissage du lit majeur derrière le déversoir latéral après la séquence de purge de la crue centennale, dans la configuration (C6).

**Fig. 10** Plan view of the upstream part of the retention basin with the compound channel sector (in yellow the horizontal raised part)

**Fig. 11** Filling of the compound channel behind the lateral weir after auto-cleaning of the 100 year flood, with configuration (C6)

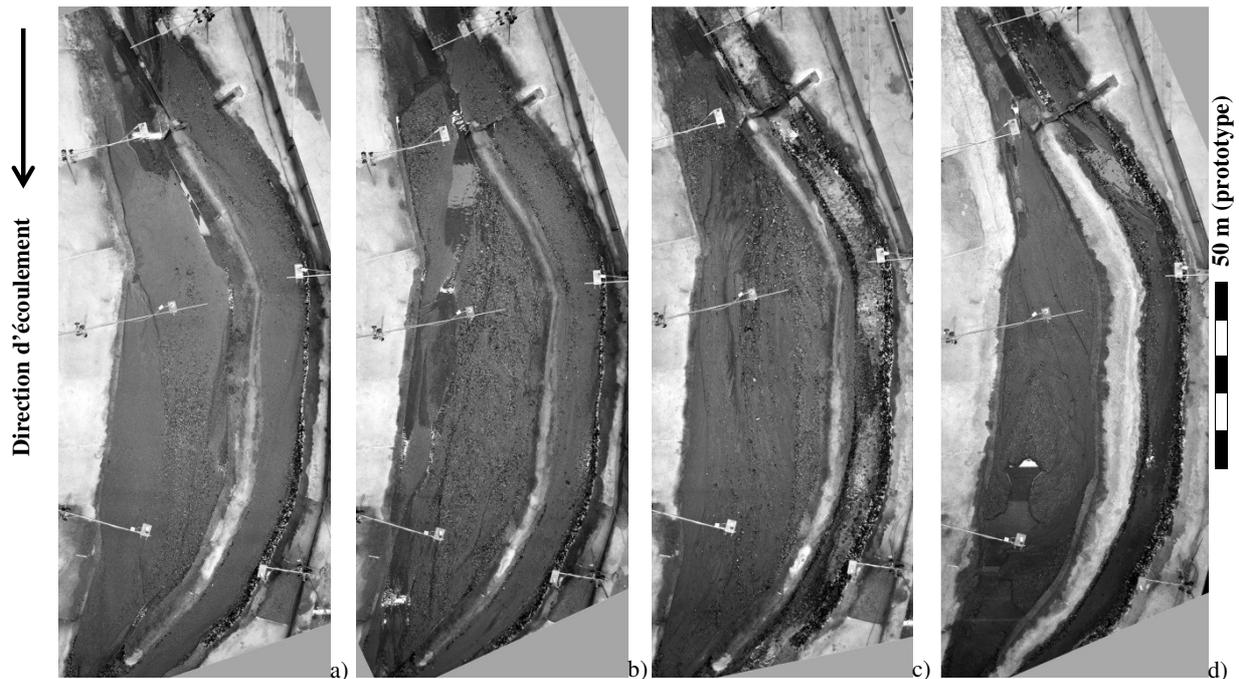
Pour que déversoir latéral à l'amont du seuil à engravures fonctionne correctement, sa hauteur et sa forme ont dû être optimisées. Les configurations successivement testées ont montré que le déversoir latéral doit être de relativement faible hauteur juste en amont du seuil à engravures car la dérivation de sédiments se fait essentiellement à cet endroit. L'eau par contre est dérivée sur toute la longueur du déversoir. Ainsi, avec un déversoir latéral de trop grande longueur, la puissance d'auto-curage du cours d'eau est réduite et la remobilisation des sédiments dans la zone d'épandage accentuée, sans que la dérivation de sédiments soit augmentée pour autant. Les résultats comparatifs d'alluvionnement, obtenus dans les différentes configurations testées, sont présentés sur la Figure 12.



