

Freeboard calculation of near critical flow

Calcul de la revanche pour les écoulements proche d'un écoulement critique

Niki Antonina Beyer Portner, Dr¹; Patrick Fellay, Bachelor of science in Civil Engineering²; Karim Laribi, Master of science in Civil Engineering³; Jean-Louis Boillat, Dr⁴

ABSTRACT

The hazard assessment of the Vièze River crossing the city of Monthey showed that large zones in the city could be flooded due to hydraulic capacity limitation of bridges. The authorities of Monthey thus decided to elaborate a flood protection project. In this context, a group of specialists was appointed to evaluate possible protection measures. In 2013, when the project was practically achieved, the Commission for Flood Protection of Switzerland published new recommendations concerning the freeboard of rivers. The required freeboard takes into account the uncertainty related to hydraulic and sediment transport computations as well as to drift blockage at bridges. The proposed conceptual approach is commonly applicable but requires to be completed in particular cases. For the Vièze River, the strict application of the guidelines leads to an unexpected over sizing, justifying the implementation of an adequate optimization process. The main focus was put on the water surface oscillations due to near-critical flow conditions.

RESUME

La carte des dangers de la Vièze qui traverse Monthey montre que de larges zones de la ville peuvent être inondées suite à une sous-capacité hydraulique de certains ponts.

Les autorités de la ville ont par conséquent décidé de faire élaborer un projet de protection contre les crues. Un groupement de spécialistes a été mandaté pour développer des mesures de protections.

En 2013, alors que le projet était pratiquement terminé, la Commission pour la Protection contre les Crues (CIPC) a publié des recommandations pour la détermination de revanche applicable aux aménagements de rivières. La revanche doit tenir compte des incertitudes dans le calcul de la ligne d'eau et des sédiments et du blocage de flottants aux ponts. Cette méthode permet de traiter la plupart des cas pratiques. Dans des cas particuliers elle doit être complétée ou étendue. Dans le cas de la Vièze, une application stricte conduit à un surdimensionnement, ce qui justifie une optimisation.

L'accent est mis sur les ondulations de surface pour les écoulements proche d'un écoulement critique.

1 HydroCosmos SA, Billens, SWITZERLAND, niki.beyer@hotmail.ch

2 Ville de Monthey

3 CERT ingénierie SA

4 Hydro Boillat

KEYWORDS

Flood protection, freeboard, surface undulations

INTRODUCTION

La Vièze traverse la ville de Monthey, située dans la plaine du Rhône dans le Canton du Valais. Elle a donc une pente faible d'environ 1 %. La carte des dangers de 2002 (GILAT – ETEC, 2002) montre que la ville est menacée d'inondations, souvent d'intensité moyenne avec des profondeurs d'écoulement entre 0.5 et 2.0 m, dues principalement à la sous-capacité hydraulique de certains ponts. La Ville de Monthey a alors décidé de lancer un projet de protection contre les crues.

Un groupement d'ingénieurs, d'urbanistes et de spécialistes en environnement a été mandaté pour évaluer les mesures possibles de protection contre les crues. Les objectifs concernent la protection contre les crues de la ville et l'intégration de la Vièze dans le réseau écologique de la plaine du Rhône. Les mesures de protection en ville requièrent une intégration harmonieuse dans le paysage urbain.

L'analyse économique du projet (optimum des dommages potentiels par rapport aux coûts de construction) a confirmé que la condition de dimensionnement correspond à une crue centennale de 200 m³/s. Le projet élaboré consiste en une combinaison de différentes mesures : surélévation des digues en ville, rehaussement de certains ponts, abaissement du lit sur le

