Elargisssement local de l'affluent dans une zone de confluence : comportement morphologique et potentiel écologique

Autor(en): **Ribeiro, Marcelo Leite / Blanckaert, Koen / Boillat, Jean-Louis**

Objekttyp: **Article**

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

Band (Jahr): **103 (2011)**

Heft 3

PDF erstellt am: **28.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-941816

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Elargissement local de l'affluent dans une zone de confluence

Comportement morphologique et potentiel écologique

Marcelo Leite Ribeiro, Koen Blanckaert, Jean-Louis Boillat, Anton Schleiss

Résumé

Les aménagements des cours d'eau ont été responsables d'un considérable affaiblissement de la valeur écologique de systèmes fluviaux dans les régions alpines d'Europe. Dans ce contexte, la morphodynamique des confluences alpines aménagées est étudiée expérimentalement, avec une attention particulière sur le potentiel d'un élargissement local de l'affluent en cas de renaturation des confluences. Les résultats montrent qu'un élargissement local de l'affluent augmente la variabilité sédimentaire du substrat ainsi que la diversité de la profondeur et des vitesses d'écoulement. Cette réponse est favorable au développement des habitats et au rétablissement de la connectivité latérale et longitudinale des réseaux fluviaux. L'élargissement offre un grand potentiel d'amélioration du statut écologique, aussi bien localement qu'à l'échelle du bassin versant. De surcroit, ce gain lié à l'élargissement n'est pas assorti d'effets contraires concernant la protection contre les crues.

Abstract

Local widening of a tributary in the confluence zone – morphodynamic behavior and ecological potential. In alpine regions of Europe, river training works were responsible for a considerable impoverishment of river ecosystems. The morphodynamics of regulated confluences have been experimentally investigated with special attention to the potential of local tributary widening in the framework of confluence rehabilitation projects. Results show that local widening of the tributary in the confluence zone increases the heterogeneity in sediment substrate, flow depth and flow velocity. This is favorable for in-stream habitat and for the connectivity between the main river and the tributary. Therefore, it has a high potential to improve ecological status both locally and on the stream catchment scale. In addition, local tributary widening is not associated to adverse impacts on flood safety.

Zusammenfassung

Aufweitung von Seitengewässern im Einmündungsbereich – morphodynamisches Verhalten und ökologisches Potenzial. Die Fliessgewässerkorrektionen im europäischen Alpenraum haben vielerorts zu einer Verarmung der ökologischen Funktionsfähigkeit der Gewässernetze geführt. Besonderes kritisch sind dabei die Einmündungen von Seitengewässern. Im Rahmen einer experimentellen Forschungsarbeit wurde deshalb die Morphodynamik von kanalisierten Einmündungen im Hinblick auf ihr Renaturierungspotenzial untersucht. Dabei hat sich gezeigt dass eine lokale Aufweitung des Seitengewässers im Einmündungsbereich die Gewässermorphologie hinsichtlich Vielfalt von Sohlensubstrat, Wassertiefen und Fliessgeschwindigkeiten stark verbessert. Dadurch ergeben sich günstige Bedingungen für neue aquatische Lebensräume. Zudem wird die durch die Gewässerkorrektionen verloren gegangene Durchgängigkeit der Einmündungen wieder hergestellt. Die lokale Aufweitung von Seitengewässern im Einmündungsbereich hat deshalb eine weiträumige positive Auswirkung auf den ökologischen Zustand des Gewässernetzes. Die Untersuchungen haben zudem gezeigt dass die Aufweitung von Seitengewässern im Mündungsbereich die Hochwassersicherheit bezüglich Geschiebetransport und Abflusskapazität keineswegs nachteilig beeinflusst.

1. Introduction

Les aménagements des cours d'eau dans les régions alpines d'Europe ont généralement transformé les larges rivières en tresses ou en bancs alternés en systèmes linéaires. Ceux-ci se caractérisent par un manque de diversité structurale, à savoir de bancs de graviers, d'îles, d'alternance de rapides et de zones calmes, comme c'est le cas du Rhône supérieur, en Suisse *(Figure 1)*. Ces interventions ont considérablement appauvri la valeur écologique de ces systèmes.

A partir de la fin du 20ème siècle, «la renaturation des cours d'eau» est devenue un concept de référence pour les professionnels de l'environnement et les autorités responsables de la gestion des cours d'eau. Le but prioritaire de la renaturation est de restituer l'espace vital nécessaire au cours d'eau, fortement dégradé par les interventions humaines. Ce concept associe une utilisation durable des cours d'eaux avec le bien-être des communautés riveraines. La reconstruction de l'espace vital se fait très souvent par un élargissement de tronçons de cours d'eau, pour permettre le rétablissement de la dynamique morpho-sédimentaire. De surcroît, les protections contre les crues doivent être adaptées aux risques hydrologiques liés à l'urbanisation croissante.

Les confluences sont les nœuds des réseaux fluviaux. Il s'agit de points

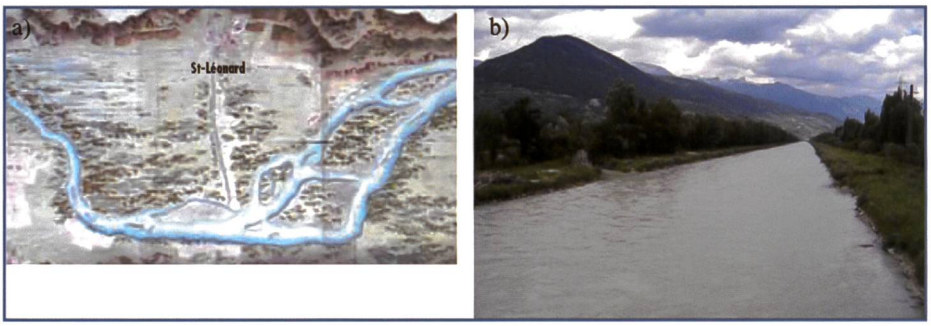

Figure 1a. Carte Napoléonienne du Rhône dans la région de St-Léonard en 1802 (SRCE-VS, 2008) et b) vue actuelle d'un tronçon canalisé du Rhône supérieur.

extrêmement importants du point de vue hydraulique mais aussi écologique. Hydrauliquement, la jonction entre deux ou plusieurs affluents crée des zones d'écoulement tridimensionnel très complexe. Cette complexité hydrodynamique, associée aux différents régimes de transport solide génère des zones de dépôt et d'érosion qui peuvent avoir des conséquences importantes lors de crues (*Best*, 1988; *Boyer, et al.*, 2006; *Rhoads, et al.*, 2009).