**Fig. 12** Volume de sédiments dans la zone d'épandage à différents instants de la crue (pte: pointe; fin: fin; pge: phase de purge), pour trois périodes de retour (Q1, Q100 et Qext), dans les configurations C1 à C9. Les lignes horizontales rouges indiquent les objectifs de stockage dans la zone d'épandage (Tab. 2)

**Fig. 12** Volume of sediments in the retention basin at different stages of the flood event (pte: peak; fin: end; pge: auto-cleaning phase), for three return periods (Q1, Q100 et Qext), with configurations C1 to C9. The red horizontal lines indicate the retention objectives of the sediment basin (Tab. 2)

La forme optimale du déversoir latéral a été trouvée de manière itérative avec la configuration C6, en traitillé rouge sur la Fig. 6. L'état de la zone d'épandage dans cette configuration est montré, à différents stades de la crue centennale, sur la Fig. 13. A la pointe de la crue les sédiments commencent à s'accumuler sur le lit majeur du secteur amont et le seuil à engravures est complètement submergé (Fig. 13a). A la fin de la crue, le seuil est à nouveau visible mais obstrué. Le dépôt de sédiments constitué sur le lit majeur gêne le passage vers la zone d'épandage, réorientant l'écoulement dans le cours d'eau (Fig. 13b). Après la séquence de purge, l'auto-nettoyage du lit est total, alors que la remobilisation de sédiments dans la zone d'épandage est quasi-nulle (Fig. 13c). Dans cette configuration, le déversoir latéral est malheureusement un peu trop bas pour éviter une dérivation de sédiments lors de la crue annuelle, (Fig. 13d), ce qui ne correspond pas tout à fait aux objectifs du projet. Un tel comportement n'est pas souhaitable, car susceptible d'augmenter les frais d'entretien.



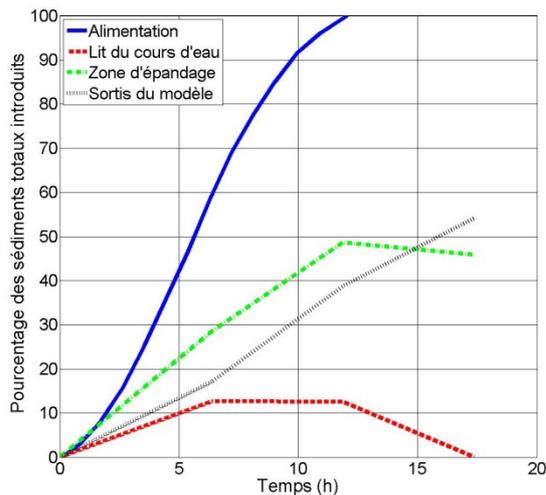
**Fig. 13** Résultats d'alluvionnement pour la crue centennale dans la configuration optimisée (C6): a) à la pointe de la crue ( $79 \text{ m}^3/\text{s}$ ); b) à la fin de la crue; c) après la phase de purge (débit de base de  $19.7 \text{ m}^3/\text{s}$ ); d) à la fin de la crue annuelle (débit de pointe  $26 \text{ m}^3/\text{s}$ )

**Fig. 13** Sedimentation results for the 100 year flood in the optimized configuration (C6): a) at the flood peak ( $79 \text{ m}^3/\text{s}$ ); b) at the end of the flood; c) after the auto-cleaning phase (base discharge of  $19.7 \text{ m}^3/\text{s}$ ); d) at the end of the yearly flood event (peak flow of  $26 \text{ m}^3/\text{s}$ )

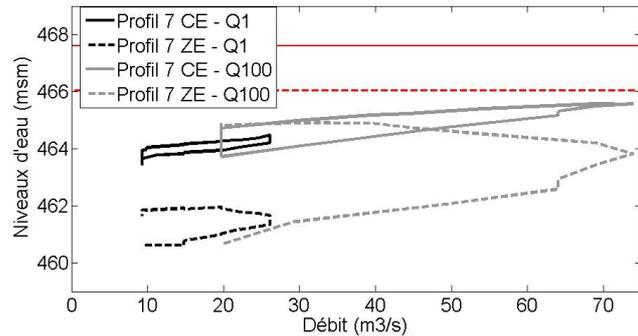
Afin de satisfaire les objectifs fixés pour la crue annuelle, une étape d'optimisation supplémentaire a été effectuée. Les linteaux du seuil à engravures ont été retirés afin d'initier plus tardivement la dérivation de sédiments. Cette modification permet d'approcher au mieux les objectifs fixés pour les différentes crues (Fig. 12).

