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

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 114 (2022)

Heft: 2

Artikel: Impacts et enjeux de charriage d'une crue artificielle : exemple de la Petite Sarine 2020

Autor: Schroff, Robin / Mörtl, Christian / Vonlanthen, Pascal

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-990518

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 14.07.2025

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

Impacts et enjeux de charriage d'une crue artificielle – Exemple de la Petite Sarine 2020

Robin Schroff, Christian Mörtl, Pascal Vonlanthen, Giovanni De Cesare

Résumé

En octobre 2020, une crue artificielle d'essai a été relâchée dans la Sarine en aval du barrage de Rossens, dans le canton de Fribourg. L'objectif était de redynamiser le tronçon à débit résiduel de 13 km de long, surnommé la « Petite Sarine ». Manquant de crues naturelles et d'apports sédimentaires, la mosaïque des habitats de la Petite Sarine a été dégradée au cours des dernières décennies. Cet article présente un contrôle des effets de la crue artificielle de 2020 sur le plan éco-morphologique. Basée sur le jeu d'indicateurs OFEV « diversité des habitats », la méthodologie est complétée par diverses analyses supplémentaires (HMID, IRS). La crue a eu un effet positif temporaire en arrachant des algues filamenteuses et en nettoyant le lit mineur de sédiments fins en surface. Cependant, la comparaison des deux tronçons d'étude avant et après la crue démontre que la crue a également eu comme effet une accentuation de l'incision du lit et un appauvrissement systématique de la diversité hydromorphologique. Cette évolution négative peut être attribuée au manque de matériaux charriés pendant la crue. La disponibilité restreinte de graviers, le colmatage du substrat ainsi que le déclin continu de la surface de frayères à truites sont préoccupants d'un point de vue écologique. Afin de réussir l'assainissement à long terme, il est nécessaire d'aligner la gestion du débit et des sédiments sur le fonctionnement naturel du cours d'eau.

Zusammenfassung

Im Oktober 2020 wurde am Staudamm Rossens im Kanton Freiburg ein künstliches Hochwasser in die Saane abgegeben. Ziel war die ökologische Aufwertung der 13 km langen Restwasserstrecke, der «Kleinen Saane». Die Restwasserbewirtschaftung und das Geschiebedefizit der vergangenen Jahrzehnte liessen ihr einst diversifiziertes Lebensraummosaik verarmen. In diesem Artikel wird eine Studie über die ökomorphologischen Auswirkungen des künstlichen Hochwassers 2020 vorgestellt. Die Methodik basiert auf dem BAFU-Indikator-Set «Habitatvielfalt» und wird durch weitere Analysen ergänzt (HMID, IRS). Das künstliche Hochwasser hat in grossen Teilen des Flussbetts vorübergehend Fadenalgen entfernt und oberflächliche Feinsedimente ausgespült. Durch den Vergleich zweier Untersuchungsstrecken vor und nach dem Hochwasser wurden jedoch auch eine fortschreitende Sohleneintiefung sowie eine systematische Verarmung der hydromorphologischen Vielfalt festgestellt. Diese nachteilige Entwicklung deutet auf die zunehmende Erschöpfung verbliebener Geschiebevorkommen hin. Das geringe Kiesvorkommen, die Kolmatierung des Sohlensubstrats sowie der kontinuierliche Schwund an Forellenlaichgruben sind aus ökologischer Sicht besorgniserregend. Eine nachhaltige und erfolgreiche Sanierung der Kleinen Saane bedarf eines Restwasser- und Geschiebemanagements, welches auf der natürlichen Funktionsweise des Flusses basiert.

1. Etat écologique de la Petite Sarine et assainissement

La Sarine est une rivière en Suisse impactée par l'exploitation hydroélectrique. Prenant sa source au col du Sanetsch (2250 m), son parcours de 126 km est interrompu par plusieurs barrages. Le barrage de Rossens et son réservoir (Lac de la Gruyère) altèrent le régime d'écoulement et le régime de charriage du tronçon à débit résiduel situé en aval, surnommé la Petite Sarine *(Figure 1)*. Long de 13 km, ce tronçon est soumis à un débit minimum constant (hiver 2.5 m^3/s, été 3.5 m^3/s, depuis son augmentation en 2005), dépourvu des matériaux charriés retenus dans le réservoir. La vallée de la Petite Sarine est classée en tant que zone alluviale d'importance nationale, objet 62.