D'un point de vue environnemental, les confluences exercent des fonctions importantes pour la connectivité latérale et longitudinale ainsi que pour l'apport d'éléments organiques nécessaires à la survie des écosystèmes fluviaux. Les divers paramètres caractéristiques des confluences, tels que les débits, les régimes de transport solide, les apports organiques et la morphologie confèrent à ces zones une hétérogénéité environnementale qui ne se retrouve nulle part dans d'autres tronçons de rivières (*McBride, et al.*, 2008; *Rice, et al.*, 2008; *Mac Nally, et al.*, 2011). Ceci permet d'affirmer que les projets de renaturation des cours d'eaux n'atteignent pas les objectifs souhaités si la connectivité latérale et longitudinale du réseau n'est pas assurée (*Palmer*, 2009, *Lake et al.*, 2007). Cette connectivité est essentielle pour relier les populations des bassins versants, pour la conservation de la diversité génétique et taxonomique et pour connecter les habitats aux différents stades de vie des organismes aquatiques (*Lake et al.*, 2007). Pour cela, les projets de renaturation des confluences sont d'une extrême importance.

Les confluences rencontrées dans les régions alpines sont généralement caractérisées par des petits cours d'eaux à forte pente dont le lit est formé de graviers et qui se connectent asymétriquement à la rivière principale sous de grands angles. Pendant les crues, les petits affluents transportent d'importantes quantités de sédiments. Ces zones ont été particulièrement affectées par les travaux de correction réalisés dès le 18ème siècle et présentent actuellement un défi important, non seulement pour la protection contre les crues, mais aussi pour la renaturation. Les connaissances actuelles sur le comportement morphologique des confluences concernent principalement les régions de plaine (*Roy* and *Bergeron*, 1990; *Biron, et al.*, 1993; *Rhoads* and *Kenworthy*, 1995; *Leclair* and *Roy*, 1997; *Rhoads* and *Kenworthy*, 1998) et ne sont pas applicables au type de confluences rencontré dans les vallées alpines (*Leite Ribeiro, et al.*, 2009; *Leite Ribeiro*, 2011; *Leite Ribeiro, et al.*, 2011).

Dans le présent projet, la morphodynamique de confluences similaires à celles trouvées dans le bassin du Rhône supérieur est étudiée expérimentalement. Une attention particulière est portée au potentiel écologique d'un élargissement local de l'affluent dans une perspective de renaturation des confluences.

2. Etat écologique des confluences, à l'exemple du Rhône supérieur

Une analyse de la valeur écologique actuelle des confluences de la plaine du Rhône en amont du Léman ainsi que de leur potentiel écologique a été réalisée par Bourgeois (2006). La méthodologie développée repose sur 4 domaines: l'écomorphologie, le régime d'écoulement, la qualité de l'eau et la connectivité. Elle est appliquée aux principales confluences du Rhône à l'aval de Brigue:

- Ecomorphologie: Ce domaine décrit le degré d'artificialisation du tracé, du lit et des berges des cours d'eau, principalement dû à l'urbanisation et à l'intensification de l'agriculture à proximité ainsi qu'à la nécessité de protéger ces zones contre les crues.
- Ecoulement: Ce domaine considère le régime hydrologique de chaque cours d'eau. La modulation des débits ainsi que le transport solide peuvent être perturbés par des aménagements hydroélectriques existants. L'exploitation de gravières est aussi un facteur important pour le changement de régime du transport solide.
- Qualité de l'eau: Ce domaine examine les altérations de la qualité de l'eau dues aux rejets d'eaux usées (ménagères ou industrielles) et aux apports diffus de l'agriculture et du ruissellement. Ces rejets peuvent être préjudiciables à la faune et la flore.
- Connectivité: La connectivité latérale est le dernier domaine analysé. Elle est importante notamment pour la migration des poissons et des invertébrés. Plusieurs affluents sont actuellement aménagés avec des seuils pour fixer leur profil en long, ce qui représente la plus grande cause du manque de connectivité latérale.

La représentation graphique des résultats d'analyse selon ces quatre axes est présentée à la *Figure 2*. Il en ressort que l'état écologique actuel des affluents du Rhône supérieur est globalement faible et qu'aucune confluence ne présente un état écologique qui lui permette d'assurer entièrement ses diverses fonctions.

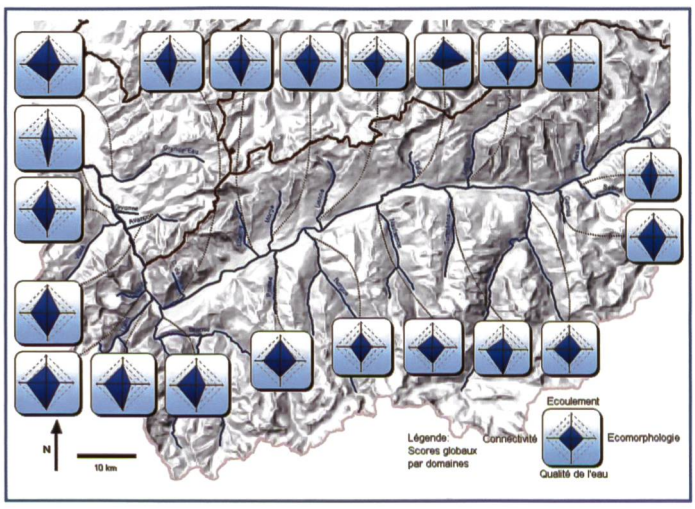

Figure 2. Représentation géographique de l'état actuel et du potentiel écologique des affluents du Rhône supérieur en plaine selon Bourgeois (2006).

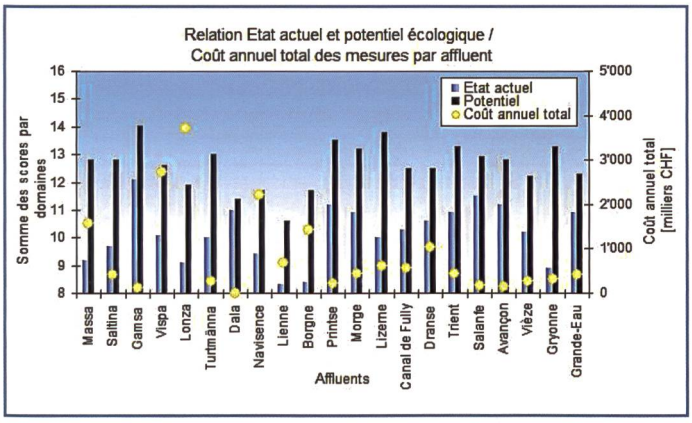

Figure 3. Etat écologique actuel et potentiel et coût total annuel par confluence selon Bourgeois (2006).

Les déficits actuels, avant tout écomorphologiques et hydrologiques, sont bien mis en évidence. Pour restaurer la valeur écologique de la plaine du Rhône supérieur, des mesures telles que la renaturation des cours d'eau, le maintien des débits d'étiage ou la suppression de seuils sont dès lors importantes. Comme illustré dans la *Figure 3*, ces mesures présentent des coûts raisonnables et sont actuellement considérées dans les multiples projets d'aménagement de cours d'eau dans le cadre de la 3ème Correction du Rhône supérieur (SRCE-VS, 2008).