Le comportement de la configuration optimisée est illustré par les Figures 14 et 15. La première montre l'évolution de l'accumulation de sédiments dans les différentes parties de l'aménagement pour  $Q_{100}$ . Il apparaît que le remplissage du lit de l'Avançon concerne 12% des sédiments charriés par la crue centennale. La remobilisation des sédiments dans la zone d'épandage est presque nulle pendant la séquence de purge. Au final, 55% des sédiments charriés transitent à travers le secteur modélisé. Une partie de ces sédiments sera vraisemblablement déposée en traversée de la ville de Bex, mais sans causer de problèmes compte tenu de leur quantité réduite. La Figure 15 présente l'évolution de la ligne d'eau en fonction du débit au profil 7, dans la zone d'épandage (ZE) et dans le cours d'eau (CE), pour  $Q_{100}$  et  $Q_1$ . Dans la zone d'épandage, tant pour la crue annuelle que pour la crue centennale, le niveau d'eau sur sédiments à la fin de la crue ne retrouve pas son niveau initial, en raison du dépôt constitué. Dans le cours d'eau, le niveau final est identique au niveau initial, confirmant un nettoyage pratiquement total du lit. Pour la crue centennale le niveau d'eau sur sédiments dans le cours d'eau est

proche de la limite de débordement vers la zone d'épandage (ligne horizontale traitillée). Il n'existe par contre aucun risque de débordement vers l'extérieur, donc aucun problème de sécurité.



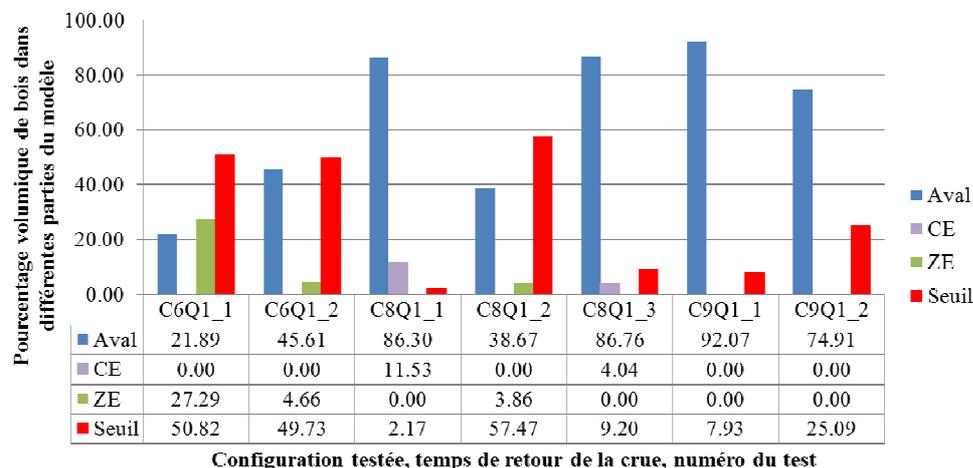
**Fig. 14** Pourcentage de sédiments déposés dans différentes parties de l'aménagement au cours de la crue centennale, dans la configuration optimale (C6)  
**Fig. 14** Percentage of deposited sediments in different parts of the system during the 100 years flood, with the optimal configuration (C6)



**Fig. 15** Niveau d'eau en fonction du débit au profil 7, dans le cours d'eau (CE) et dans la zone d'épandage (ZE), pour les crues annuelles  $Q_1$  et centennale  $Q_{100}$ , dans la configuration optimale (C6). En traitillé rouge le niveau de la digue séparant la rivière du bassin, en trait continu le niveau de la rive gauche de la rivière  
**Fig. 15** Water level in function of discharge at cross section 7, in the river (CE) and in the retention basin (ZE), for the annual  $Q_1$  and hundred years  $Q_{100}$  flood events, with optimal configuration (C6). The red dashed line reports the level of the bank between river and basin, the continuous line indicates the level of river's left bank