En entravant les processus régénérateurs naturels, le faible débit de dotation et le manque de charriage engendrent la dégradation de la zone alluviale. Au cours des dernières décennies, la mosaïque des habitats a été considérablement altérée *(Döring et al., 2018)*. Le creusement continu du fond du lit s'accompagne de la disparition de la plupart des bancs d'alluvions, des bras latéraux et des ilots *(cf. Figure 1)*. La consolidation du substrat par le colmatage physique (sédiments fins) ou le colmatage biogénique (formation de tuf) ainsi que son recouvrement par des algues filamenteuses compromettent son fonctionnement écologique. En manque de dynamique hydraulique et sédimentaire naturelle, la régénération du substrat et de la mosaïque des habitats est aujourd'hui fortement perturbée *(Schroff et al., 2021)*.

Pour les cours d'eau subissant les effets négatifs de l'exploitation hydroélectrique, la législation Suisse impose la mise en œuvre de mesures d'assainissement d'ici 2030. Une première crue artificielle d'essai a été relâchée dans la Petite Sarine en 2016 (avant correction $Q_{max} = 250\,m^3/s$, source: Groupe E SA. Après correction $Q_{max} = 195\,m^3/s \approx Q1$ naturel, source: *Stähly et al., 2021*). La crue a été combinée avec une réinjection de sédiments issus de l'ancien lit moyen. Environ 1000 m^3 de sédiments ont été excavés dans la forêt alluviale et placés en quatre dépôts alternés dans la rivière, 9 km en aval du barrage. Les effets de la crue combinée avec la réinjection de sédiments ont été immédiats et positifs *(Döring et al., 2018; Stähly et al., 2019)* mais pas persistants *(Schroff et al., 2021)*. Une deuxième crue artificielle