3. Etude expérimentale du comportement morphodynamique des confluences

3.1 Description de l'étude

Le comportement morphodynamique des confluences a été systématiquement étudié en laboratoire pour quantifier l'influence d'un élargissement local de l'affluent à l'embouchure. L'installation expérimentale et les configurations testées sont inspirées de la situation sur le Rhône supérieur. Elles ne représentent toutefois pas une confluence existante, mais plutôt une confluence schématisée (Leite Ribeiro, 2011). L'installation est constituée d'un canal principal de 8.5 m de longueur et 0.50 m largeur. L'affluent, d'une longueur de 4.9 m et d'une largeur de 0.15 m, se connecte au canal principal sous un angle de 90° *(Figure 4)*. Les rapports de largeur entre l'affluent et le canal principal (B_t/B_m) et entre l'amont et l'aval du canal principal ($B_m/B_{p\text{-}c}$) se trouvent dans la plage de valeurs observées pour les confluences du Rhône supérieur (Leite Ribeiro, 2011).

Trois combinaisons de débits ont été considérées. Le débit en aval de la confluence est toujours de 20 l/s. L'unique changement concerne le ratio entre les débits de l'affluent (Q_t) et du canal principal (Q_m), soit $Q_r = Q_t/Q_m = 0.11$ (faible ratio de débit), 0.15 (ratio de débit intermédiaire) et 0.23 (ratio de débit élevé). Ces débits représentent des crues morphogènes, c'est-à-dire de période de retour proche de 2 ans. Chaque combinaison de débits a été testée dans quatre différentes configurations de confluence: une configuration de référence (sans élargissement) et trois élargissements, appelés : Petit ($B_t = 0.30$ m; $L_w = 0.45$ m), Moyen ($B_t = 0.45$ m; $L_w = 0.45$ m) et Grand ($B_t = 0.45$ m; $L_w = 0.60$ m).

Chaque essai a été réalisé en conditions stationnaires de débit dans l'affluent et le canal principal et un débit solide constant $Q_{st} = 0.30$ kg/min constitué de sédiments à granulométrie étendue ($d_{50} = 0.82$ mm et coefficient de gradation $\sigma = 4.15$) dans l'affluent. La courbe granulométrique adimensionnelle de ce mélange est similaire à celles rencontrées dans le Rhône. Concrètement, il n'y a pas de transport de sédiments dans le canal principal en amont de la confluence. Cette simplification vise à reproduire le cas d'une crue de l'affluent où ce dernier transporte relativement plus de sédiments que le canal principal.

Tous les essais ont démarré avec un fond plat et ont été poursuivis jusqu'à ce que les conditions d'équilibre soient atteintes, c'est-à-dire, lorsqu'il n'y plus d'évolution morphologique entre deux pas de temps. Les essais ont duré entre 22 et 24 heures. La présente analyse considère exclusivement la condition d'équilibre de chaque essai.

3.2 Résultats expérimentaux

3.2.1 Configuration de référence

Les mesures et observations effectuées dans la configuration de référence, relatives au champ de vitesses en trois dimensions, à la turbulence de l'écoulement, à la granulométrie des matériaux déposés, à la morphologie et au transport sédimentaire, ont révélé que les processus hydro-morpho-sédimentaires des confluences des régions alpines sont différents de ceux décrits par des modèles existants de la morphodynamique des confluences. Pour illustrer les principaux processus morphodynamiques agissant sur une confluence de type alpin, un modèle conceptuel a été établi par Leite Ribeiro (2011).

La morphologie des confluences résultant de cette étude est caractérisée par la présence d'un important banc de graviers en aval de la confluence. La différence des profondeurs d'écoulement entre l'affluent et le canal principal

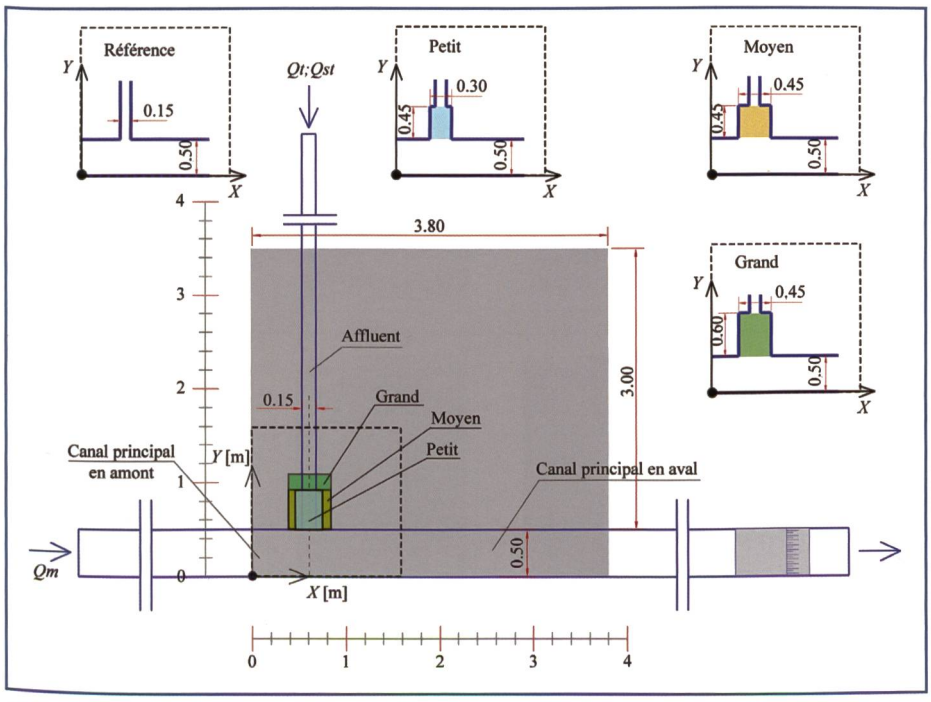

Figure 4. Installation expérimentale et configurations d'élargissement de l'affluent testées (les cotes sont en mètres).

conduit à l'existence d'une importante discordance entre les lits. De plus, aucune zone significative d'érosion n'est créée. En ce qui concerne l'hydrodynamique, la quantité de mouvement introduite par l'affluent, associée à la présence du banc, provoque une redistribution importante des masses dans la zone de confluence, induisant une déviation de l'écoulement principal vers la rive externe. L'écoulement principal proche du fond est peu modifié par l'affluent, donnant naissance à une structure d'écoulement à deux couches dans l'embouchure de l'affluent. Cet écoulement à deux couches joue un rôle important en empêchant la formation d'une zone de recirculation en aval de la confluence. Le banc de graviers constitué à l'aval de la confluence réduit la surface d'écoulement et provoque son accélération. Les sédiments transportés par l'affluent sont triés et véhiculés sur le parement du banc.