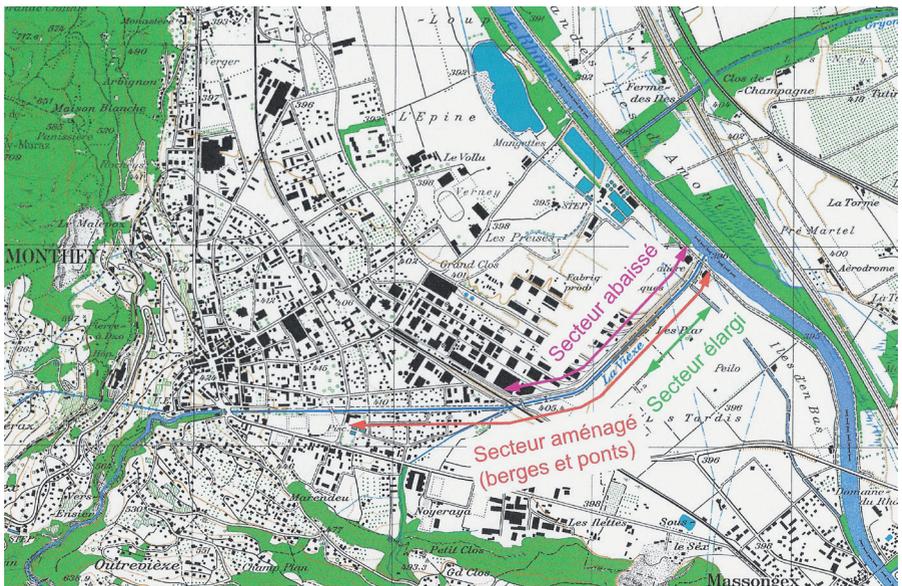


Figure 1 : Situation de la Vièze et aménagements proposés.

dernier kilomètre avant la confluence avec le Rhône et un élargissement de 500 m de long sur le secteur aval (cf. figure 1). Cet élargissement est dédié à la revitalisation du cours d'eau, au développement de la dynamique morphologique du lit et au rétablissement d'une connectivité pour la faune terrestre et aquatique. Les coûts du projet de construction sont évalués à 12 millions d'Euro.

RECOMMANDATIONS CIPC

En 2013, alors que le projet était pratiquement terminé, la Commission pour la Protection contre les Crues (CIPC) de l'Association Suisse pour l'Economie des Eaux a publié des recommandations pour la détermination de revanche applicable aux aménagements de rivières (CIPC, 2013). Ces recommandations visaient à standardiser la détermination de la revanche en Suisse en lien avec des paramètres spécifiques au projet, tenant compte du comportement hydraulique, du transport sédimentaire et du blocage de flottants contre les tabliers des ponts. Selon les recommandations, la revanche est ainsi composée de plusieurs éléments (cf. tableau 1), combinés par addition géométrique. En outre, la revanche doit être de 0.3 m au minimum et de 1.5 m au maximum pour les rivières du type de la Vièze. Pour la CIPC et les autorités de surveillance des aménagements de rivières, il est clair que ces recommandations doivent être appliquées aux projets cours d'eau, mais qu'elles peuvent être complétées ou étendues de cas en cas. Des dérogations sont ainsi possibles dans des situations particulières, si elles sont justifiées et étayées.

Tableau 1 : Eléments composant la revanche selon les recommandations CIPC (CIPC, 2013).

Phénomène	Calcul de revanche
Incertitude sur le niveau d'eau (modèle de calcul, rugosité, mensuration)	Proportionnel à la profondeur d'écoulement
Incertitude sur le niveau du fond (mensuration, dépôt de sédiments)	Selon expertise entre 0.1 et 1.0 m
Ondulation de surface	Pour les écoulements proches de l'écoulement critique, équivalent à la hauteur d'énergie
Blocage de flottants et obstruction de ponts	Selon expertise entre 0.5 et 1.0 m

Dans le cas de la Vièze, l'écoulement de la rivière est proche de la condition critique (nombre de Froude, $F=1$) et la prise en compte de la hauteur d'énergie équivaut à systématiquement fixer la revanche à sa valeur maximale. Pour la géométrie actuelle, en considérant 1.5 m de revanche, la capacité actuelle de la Vièze se réduit à 80 m³/s, alors qu'elle a été dimensionnée en 1941 à ras-bord pour 200 m³/s environ (cf. figure 2). Le rehaussement des berges

permettant de satisfaire une revanche de 1.5 m transformerait le cours d'eau en canal, confiné de part et d'autre par des hauts murs perchés au-dessus de la plaine habitée. Ceci impliquerait un impact important sur le paysage et induirait un risque potentiel supplémentaire en cas de rupture de digue. La stricte application des recommandations CIPC conduit ainsi à un surdimensionnement inattendu du profil en travers.