Des essais spécifiques ont également été effectués dans le but de vérifier le comportement du système en cas d'arrivée de bois flottants. Le volume de bois  $V_b$  introduit est basé sur le volume de la crue  $V_w$ , selon la relation (2) (Bezzola et Lange, 2006). La Fig. 16 reporte les résultats des essais avec bois flottants dans les configurations C6, C8 et C9 pour la crue annuelle.

$$V_b \approx 4 * V_w^{2/5} \quad (2)$$



**Fig. 16** Résultats des essais avec bois flottants pour la crue annuelle, dans les configurations C6, C8 et C9. Plusieurs lâchers ont été effectués dans chaque cas  
**Fig. 16** Results of the tests with floating debris for the annual flood event, within configurations C6, C8 and C9. Several tests have been done in each case

Il apparait clairement que la présence de linteaux sur le seuil à engravures crée un obstacle important au transit des corps flottants, comme le montrent les résultats de la configuration C6 (Fig. 17a). Toutefois, l'absence des linteaux ne garantit pas leur transit non plus. Dans ce cas (configuration C8, Fig. 17 b et c), les résultats sont très variables et aléatoires, fonction surtout du moment auquel le premier tronç reste bloqué. La hauteur du déversoir latéral n'a toutefois pratiquement pas d'impact sur le résultat.



**Fig. 17** Situation finale des avec bois flottants: a) C6Q1\_1; b) C8Q1\_3; c) C8Q1\_2

**Fig. 17** Final state of the tests with floating debris: a) C6Q1\_1; b) C8Q1\_3; c) C8Q1\_2

Pour le passage de la crue centennale, aucun problème n'a été décelé car le niveau d'eau et sa puissance sont tels qu'aucun tronc ne se bloque sur le seuil à engravures. Des apports de flottants ont été simulés également à la pointe de la crue centennale et au début de la séquence de purge dans la configuration C8. Les résultats montrent que l'arrivée de bois n'a que peu d'influence sur le comportement de la zone d'épandage, si ce n'est une légère accélération de l'auto-nettoyage du cours d'eau.

## REALISATION

Les travaux de réalisation de la zone d'épandage du Bévieux ont débuté en septembre 2010 et se sont terminés en mai 2011. La durée effective des travaux a été de 7 mois. Le chantier a débuté par l'excavation du bassin et la création de la digue longitudinale de séparation. Les travaux dans le cours d'eau, en particulier le seuil à engravures, ont été effectués durant la période de basses eaux hivernales (janvier – février 2011). Le déversoir latéral ainsi que les différents travaux de finition ont été réalisés au printemps 2011.

La Figure 18 montre l'ouvrage d'entrée de la zone d'épandage, avec l'Avançon sur la gauche, le déversoir latéral au centre et le bassin sur la droite. Les linteaux doivent encore être posés pour fermer la partie supérieure des engravures. L'ouvrage de sortie est visible sur la Figure 19.

Dans le but d'améliorer la valeur environnementale de l'aménagement, des hibernaculæ (zones d'hibernation pour les reptiles) ont été réalisées sur la rive gauche du bassin (exposition Sud). De plus, des mares ont été créées par surcreusement du fond de la zone d'épandage, de manière à favoriser l'émergence d'un milieu pionnier. Finalement, des abris pour la faune piscicole ont été aménagés dans l'Avançon.

Les travaux ont nécessité l'évacuation de 14'000 m<sup>3</sup> de matériaux, des mouvements de terre pour un volume d'environ 7'000 m<sup>3</sup> et la mise en place de 2'400 tonnes d'enrochements et 800 m<sup>3</sup> de béton. Les matériaux d'excavation se sont avérés de qualité suffisante pour être utilisés, après tamisage, pour la réalisation de la digue.