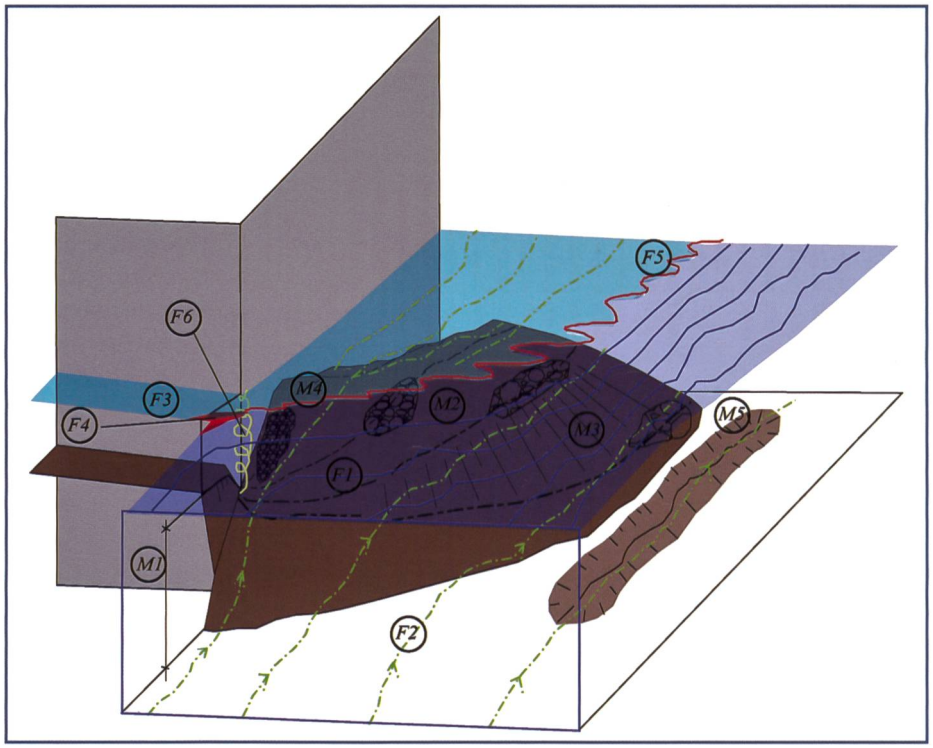

Figure 5. Modèle conceptuel des principaux processus morphodynamiques agissant sur une confluence de type alpin, entre un petit affluent dominant en terme de transport sédimentaire et un canal principal dominant en terme de débit (Leite Ribeiro, 2011). M1: Discordance de fond; M2: Banc de sédiments, M3: Corridors de transport des matériaux grossiers, M4: Corridors de transport des matériaux fins; M5: Petite zone d'érosion. F1: Ecoulement de surface provenant du canal principal, F2: Ecoulement proche du fond provenant du canal principal, F3: Ecoulement provenant de l'affluent, F4: Zone de stagnation, F5: Zone de cisaillement et F6: Vortex spirales dans le coin aval de la confluence.

3.2.2 Configurations avec élargissement local de l'affluent à l'embouchure

La morphodynamique des zones élargies répond différemment aux combinaisons de débit et à la forme de l'élargissement. Dans l'ensemble des résultats présentés à la *Figure 6* il est possible de distinguer 3 zones caractéristiques principales dans l'élargissement, les zones sèches (zsc), les zones stagnantes (zst) et les corridors d'écoulement de l'affluent (cpe).

Les zones sèches (zs) se rencontrent à l'entrée de l'élargissement et sont formées par remplissage au cours de l'essai. Selon les observations, ces zones sont alimentées par l'écoulement provenant de l'affluent et ne présentent pas d'écoulement. Les zones de stagnation sont formées par la rencontre des deux écoulements et peuvent progresser vers les zones élargies en fonction du scénario étudié. Il est intéressant de remarquer que ces zones ne sont pas alimentées par l'affluent et ne sont par conséquent pas remplies de sédiments.

Concernant les corridors principaux d'écoulement, les essais ont montré qu'un élargissement local provoque tout d'abord une expansion latérale de l'écoulement et ensuite une contraction due à la rencontre avec l'écoulement du canal principal. L'expansion vers l'amont de l'écoulement dans la zone élargie (à gauche dans la *Figure 6*) est principalement associée à la longueur de l'élargissement. La limite amont ne change pas entre le petit élargissement et

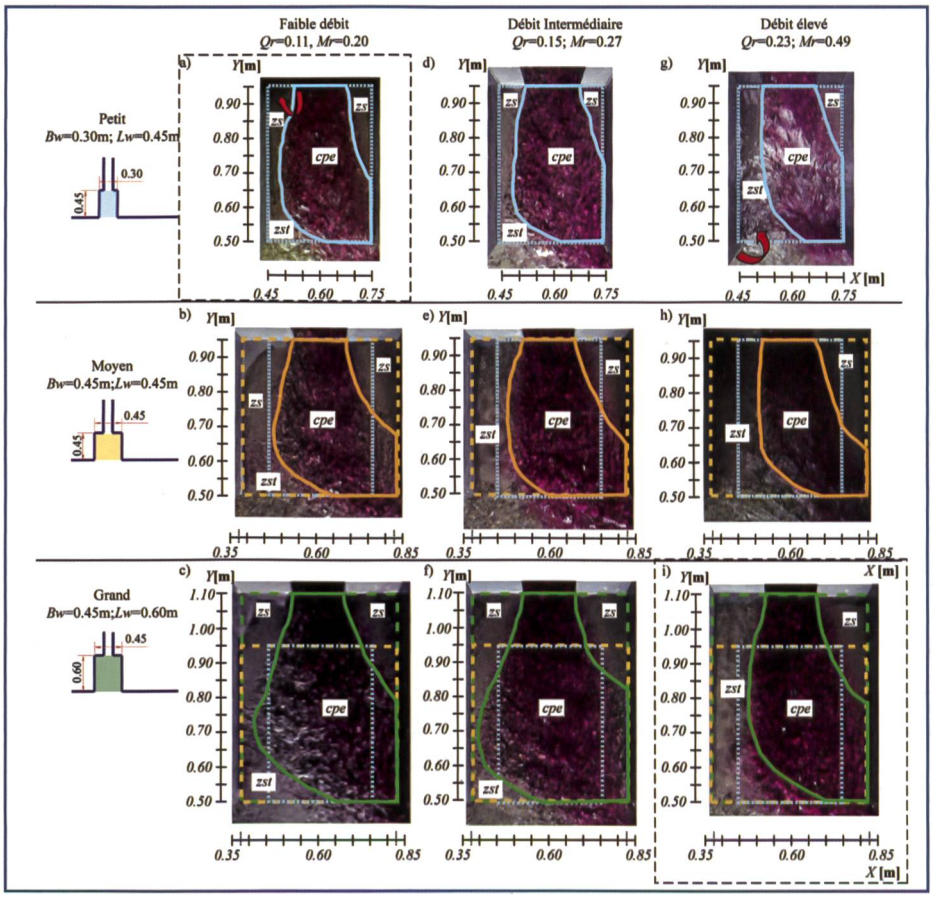

Figure 6. Vue de la zone élargie pour chacun des neuf essais. Les abréviations «zs» dénotent les zones sèches, «zst» les zones de stagnation et «cpe» les corridors d'écoulement. Les carrés trait-tillés sont illustrés par des photos dans la Figure 8.