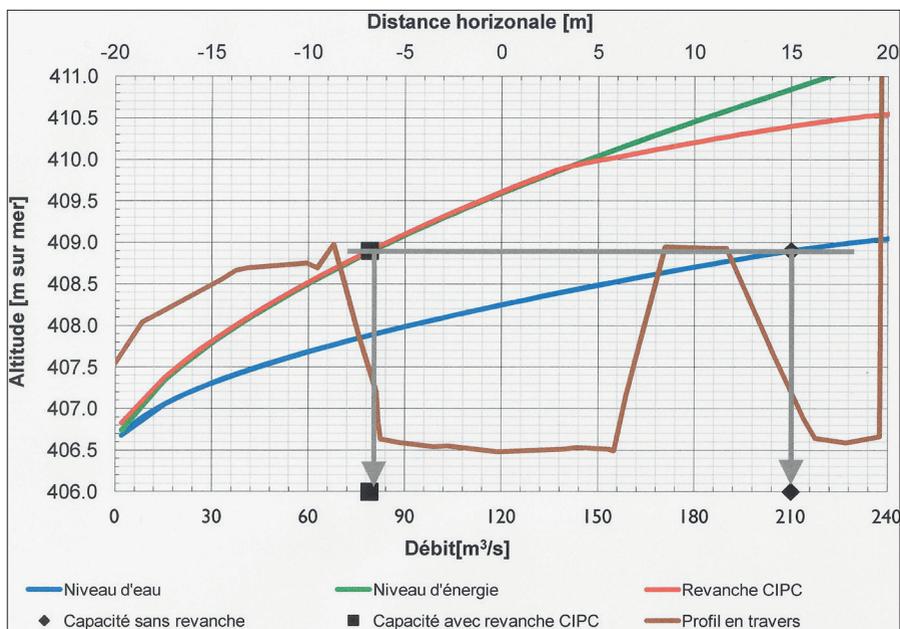


Figure 2 : Capacité de la Vièze avec un écoulement à ras-bord et avec une revanche selon CIPC.

MÉTHODOLOGIE

Un modèle unidimensionnel avec transport solide a été utilisé pour analyser les écoulements de la Vièze à l'état actuel et à l'état de projet. Le modèle a été établi à l'aide du logiciel Dupiro, développé par HydroCosmos SA (www.hydrocosmos.ch) et la rugosité a été calée à l'aide d'observations lors de crues récentes. Le diamètre moyen a été déterminé sur la base d'un levé en ligne. Deux crues ont été analysées pour l'état de projet : une crue centennale avec 200 m³/s de débit de pointe et une crue extrême avec 300 m³/s de débit de pointe. Le volume des sédiments transportés correspond à la capacité de transport à la limite amont du modèle. Pour la crue centennale, le volume correspond au volume annuel de sédiments estimé pour la Vièze. Il est encore supérieur à ce dernier pour la crue extrême.

La Vièze est un cours d'eau canalisé entre l'entrée en ville et la confluence au Rhône. Elle est caractérisée par un tracé pratiquement rectiligne, une section quasi prismatique et par l'absence d'obstacles susceptibles de perturber l'écoulement.

Toutefois, avec un nombre de Froude F variant entre 0.9 et 1.9 avec une moyenne de 1.2, la Vièze présente un écoulement systématiquement proche de la condition critique, $F=1$. La nature des écoulements qui en résulte est particulièrement instable car soumise à une alternance répétée de régimes fluviaux et torrentiels. Cette condition favorise la formation de ressauts hydrauliques, caractérisés par le passage d'un écoulement torrentiel ($F>1$) à un écoulement fluvial ($F<1$). Selon la classification standard des ressauts, (Sinniger et Hager, 1989), la gamme des valeurs de F précitées situe le phénomène dans la catégorie du ressaut ondulé ($1<F<1,7$).

De nombreux auteurs (Keulegan et Patterson, 1940; Mandrup-Anderson, 1978 ; Chanson, 1996 ; Castro-Orgaz et Hager, 2011) se sont appliqués à définir l'amplitude des ondes de surface d'un ressaut ondulé, sur la base de résultats expérimentaux et d'observations en nature.