Le chantier a bénéficié de conditions météorologiques particulièrement clémentes. Le coût de réalisation, hors taxe et honoraires, s'élève à 600'000 CHF.



**Fig. 18** Vue amont du seuil à engravures (à gauche) et de la zone d'épandage (à droite)

**Fig. 18** View of the sill with orifices (left) and of the sediment retention basin (right)



**Fig. 19** Vue d'aval de la zone d'épandage, avec l'ouvrage de sortie (en bas à droite)

**Fig. 19** Downstream view of the sediment retention basin, with the outlet work (down right corner)

## CONCLUSIONS

L'étude expérimentale du projet d'une zone d'épandage sédimentaire, implantée en parallèle du cours d'eau de l'Avançon, a été effectuée par des essais sur modèle réduit. L'optimisation a été possible grâce à une approche itérative visant à satisfaire au mieux les critères de dimensionnement.

Le concept novateur de cet aménagement réside principalement dans le principe de fonctionnement de l'ouvrage d'entrée. Celui-ci est composé d'un seuil à engravures à deux orifices placé en travers du cours d'eau et d'un déversoir latéral sur la rive droite amont. En crue, la limitation de débit induite par le seuil provoque un exhaussement de la ligne d'eau amont et conduit au déversement d'une partie de l'écoulement vers la zone d'épandage. Le déversement sur le seuil latéral est initié dès que le débit de l'Avançon dépasse la crue annuelle. Pour les crues plus importantes, le ralentissement provoqué par le seuil a pour effet de favoriser l'alluvionnement du lit en amont et consécutivement la dérivation des sédiments charriés vers la zone d'épandage. Dans la configuration optimisée, le volume sédimentaire stocké dans la zone d'épandage atteint de manière satisfaisante les objectifs fixés pour les crues vingtennale, centennale et extrême. La dérivation indésirable de sédiments, observée en crue annuelle, ne satisfait pas rigoureusement le critère de dimensionnement. Elle implique un entretien régulier de la zone d'épandage.

Les essais effectués avec des corps flottants montrent que le seuil à engravures à deux orifices est source d'embâcles pour la crue annuelle. Lorsque les linteaux horizontaux fermant la partie supérieure des orifices sont retirés, la quantité de bois accumulée derrière le seuil est réduite. Compte tenu de cet effet, il a été décidé de mettre en place la configuration optimisée, avec des linteaux amovibles. Cela permettra, en cas de problème avéré, de retirer les linteaux pour dégager la section critique. Le volume de sédiments dans la zone d'épandage en crue centennale sera alors légèrement réduit.

L'optimisation expérimentale a mis en évidence le fait que la forme du déversoir latéral à niveau variable a un impact déterminant sur le comportement de l'ouvrage. Finalement, la réalisation d'une section à double lit dans le secteur amont de la zone d'épandage facilite le processus d'auto-nettoyage du cours d'eau.

## RÉFÉRENCES

- Bezzola G.R., Lange D. (2006). "Schwemmholz – Probleme und Lösungsansätze". Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETHZ, Zürich.
- Stucky SA, Service des Eaux Sols et Assainissement du Canton de Vaud (SESA) (2002). "Etablissement de la carte des dangers de l'Avançon de Bex – Données de base, identification des aléas et phénomènes, carte indicative des dangers", N° 4457/4006a, Renens, Suisse.
- Boillat J.-L., Geiges-Mayaud M., Teyssie Ph. (2009). "Auslaufbauwerk des Geschiebesammlers Fromatta" Wasser Energie Luft, 101. Jhrg., Heft 1/2009, pp. 32-36.
- Hachem T., Herzog B., Boillat J.-L., Schleiss A. (2012). "Gestion du risque d'inondation sur le Milibach en Suisse. Optimisation sur modèle physique", 12th Congress INTERPRAEVENT 2012, Grenoble, France.
- Hager W.H., Sinniger R. (1985). Flood storage in reservoirs. Proc. ASCE, J. Irrigation and Drainage, Vol. 111, IR1, 76-85.
- 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.