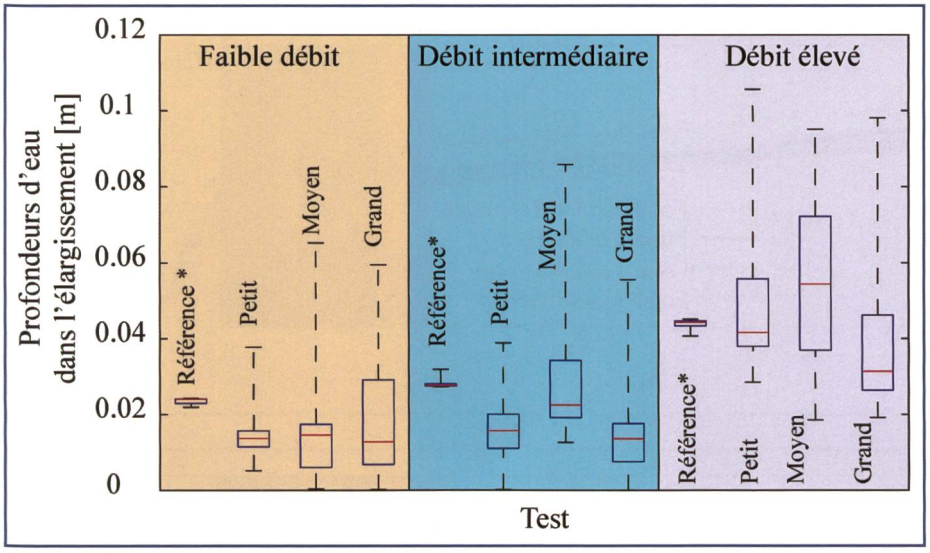

Figure 7. Représentation des profondeurs d'eau dans les zones élargies sous forme de boxplots avec la médiane (trait épais), les quartiles 0.25 et 0.75 (limites inférieur et supérieur du rectangle), et les valeurs maximales et minimales (trait-tillés). Dans les configurations de référence, les valeurs de profondeur d'eau ont été mesurées le long de l'affluent entre Y = 0.50 m et Y = 1.2 m (cf. Fig.4).

l'élargissement moyen (de même longueur), soit entre la première et la deuxième ligne de la *Figure 6*. Par contre, la limite extérieure du corridor se déplace vers la gauche quand le grand élargissement est comparé à l'élargissement moyen. Tous les élargissements conduisent à un rattachement de l'écoulement sur le côté aval de l'élargissement.

Le degré de liberté spatial introduit par l'élargissement, associé aux différents débits dans le cours d'eau principal et dans l'affluent conduit à la formation de zones morphologiques tridimensionnelles, d'une grande variabilité spatiale. La *Figure 7* montre les variations de profondeur d'eau mesurées dans les zones élargies en comparaison de celles mesurées dans l'affluent pour la configuration de référence. La formation d'une morphologie tridimensionnelle conduit à une plus grande variété de profondeurs d'eau en comparaison de la configuration de référence, ce qui est favorable à la création de biotopes.

L'élargissement local de l'affluent conduit également à une variabilité importante du substrat du lit comme illustré à la *Figure 8*. Les zones sèches (zs) sont constituées de sédiments extrêmement fins (bancs de sable) alors que les corridors principaux d'écoulement sont caractérisés par une granulométrie plus grossière. Les observations faites pendant les essais ont mis en évidence que les corridors de transport de sédiments dans les zones élargies sont directement liés aux corridors principaux d'écoulement. Dans les scénarios à grand rapport de débit, les corridors de transport sont contractés et davantage guidés vers l'aval en comparaison des essais à petit rapport de débit *(Figure 8)*.

L'analyse des profils en long sur l'axe de l'affluent *(Figure 9)* montre que les changements morphologiques dus à l'expansion locale de l'affluent ne sont pas ressentis par les niveaux d'eau ni par la morphologie de l'affluent à l'amont de l'élargissement. Ce résultat très important indique qu'une intervention locale dans la zone de la confluence ne produit pas d'effets adverses pour la protection contre les crues. Ceci est principalement dû au caractère local de l'élargissement où la capacité de transport initialement réduite est rapidement rééquilibrée par une légère aggradation et aussi par la déviation du corridor d'écoulement par le flux provenant du canal principal.

4. Potentiel écologique de l'élargissement d'un affluent à l'embouchure

L'élargissement vise à augmenter la morphodynamique d'un tronçon canalisé. Ceci est favorable au développement des habitats des invertébrés aquatiques, des poissons et de la végétation ainsi qu'à la création de hotspots pour la biodiversité (Benda et al., 2004, Rice et al., 2008). Les zones d'eau calmes (stagnation et/ou recirculation) présentes dans les élargissements peuvent également jouer un rôle important en tant que refuges pour les poissons en situation de crue du canal principal ou en cas de marnage. De plus, un