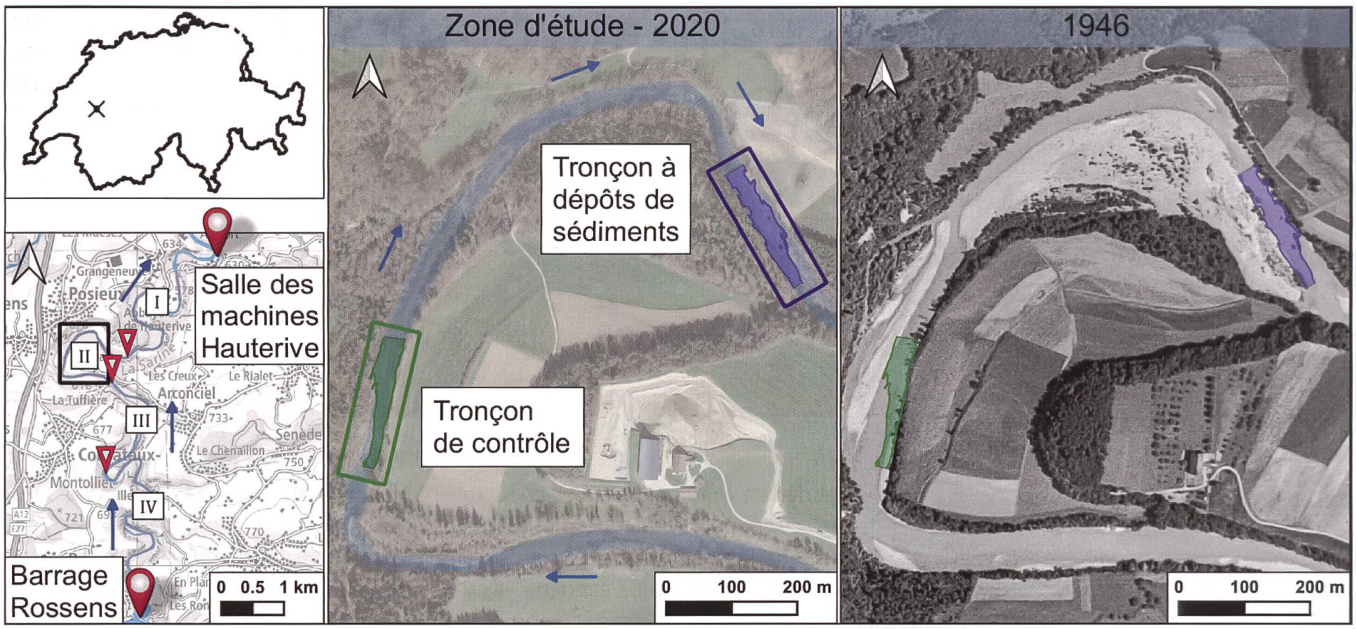

Figure 1: Aperçu de la zone d'étude. Subdivision de la Petite Sarine en quatre tronçons *I* à *IV* pour la cartographie des frayères (gauche). Définition des tronçons d'étude pour les relevés des indicateurs (centre). Morphologie du lit majeur avant la construction du barrage (droite). © arrière-plan: swisstopo.

(Q_{max} = 225 m³/s, source: Groupe E SA) a été effectuée en octobre 2020, sans apports sédimentaires supplémentaires. Un contrôle des effets éco-morphologiques de cette crue est présenté ci-après.

2. Matériel et méthodes

Les campagnes de mesures ont été menées au début de l'été 2020 et 2021, avant et après la crue artificielle. Une solution de cartographie numérique a été conçue et utilisée pour les relevés. Elle consistait en une application SIG mobile (QField) opérée sur une tablette de terrain et connectée à une antenne GNSS RTK (Emlid Reach RS2). La précision horizontale fournie par le service de correction swipos NTRIP pendant la campagne de 2021 était en moyenne de 3.6 cm. La précision horizontale effective des positions utilisées était de 2.0 cm. Combinée avec des orthophotos de haute résolution, l'orientation sur le terrain et la précision requise des données étaient garanties. Les conditions météorologiques permettaient une visibilité satisfaisante du substrat. Le recouvrement du substrat a été identifié à l'aide d'un aquascope. Les mesures de vitesse d'écoulement ont été effectuées à l'aide de l'instrument Flow Tracker de SonTek. Le débit résiduel d'été était constant à 3.5 m³/s.

Indicateur	Aspect analysé	**Attributs** et *Caractéristiques* OU Valeurs statistiques	Source
Ind 1.1	Structure du fond du lit	**Structure**: 1 *Banc*, 2 *Fosse*, 3 *Chenal*, 4 *Plat*, 5 *Radiers*, 6 *Ecoulement secondaire*, 7 *Eaux peu profondes*, 8 *Seuil*, 9 *Mouille*	[1]
Ind 1.2	Structure des rives	**Sinuosité**: 1 *Linéaire*, 2 *Convexe*, 3 *Concave*; **Nature**: 4 *Aménagement perméable*, 5 *Aménagement imperméable*, 6 *Substrat meuble*, 7 *Racines*, 8 *Roches*; **Pente**: 9 *Plat*, 10 *Pentu*	[1]
Ind 1.3	Profondeur d'eau	**Profondeur d'eau maximale**: 1 Ecart-type, 2 Moyenne, 3 Coefficient de variation (en prenant les profondeurs maximales par profil en travers)	[1]
Ind 1.4	Vitesse d'écoulement	**Vitesse d'écoulement**: 1 Ecart-type, 2 Moyenne, 3 Coefficient de variation	[1]
HMID	Diversité hydro-morphologique	**Profondeur d'eau**: 1 Ecart-type, 2 Moyenne, 3 Coefficient de variation (en prenant l'ensemble des mesures de profondeur); **Vitesse d'écoulement**: 4 Ecart-type, 5 Moyenne, 6 Coefficient de variation	[2]
Ind 1.5	Offre en abris	**Type d'abris**: 1 *Pierres immergées*, 2 *Pierres non immergées*, 3 *Petites particules organiques*, 4 *Particules organiques de taille moyenne*, 5 *Grosses branches*, 6 *Troncs d'arbres*, 7 *Souches*, 8 *Végétation surplombante*, 9 *Rive creusée*, 10 *Plantes aquatiques*, 11 *Herbe surplombante / roseaux*, 12 *Zones d'eau avec turbulences*, 13 *Affouillements*	[1]
Ind 1.6 A1	Substrat	**Nature**: 1 *Sédiments fins*, 2 *Sable*, 3 *Graviers*, 4 *Pierres*, 5 *Grandes pierres*, 6 *Blocs*, 7 *Roches*, 8 *Matériaux organiques*, 9 *Substrat artificiel*	[1]
Ind 1.6 A2	Substrat	**Capacité à la mobilisation**: 1 *Dépôts de matières en suspension*, 2 *Matériaux charriés fins*, 3 *Matériaux charriés grossiers*, 4 *Matériaux du fond du lit mêlés à des matériaux charriés*, 5 *Matériaux du fond du lit grossier*	[3]
IRS	Substrat	**Aptitude à la reproduction de la truite**: 1 *Substrat propice*, 2 Non propice car dégradé ou artificiel, 3 *Non propice en raison de sa nature ou d'une profondeur d'eau insuffisante*	[4]