L'ajustement des données disponibles permet de vérifier que l'amplitude des vagues f_v [m] peut être exprimée comme la différence des hauteurs conjuguées d'un ressaut classique h_2-h_1 , à l'aide de la formule 1 de Bélanger (Sinniger et Hager, 1989) (cf. figure 3).

Equation 1 : Formule de Bélanger.

$$f_v = h_1 \left(\frac{1}{2} \sqrt{1 + 8F_1^2} - \frac{3}{2} \right)$$

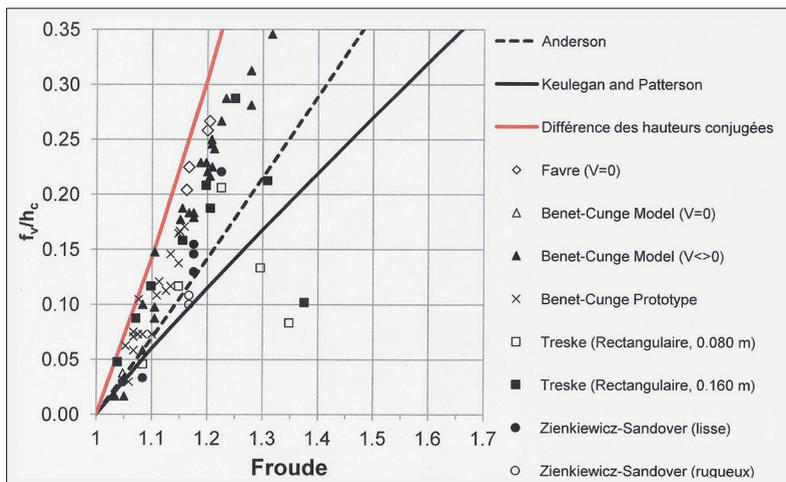


Figure 3 : Amplitude d'onde adimensionnelle f_v/h_c d'un ressaut ondulé où h_c est la hauteur critique de l'écoulement ($F=1$) en fonction du nombre de Froude amont F_1 . Comparaison entre les théories de Keulegan et Patterson (1940), Anderson (1978) et des données expérimentales mentionnées en légende (d'après Chanson 1995). Le trait rouge correspond à la condition $f_v=h_2-h_1$.

où $F1$ est le nombre de Froude de l'écoulement amont et $h1$ et $h2$ les hauteurs d'eau aux limites amont, respectivement aval, du ressaut.

RÉSULTATS

Il est ainsi proposé de calculer l'amplitude des vagues de surface en application de la formule de Bélanger (équation 1). Les calculs effectués montrent que la revanche nécessaire associée à la formation de vagues est de l'ordre de $f_v = 0.5$ m pour la crue de dimensionnement, respectivement $f_v = 0.6$ m pour la crue extrême de $300 \text{ m}^3/\text{s}$.

En intégrant les autres éléments de la revanche selon les recommandations CIPC (cf. tableau 2), la revanche nécessaire varie entre le minimum de 0.3 m et 1.1 m (cf. figure 4). Sur la figure 4, les endroits où l'écoulement est proche de l'écoulement critique sont visibles car la revanche est supérieure au minimum. Le pic vers le kilomètre 1400 est dû à un changement de section. La figure 4 montre également que la revanche peut être garantie sur de longs tronçons pour la crue de dimensionnement. Il reste un tronçon d'un kilomètre où les berges doivent être rehaussées. Ces interventions restent cependant modestes et peuvent être intégrées dans le paysage urbain. Cette réduction de la revanche est complétée par une analyse des cas de surcharge afin d'adapter les aménagements de protection pour garantir une gestion des risques résiduels pour les crues supérieures à la crue de dimensionnement (probabilité de blocage aux ponts, débordements favorisés dans des zones précises afin d'en protéger d'autres, résistance des digues à la submersion).

Tableau 2 : Eléments composant la revanche selon les recommandations CIPC (CIPC, 2013) – Application à la Vièze.