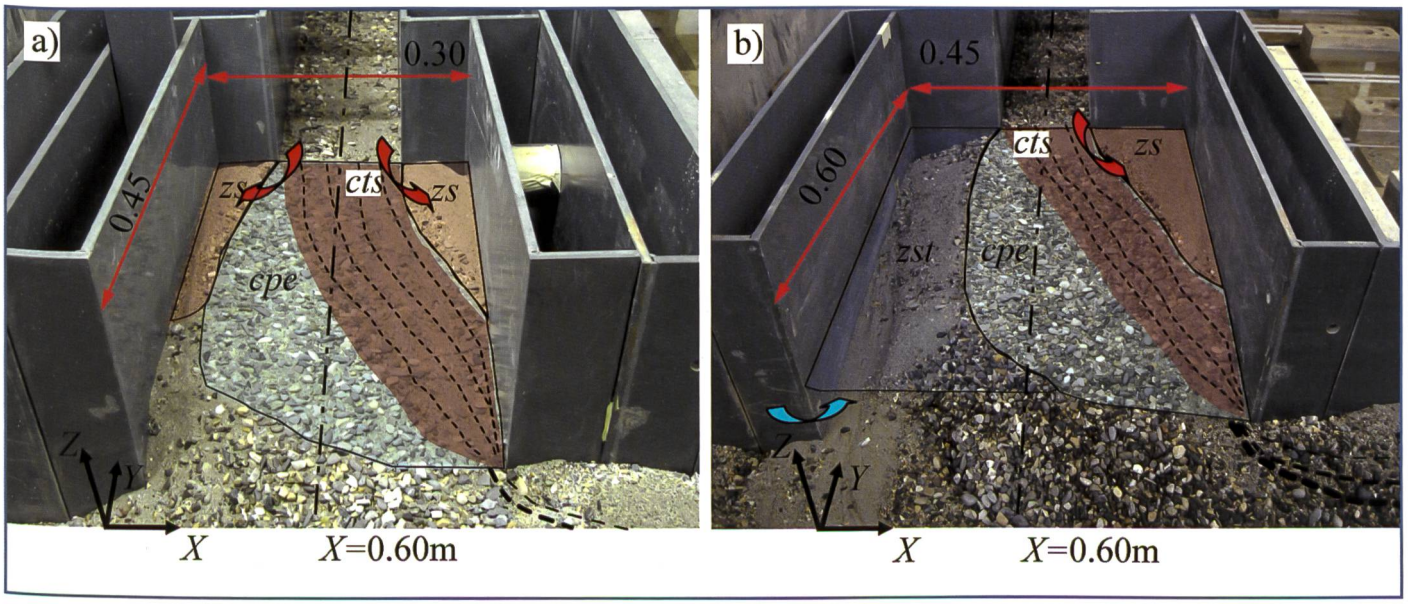

Figure 8. Vue des zones élargies dans les essais Faible – Petit (a) et Elevé – Grand (b). Les abréviations «zs» dénotent les zones sèches, «zst» les zones de stagnation, «cpe» les corridors d'écoulement et «cts» les corridors de transport de sédiments.

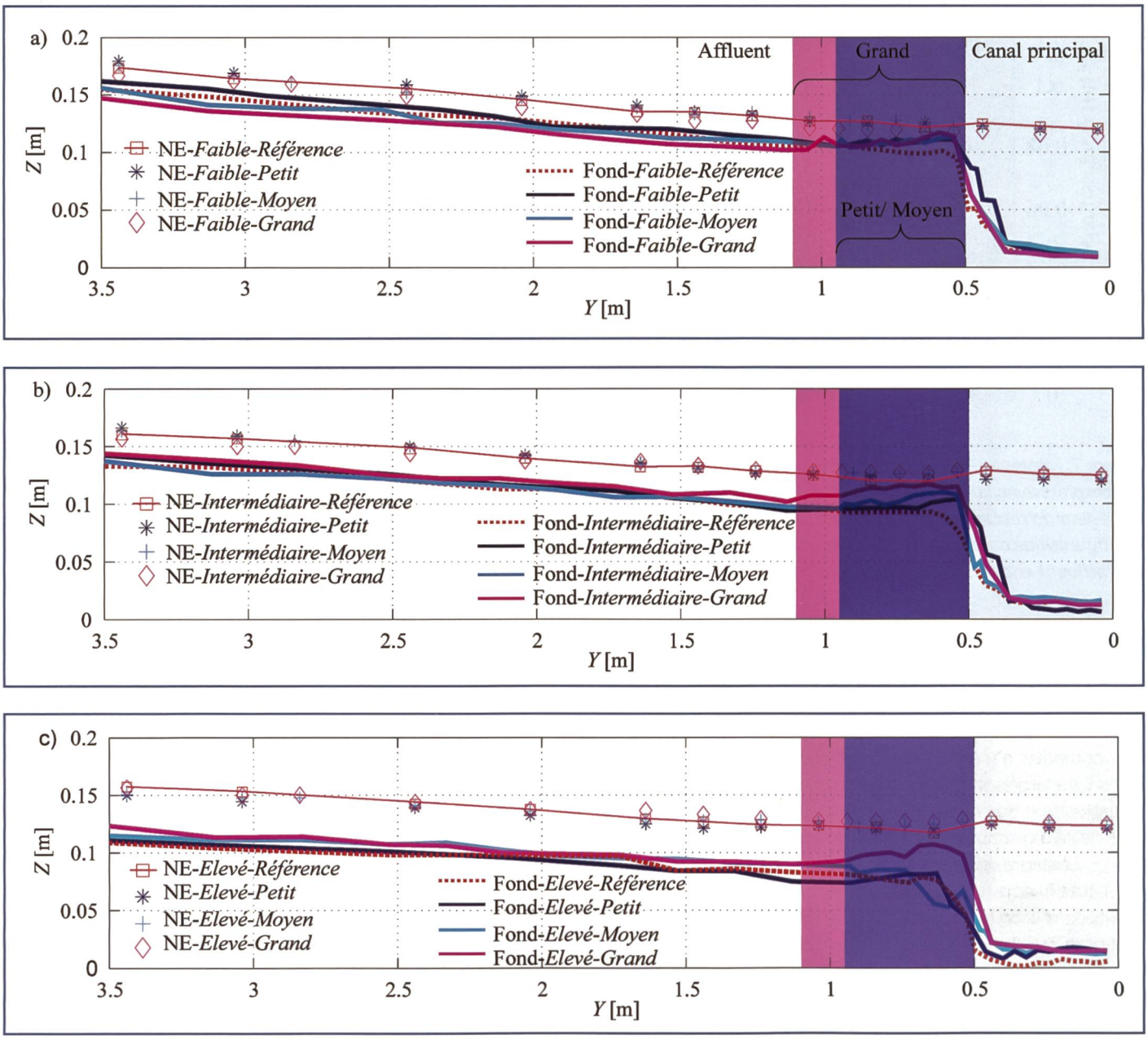

Figure 9. Profil en long dans l'axe de l'affluent (X = 0.60 m). a) Essais à «faible ratio de débits», b) essais à «ratio de débits intermédiaire» etc) essais à «ratio de débits élevé».

élargissement local de l'affluent peut créer une zone riveraine favorable à la diversité des plantes et des espèces animales comme les oiseaux, mammifères, insectes et amphibiens (Bohl, et al., 2003; Singer and Dunne, 2006; Schweizer, et al., 2007a; Weber, et al., 2009).

Dans une zone de confluence, un élargissement favorise le rétablissement de la connectivité latérale des réseaux fluviaux, dégradés par les aménagements de cours d'eau passés. Même si la morphodynamique des zones élargies répond différemment aux combinaisons de débit et à la forme de l'aménagement, un élargissement local de l'affluent améliore toujours l'hétérogénéité morphodynamique de la zone de confluence (*Figure 6, Figure 8* et *Figure 7*), sans toutefois provoquer d'effet négatif sur la protection contre les crues *(Figure 9)*. Ainsi, un élargissement local de l'affluent peut être considéré comme une solution efficace pour augmenter le potentiel écologique des systèmes fluviaux, sans réduire leur capacité de transport ni la sécurité en cas de crue.