Tableau 1: Aperçu du jeu d'indicateurs 1 «diversité des habitats» (JI1) ainsi que des indicateurs HMID et IRS. Résumé des attributs, caractéristiques et valeurs statistiques sur la base desquels le calcul de chaque indicateur repose. Sources: [1] OFEV (éd.), 2019, [2] Gostner et al., 2013, [3] Hunzinger et al., 2018, [4] Schroff et al., 2021.

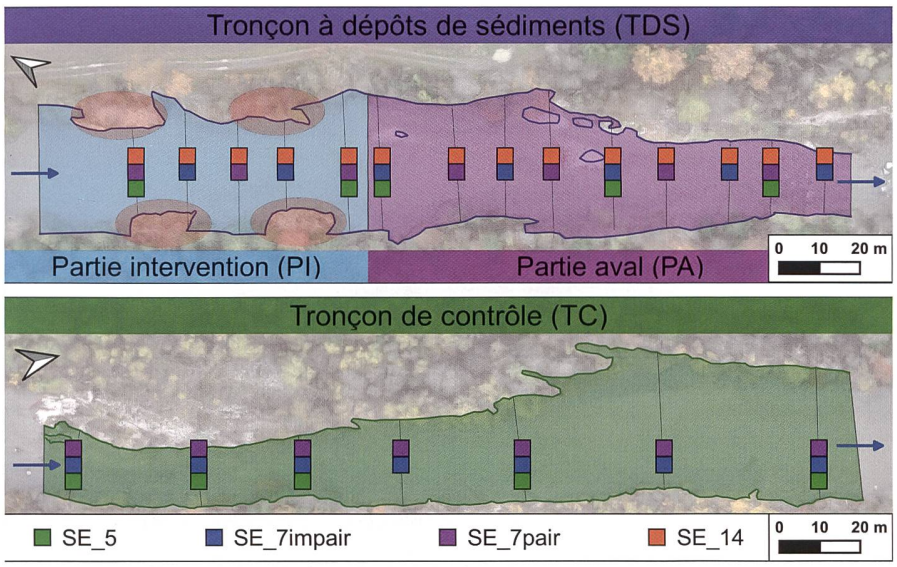

Figure 2: Schémas d'évaluation. Subdivision du tronçon à dépôts de sédiments en deux tronçons partiels (en haut). Positions des quatre dépôts de sédiments de 2016 (ellipses rouges) et positions des profils en travers (traits noirs). L'appartenance des profils en travers aux quatre sous-ensembles SE_5, SE_7impair, SE_7pair et SE_14 est indiquée par les symboles figurant dans la légende. ©arrière-plan: groupe de recherche Ökohydrologie ZHAW.

2.1 Méthodologie du contrôle des effets

La méthodologie est principalement basée sur le jeu d'indicateurs 1 «diversité des habitats» (JI1) de la documentation pratique pour le contrôle des effets des revitalisations de cours d'eau *(Weber et al., 2019)*. L'application du JI1 dans le contexte d'une crue artificielle s'est avérée pertinente et révélatrice *(Schroff et al., 2021)*. La méthodologie est complétée par divers analyses et indicateurs supplémentaires permettant une évaluation plus ciblée.