Phénomène	Calcul de revanche	Application à la Vièze
Incertitude sur le niveau d'eau	Proportionnel à la profondeur d'écoulement	0.1 m en moyenne
Incertitude sur le niveau du fond	Selon expertise entre 0.1 et 1.0 m	Admis à 0.1 m car le modèle intègre le transport solide
Ondulation de surface	Pour les écoulements proches de l'écoulement critique	0.5 m en moyenne
Blocage de flottants et obstruction de ponts	Selon expertise entre 0.5 et 1.0 m	Admis à 0 car aucun risque de blocage

CONCLUSIONS

Les nouvelles recommandations CIPC pour le calcul de la revanche conduisent, dans le cas de la Vièze, à un surdimensionnement des profils en travers. Tout en conservant l'esprit des recommandations, il est proposé de remplacer la revanche partielle correspondant à la hauteur d'énergie par la différence des hauteurs conjuguées d'un ressaut associé au nombre de Froude de l'écoulement. Les résultats issus de la littérature montrent que les ondulations

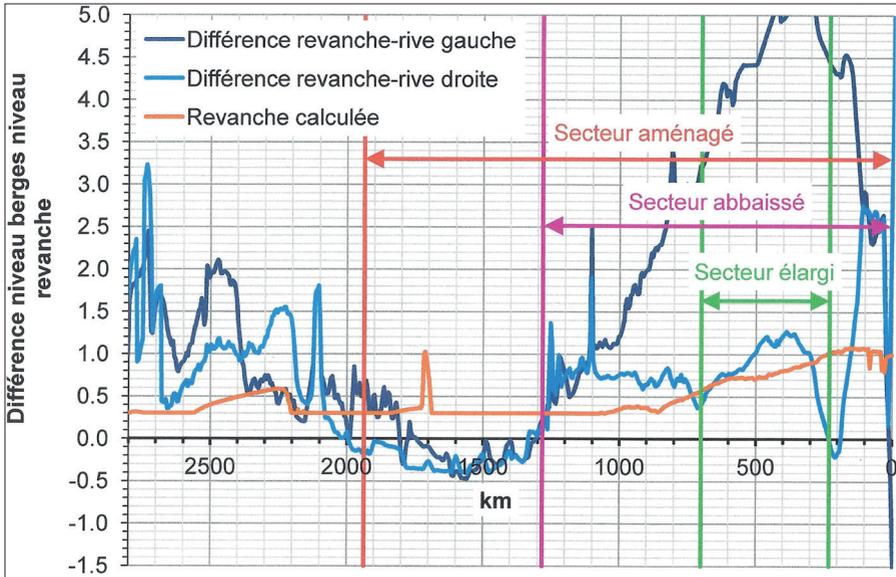


Figure 4 : Revanche nécessaire calculée sur le cours d'eau de la Vièze et revanche minimale imposée au projet pour la crue de dimensionnement. L'origine du kilométrage se trouve à la confluence avec le Rhône.

de surface, à considérer pour la revanche, atteignent au maximum la valeur proposée et que la hauteur d'énergie surestime largement le phénomène.

Selon cette méthodologie, une revanche variant entre 0.3 et 1.1 m donne un ratio raisonnable avec la profondeur d'écoulement de la Vièze. Elle permet un rehaussement des berges intégrable dans le paysage urbain de la ville de Monthey.

REFERENCES

- Castro-Orgaz O. and Hager W. H. (2011). Turbulent near-critical open channel flow: Serre's similarity theory. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, May 2011, p. 497-503.
- CIPC (2013). La revanche dans les projets de protection contre les crues et de l'analyse de dangers. *Recommandations de la Commission pour la protection contre les crues. Revue «Eau énergie air» – Cahier 2*, Baden, Suisse.
- Chanson H. (1996). Free-surface flow with near-critical flow conditions. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 23, No 6, p. 1272-7284.
- GILAT – ETEC (2002). Concept de protection contre les crues et concept de renaturation des cours d'eau sur la commune de Monthey – Rapport technique.
- Keulegan G. H. and Patterson G. W. (1940). Mathematical theory of irrotational translation waves. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, RP 1273, US Department of Commerce, 24 (1), p. 47-101.
- Mandrup-Anderson V. (1978). Undular hydraulic jump. *Journal of Hydraulics Division*, 104 (8), P. 1185-1188.
- Sinniger R. O. et Hager W. H. (1989). *Constructions hydrauliques. Ecoulements stationnaires. Traité de Génie Civil*, Vol. 15, PPUR, Lausanne, Suisse.