Il est important de remarquer que les essais réalisés dans le cadre de ce projet sont caractérisés par des débits stationnaires, représentatifs de conditions morphogènes et que les résultats présentés ici correspondent à des conditions d'équilibre. Cependant, dans les réseaux fluviaux, les constantes variations de débits et par conséquent de niveaux d'eau et de vitesses sont des éléments fondamentaux pour l'écosystème fluvial (Schweizer, et al., 2007b). D'après l'équation synthétique proposée par Wasson, et al. (1998):

Hétérogénéité + Variabilité + Connectivité = Biodiversité

Pour cette raison, la liberté supplémentaire introduite par les zones élargies est d'une grande importance pour l'augmentation de la biodiversité dans les zones de confluences.

Un exemple de cette dynamique d'une zone élargie est montré dans la *Figure 10*, qui représente la situation d'écoulement de la Borgne avec lit élargi dans la zone de la confluence, lors d'une crue morphogène et pour un débit moyen annuel, étudiée qualitativement en modèle physique par Bidaud (2010). Ce cours d'eau présente actuellement un seuil fixe de 1.2 m à son embouchure, qui est responsable d'une altération significative de la connectivité latérale (Bourgeois, 2006). Pour le débit de période

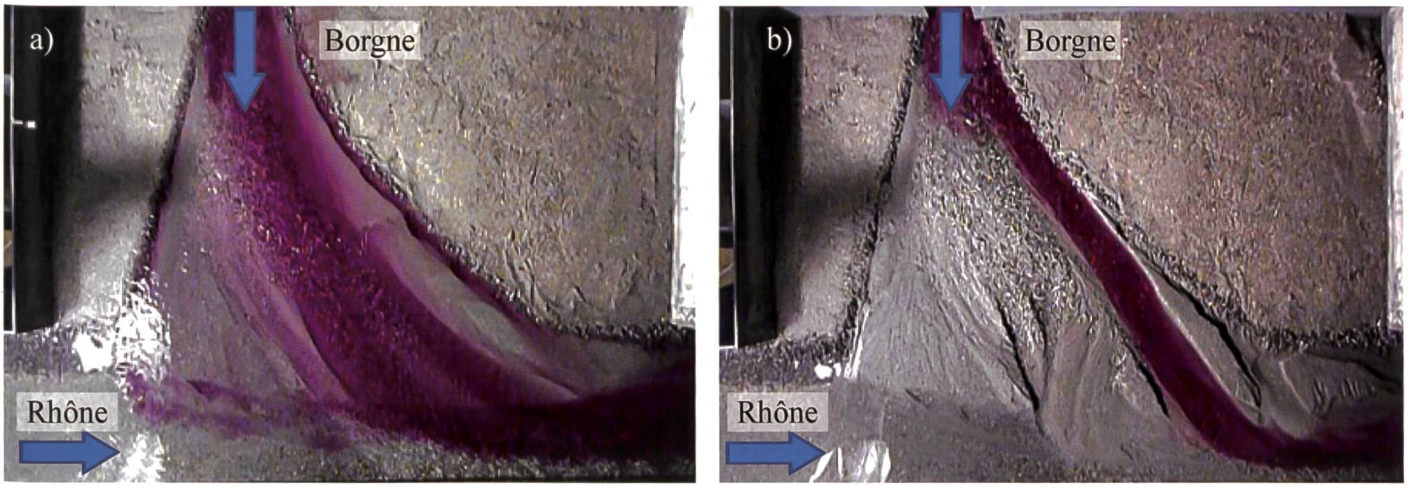

Figure 10. Vue zénithale du modèle physique de la confluence de la Borgne élargie et du Rhône supérieur. a) Crue morphogène de le la Borgne et b) Débit annuel moyen de la Borgne.

de retour de 2 ans *(Figure 10a)*, un chenal d'écoulement préférentiel se forme au centre de l'élargissement avec un pavage du fond du lit par des sédiments grossiers. Avec la réduction du débit de l'affluent *(Figure 10b)*, l'écoulement est dévié vers les bancs de sédiments fins déposés en rive gauche, qui offrent moins de résistance à l'écoulement. Un processus d'érosion latérale se développe jusqu'au moment où l'affluent atteint sa largeur et sa profondeur d'équilibre, asséchant totalement le chenal antérieur. L'élargissement de la zone de confluence a permis la suppression du seuil existant et son remplacement par une pente constante franchissable par les poissons. Une telle mesure se révèle propice à la restauration des habitats favorables aux truites de rivière (Kuttel, 2001).

5. Recommandations pour la pratique

La présente étude s'appuie sur un nombre limité de scénarios et configurations de la zone élargie. Les essais ont toutefois permis de mettre en évidence des comportements directement applicables à des projets de renaturation de confluences:

(i) L'élargissement local de l'affluent dans la zone de confluence est une solution très avantageuse pour le rétablissement de la connectivité latérale. De surcroit, vu le caractère local de cette intervention, son coût est relativement faible.

(ii) Sur la base des résultats expérimentaux, il est possible de conclure qu'un élargissement égal à 3 fois la largeur de l'affluent ($B_w = 3*B_t$) sur une longueur de 4 fois la largeur de l'affluent ($L_w = 4*B_t$) est suffisant pour atteindre les objectifs de renaturation, sans effets négatifs sur la protection contre les crues.

(iii) Dans l'optique d'une systématisation des essais en laboratoire, seuls des élargissements rectangulaires ont été examinés. Même avec des configurations aussi simples, des résultats satisfaisants ont été obtenus. Toutefois, pour un projet de renaturation, un élargissement progressif comme étudié qualitativement par Bidaud (2010) devrait s'avérer plus fonctionnel dans l'espace disponible.

(iv) Dans les affluents aménagés, il arrive souvent que l'apport solide ait été artificiellement réduit par l'installation de dépotoirs, dans un objectif de protection contre les crues. Lors d'un projet de renaturation, des interventions doivent de ce fait être envisagées au besoin pour rétablir un régime de transport solide suffisant pour restituer la morphodynamique du cours d'eau.

6. Conclusions

De nombreux systèmes fluviaux ont été altérés par les travaux de correction réalisés en Suisse dès le 18ème siècle, comme sur le Rhône en amont du Léman. La présente recherche considère un élargissement local de l'affluent à son embouchure dans le canal principal comme une solution efficace et peu coûteuse de renaturation. Les résultats se basent sur l'étude expérimentale systématique d'une confluence schématisée dont les caractéristiques géométriques et les relations de débits sont comparables à celles rencontrées dans les confluences du Rhône supérieur. L'analyse est faite sur les conditions d'équilibre associées à une crue morphogène de l'affluent.