Le contrôle des effets comprend la comparaison de deux tronçons de 200 m de long chacun *(Figure 1)* avant et après la crue. Le tronçon à dépôts de sédiments (TDS) couvre les quatre dépôts mis en place en 2016 et peut être sous-divisé en deux parties ou tronçons partiels *(Figure 2)*. La partie intervention (PI, 80 m) délimite le périmètre des dépôts initiaux et est suivie par la partie aval (PA, 120 m). Le tronçon de contrôle (TC) se situe 1 km plus en amont. Les mesures hydrométriques de la profondeur d'eau ainsi que de la vitesse d'écoulement ont été effectuées le long de 14 profils en travers (PT) dans le tronçon à dépôts de sédiments. En raison d'une capacité limitée, les profils en travers analysés dans le tronçon de contrôle étaient moins nombreux. 5 profils ont été effectués en 2020 et 7 profils en 2021. La comparaison interannuelle et inter-tronçon des indicateurs calculés à partir des mesures hydrométriques est basée sur quatre sous-ensembles (SE) de l'ensemble des profils en travers, comme illustré à la *Figure 2*.

2.2 JI1: Jeu d'indicateurs «diversité des habitats»

Le JI1 se compose de six indicateurs. Chaque indicateur évalue un aspect écomorphologique différent sur une fourchette de 0 (dégradé ou artificiel) à 1 (proche de l'état naturel). Le *Tableau 1* résume les attributs, caractéristiques et valeurs statistiques sur la base desquels chaque indicateur est calculé. Pour l'indicateur 1.2, la sinuosité, la nature et la pente des rives sont relevées sur toute la longueur des tronçons d'étude. Les structures du fond du lit (indicateur 1.1), la nature du substrat et sa capacité à la mobilisation (indicateurs 1.6) sont relevées dans le lit moyen. La cartographie des abris (indicateur 1.5) est généralement restreinte au lit mouillé. La profondeur d'eau (indicateur 1.3) et la vitesse d'écoulement (indicateur 1.4) ont été mesurées à un intervalle régulier de 1.4 m le long des profils en travers. Les détails de calcul de chaque indicateur figurent dans la fiche technique du JI1 (OFEV (éd.), 2019).

2.3 Analyses et indicateurs complémentaires

Dans le but d'évaluer en détail les impacts morphologiques de la crue ainsi que l'évolution de la qualité du substrat, des analyses et indicateurs complémentaires ont été intégrés au contrôle des effets. L'évolution du fond du lit entre 2020 et 2021 a été analysée à partir des profondeurs d'eau mesurées. L'analyse a demandé le positionnement relatif du niveau de la surface d'eau. Ainsi, le niveau de référence des profils en travers de 2021 a été ajusté en considérant les surfaces immobiles sur fond rocheux. Afin d'optimiser la correspondance des points de mesure associés au fond rocheux, l'ensemble des points de chaque profil présentant un décalage systématique ont subi une correction horizontale, suivie, le cas échéant, d'une correction verticale par interpolation. Les profils sans fond rocheux du tronçon à dépôts de sédiments ont été ajustés en utilisant la correction verticale moyenne des profils avec fond rocheux.

L'indice hydro-morphologique de la diversité *(HMID; Gostner et al., 2013)* propose une perspective alternative sur la diversité de la profondeur d'eau et de la vitesse d'écoulement en synthétisant l'ensemble des deux mesures hydrométriques. Un score supérieur à 12 indique une diversité intacte des habitats hydrauliques. Les cours d'eau canalisés et morphologiquement déficitaires obtiennent en règle générale un score inférieur à 5.

En suivant la méthode de l'indicateur de l'aptitude à la reproduction de la truite basée sur la dégradation du substrat *(IRS; Schroff et al., 2021)* le colmatage extérieur et la consolidation (colmatage intérieur) de graviers et pierres ont été analysés. Le colmatage extérieur local est exprimé en termes de pourcentage de surface couverte par des sédiments fins (*embeddedness* ou *percent fine cover*, PFC). Un taux de couverture local de PFC = 25 % est considéré comme critique, les taux plus élevés étant nuisible à la reproduction de la truite. La consolidation est analysée à l'aide d'un test avec la botte. Pour chaque surface de graviers ou pierres, la force nécessaire pour creuser jusqu'à une profondeur de 15 cm est associée à l'une des trois catégories: substrat meuble, consolidation avancée, consolidation sévère.