Un élargissement local de l'affluent dans la zone de confluence permet d'augmenter la variabilité des paramètres requis pour un rétablissement des habitats, comme les profondeurs d'eau, les vitesses d'écoulement et la composition du substrat. Cette amélioration ne provoque pas d'effets négatifs sur protection contre les crues car les niveaux d'eau ne sont pas influencés par cette mesure.

Concrètement, un élargissement de trois fois la largeur de l'affluent canalisé sur une longueur de quatre fois cette largeur se révèle suffisant pour le rétablissement de la connectivité latérale du système.

Remerciements

La présente recherche fait partie du projet interdisciplinaire appelé «Integrales Flussgebietsmanagement» (Aménagement intégral des cours d'eaux). Le projet est financé par l'Office Fédéral de l'Environnement (OFEV) et les partenaires sont le LCH-EPFL, l'EAWAG, le WSL et la VAW-ETH à Zurich. Les auteurs tiennent à remercier particulièrement Maria Alp (EAWAG) pour les commentaires et propositions concernant les aspects biologiques de l'article.

Références

Best, J.L., (1988), Sediment transport and bed morphology at river channel confluences, Sedimentology, 35, 481–498.

Bidaud, L., (2010), Etude morphologique de confluences alpines. Application à la jonction du Rhône et de la Borgne, Rapport Projet de Master, LCH-EPFL.

Biron, P., A.G. Roy, J.L. Best, and *C.J. Boyer* (1993), Bed morphology and sedimentology at the confluence of unequal depth channels, Geomorphology, 8, 115–129.

Bohl, E., T. Kindle, and *A. Peter* (2003), Fischfaunistische Untersuchungen zur Umgestaltung der Mündung des Liechtensteiner Binnenkanals in den Alpenrhein. Abschlussbericht über

die Untersuchungsphase Juli 2000 bis August 2003, 55 pp, Amt für Umweltschutz des Fürstentums Liechtenstein.

Bourgeois, M., (2006), Accroissement de la valeur naturelle de la vallée du Rhône par un raccordement optimal des affluents du Rhône, Rapport Projet de Master, LCH-EPFL.

Boyer, C., A.G. Roy, and *J.L. Best* (2006), Dynamics of a river channel confluence with discordant beds: Flow turbulence, bed load sediment transport, and bed morphology, Journal of Geophysical Research, 111, 1–22.

Kuttel, S., (2001), Bedeutung der Seitengewässer der Rhone für die natürliche Reproduktion der Bachforelle und Diversität der Fischfauna im Wallis, Bericht Diplomarbeit, EAWAG – ETH Zurich.

Lake, P.S., Bond, N., Reich, P. (2007), Linking ecological theory with stream restoration. Freshwater Biology 52: 597–615.

Leclair, S., and *A.G. Roy* (1997), Variabilité de la morphologie et des structures sédimentaires du lit d'un confluent de cours d'eau discordant en période d'étiage, Géographie physique et Quaternaire, 51, 125–139.

Leite Ribeiro, M. (2011), Influence of Tributary Widening on Confluence Morphodynamics, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Suisse. Thèse n°4951 et Communication N° 46 du Laboratoire de constructions hydrauliques, LCH-EPFL, Ed. A. Schleiss, Lausanne.

Leite Ribeiro, M., K. Blanckaert, J.L. Boillat, and *A.J. Schleiss* (2009), Influence of the momentum flux ratio on confluence morphology, paper presented at 34rd IAHR Congress «Water Engineering for a Sustainable Environment», Vancouver, Canada.

Leite Ribeiro, M., K. Blanckaert, and *A.J. Schleiss* (2011), Discussion of «Three-dimensional numerical study of flow structure in channel confluences», Canadian Journal of Civil Engineering, 38, 124–126.

Mac Nally, R., E. Wallis, and *P.S. Lake* (2011), Geometry of biodiversity patterning: assemblages of benthic macroinvertebrates at tributary confluences, Aquatic Ecology, 1–12.

McBride, M., W.C. Hession, and *D.M. Rizzo* (2008), Riparian reforestation and channel change: A case study of two small tributaries to Sleepers River, northeastern Vermont, USA, Geomorphology, 102, 445–459.

Palmer, M.A. (2009), Reforming watershed restoration: Science in need of application and applications in need of science. Estuaries and Coasts 32:1–17.Rhoads, B. L., and S. T. Kenworthy (1995), Flow structure at an asymmetrical stream confluence, Geomorphology, 11, 273–293.

Rhoads, B.L., and *S.T. Kenworthy* (1998), Time-averaged flow structure in the central region of a stream confluence, Earth Surface Processes and Landforms, 23, 171–191.

Rhoads, B L., J.D. Riley, and *D.R. Mayer* (2009), Response of bed morphology and bed material texture to hydrological conditions at an asymmetrical stream confluence, Geomorphology, 109, 161–173.

Rice, S.P., P. Kiffney, C. Greene, and *G.R. Pess* (2008), The Ecological Importance of Tributaries and Confluences, 209–242 pp., John Wiley & Sons, Ltd.

Roy, A.G., and *N. Bergeron* (1990), Flow and particle paths at a natural river confluence with coarse bed material, Geomorphology, 3, 99–112.

Schweizer, S., M.E. Borsuk, I. Jowett, and *P. Reichert* (2007a), Predicting joint frequency distributions of depth and velocity for instream habitat assessment, River Research and Applications, 23, 287–302.

Schweizer, S., M.E. Borsuk, and *P. Reichert* (2007b), Predicting the morphological and hydraulic consequences of river rehabilitation, River Research and Applications, 23, 303–322.

Singer, M.B., and *T. Dunne* (2006), Modeling the influence of river rehabilitation scenarios on bed material sediment flux in a large river over decadal timescales, Water Resources Research, 42.

SRCE-VS (2008), Troisième Correction du Rhône. Sécurité pour le futur. Rapport de Synthèse du Plan d'aménagement., 157 pp, Canton du Valais. Service de Routes et Cours d'Eaux.

Wasson, J. G., J. R. Malavoi, L. Maridet, Y. Souchon, and L. Paulin (1998), Impacts écologiques de la chenalisation des rivières, 158 pp.

Weber, C., E. Schager, and *A. Peter* (2009), Habitat diversity and fish assemblage structure in local river widenings: A case study on a Swiss River, River Research and Applications, 25, 687–701.

Adresse des auteurs:
Marcelo Leite Ribeiro, Koen Blanckaert, Jean-Louis Boillat et *Anton Schleiss,* Laboratoire de constructions hydrauliques (LCH), Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), Station 18, CH-1015 Lausanne
secrétariat.lch@epfl.ch, http://lch.epfl.ch