Dans un suivi écologique à long terme, l'association La Frayère étudie l'évolution des surfaces de frayères à truite. Les données des positions et de la surface des frayères sont relevées chaque année au tournant de l'année depuis 1996. La subdivision de la Petite Sarine en quatre tronçons I à IV pour l'évaluation de la surface totale de frayères est indiquée à la *Figure 1*. Dans certaines années, les frayères n'ont été cartographiées que sur les tronçons I et II en raison d'une capacité limitée. Pour étudier les corrélations entre ces données écologiques et les déversements exceptionnels relâchés dans la Petite Sarine, des données de débit fournies par Groupe E

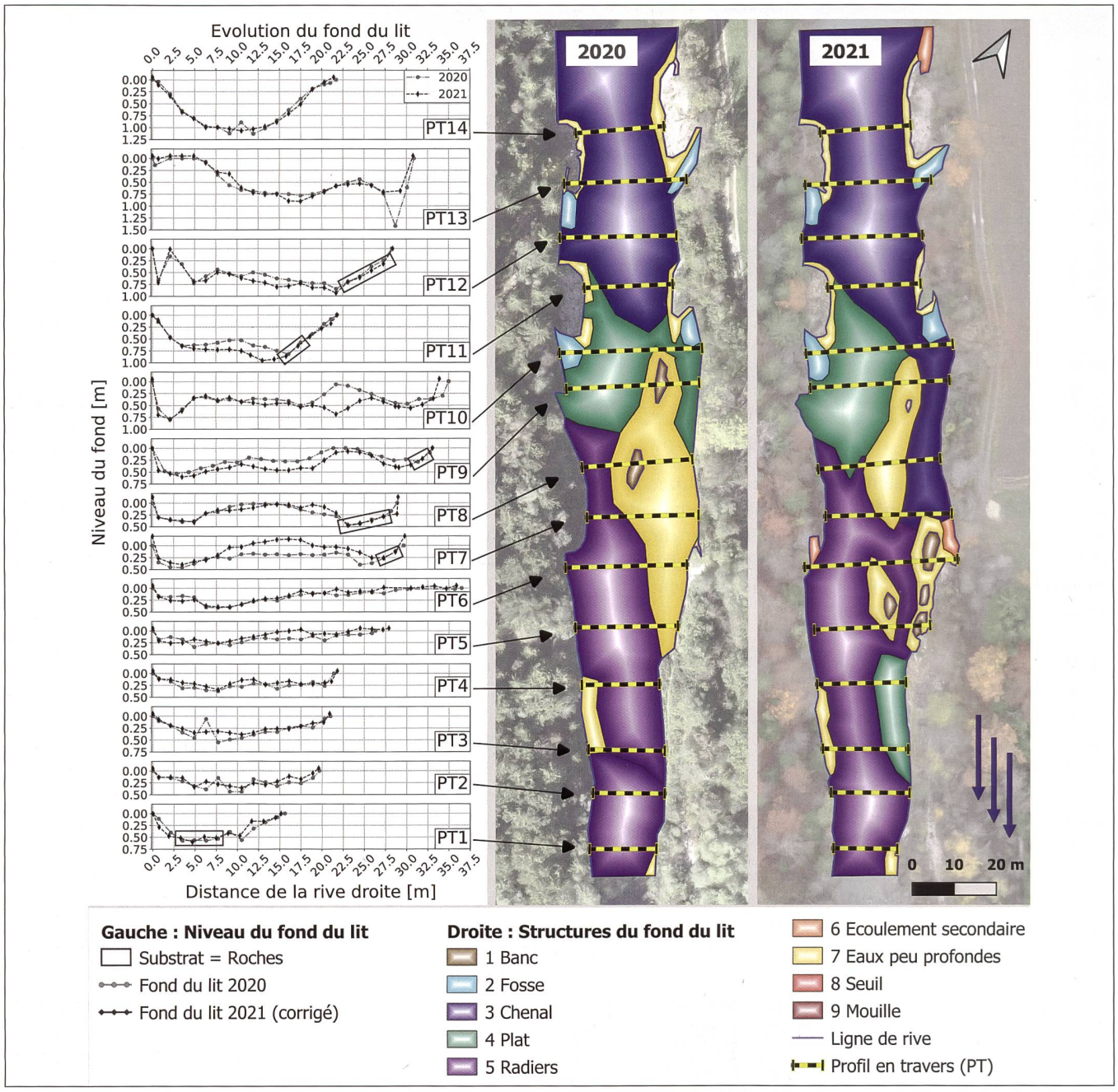

Figure 3: Evolution du niveau du fond du lit (gauche) et des structures du fond du lit (droite) dans le tronçon à dépôts de sédiments. Le niveau de référence à 0 correspond au niveau de la surface d'eau en 2020. ©arrière-plan: groupe de recherche Ökohydrologie ZHAW.

SA ont été analysées. Avant 2010, les volumes journaliers déversés sont disponibles, omettant le débit de dotation. A partir de 2010, des valeurs instantanées du débit sont disponibles de quart d'heure en quart d'heure, basées sur l'ancien diagramme d'ouverture des vannes et en considérant le débit de dotation. Le diagramme d'ouverture des vannes a été précisé en 2018, fournissant des valeurs plus exactes.

3. Résultats

3.1 Morphologie

Les effets de la crue sur la morphologie dans les deux tronçons d'étude sont principalement limités au lit mouillé initial. Le tracé et la structure de la ligne de rive sont restés essentiellement inaltérés. La *Figure 3* présente pour le tronçon à dépôts de sédiments la comparaison des structures du fond du lit avant et après la crue ainsi que l'évolution du fond du lit à la hauteur des profils en travers. Les changements structurels les plus importants ont eu lieu dans la partie aval. Les bancs d'alluvions ont été entrainés en aval en direction de la rive gauche. La structure chenal a pénétré depuis la partie intervention dans un domaine antérieurement identifié en tant que plat et eaux peu profondes. L'étendue des eaux peu profondes a considérablement diminué.

Sur les deux tronçons d'étude, l'érosion du fond du lit est par endroits importante. Sur le tronçon à dépôts de sédiments, un fort gradient d'érosion est observé. L'érosion du lit est particulièrement prononcée après le rétrécissement du courant par les deux premiers dépôts, s'étendant du profil en travers PT9 au PT12. L'alluvionnement des matériaux érodés a eu lieu plus en aval, principalement entre le PT5 et le PT7. Dans les radiers de la partie aval et dans le chenal de la partie intervention, le niveau du fond du lit est resté relativement stable. Après la correction du niveau de référence, le tronçon à dépôts de sédiments ne présente globalement pas d'abaissement du

Tronçon à dépôts de sédiments (TDS)			Valeur standardisée	**Valeurs statistiques** pour les indicateurs 1.3, 1.4 et HMID Sinon: Pour chaque tronçon le pourcentage de la **caractéristique** par rapport à • Indicateur 1.2 : La longueur totale de la ligne de rive • Indicateur 1.5 : La surface du lit mouillé • Indicateurs 1.1, 1.6 A1, 1.6 A2 et IRS: La surface du lit moyen												
Indicateur		**Année**		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Ind 1.1	Structure du fond du lit	2020	**0.50**	0.8%	2.6%	30.2%	12.3%	32.0%	0.1%	21.9%	0.0%	0.0%	-	-	-	-
		2021	**0.50**	1.1%	2.8%	36.5%	14.7%	29.8%	1.4%	13.8%	0.0%	0.0%	-	-	-	-
Ind 1.2	Structure des rives	2020	**1.00**	58.2%	31.1%	10.6%	0.0%	0.0%	50.5%	48.2%	1.3%	66.8%	33.2%	-	-	-
		2021	**1.00**	57.4%	28.4%	14.2%	0.0%	0.0%	55.6%	39.7%	4.7%	48.3%	51.7%	-	-	-
Ind 1.3	Profondeur d'eau	2020	**0.48**	0.31 m	0.66 m	0.48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2021	**0.39**	0.26 m	0.66 m	0.39	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ind 1.4	Vitesse d'écoulement	2020	**0.72**	0.33 m/s	0.42 m/s	0.79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2021	**0.69**	0.34 m/s	0.45 m/s	0.76	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HMID	Diversité hydromorphologique	2020	**8.91**	0.24 m	0.35 m	0.67	0.33 m/s	0.42 m/s	0.79	-	-	-	-	-	-	-
		2021	**8.00**	0.25 m	0.41 m	0.61	0.34 m/s	0.45 m/s	0.76	-	-	-	-	-	-	-
Ind 1.5	Offre en abris	2020	**0.25**	1.4%	0.3%	0.0%	0.2%	2.4%	3.7%	0.0%	3.2%	0.1%	0.1%	2.8%	0.7%	2.5%
		2021	**0.25**	0.8%	0.9%	0.0%	0.4%	0.0%	2.9%	0.0%	4.2%	0.1%	0.3%	1.4%	0.0%	2.1%
	Estimation de référence		**-**	1.0%	1.0%	1.5%	0.5%	2.3%	3.8%	2.3%	0.5%	0.5%	0.0%	0.0%	14.0%	30.0%
Ind 1.6	Substrat nature	2020	**-**	9.7%	0.7%	0.7%	6.0%	58.9%	6.2%	6.4%	11.5%	0.0%	-	-	-	-
		2021	**-**	9.8%	0.8%	0.1%	2.8%	62.2%	9.7%	10.3%	4.4%	0.0%	-	-	-	-
Ind 1.6	Capacité à la mobilisation	2020	**0.25**	16.2%	1.1%	3.0%	71.3%	8.3%	-	-	-	-	-	-	-	-
		2021	**0.25**	13.9%	0.3%	3.5%	50.8%	31.5%	-	-	-	-	-	-	-	-
IRS	Aptitude à la reproduction	2020	**0.27**	1.7%	4.6%	93.7%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2021	**0.36**	0.9%	1.7%	97.4%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tableau 2: Résultats du tronçon à dépôts de sédiments sous forme agrégée. Les caractéristiques représentées par les colonnes 1 à 13 varient selon les indicateurs et correspondent aux descriptions fournies au Tableau 1. Pour chaque attribut, la gamme de couleurs des pourcentages varie du bleu (maximum) au rouge (minimum) en passant par le violet (médiane).

Tronçon de contrôle (TC)			Valeur standardisée	**Valeurs statistiques** pour les indicateurs 1.3, 1.4 et HMID Sinon: Pour chaque tronçon le pourcentage de la **caractéristique** par rapport à • Indicateur 1.2 : La longueur totale de la ligne de rive • Indicateur 1.5 : La surface du lit mouillé • Indicateurs 1.1, 1.6 A1, 1.6 A2 et IRS: La surface du lit moyen												
Indicateur		**Année**		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Ind 1.1	Structure du fond du lit	2020	**0.50**	0.0%	0.0%	24.4%	47.0%	15.4%	0.0%	13.1%	0.0%	0.0%	-	-	-	-
		2021	**0.50**	0.1%	0.0%	20.5%	54.1%	14.7%	2.1%	8.4%	0.0%	0.0%	-	-	-	-
Ind 1.2	Structure des rives	2020	**1.00**	80.3%	0.7%	19.0%	0.0%	0.0%	26.3%	69.8%	3.9%	35.6%	64.4%	-	-	-
		2021	**1.00**	75.9%	4.7%	19.4%	0.0%	0.0%	57.6%	40.9%	1.6%	41.7%	58.3%	-	-	-
Ind 1.3	Profondeur d'eau	2020	**0.40**	0.40 m	0.99 m	0.40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2021	**0.35**	0.34 m	0.97 m	0.35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ind 1.4	Vitesse d'écoulement	2020	**1.00**	0.34 m/s	0.31 m/s	1.11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2021	**0.85**	0.31 m/s	0.34 m/s	0.93	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HMID	Diversité hydromorphologique	2020	**10.71**	0.33 m	0.60 m	0.55	0.34 m/s	0.31 m/s	1.11	-	-	-	-	-	-	-
		2021	**7.89**	0.31 m	0.68 m	0.45	0.31 m/s	0.34 m/s	0.93	-	-	-	-	-	-	-
Ind 1.5	Offre en abris	2020	**0.25**	2.8%	0.4%	0.0%	0.2%	2.1%	1.5%	0.0%	6.5%	1.1%	1.0%	4.8%	1.4%	0.0%
		2021	**0.25**	0.5%	0.3%	1.7%	1.3%	1.2%	3.7%	0.1%	4.4%	1.5%	0.1%	4.1%	0.7%	0.0%
	Estimation de référence		**-**	1.0%	1.0%	1.5%	0.5%	2.3%	3.8%	2.3%	0.5%	0.5%	0.0%	0.0%	14.0%	30.0%
Ind 1.6	Substrat nature	2020	**-**	19.6%	0.0%	1.9%	9.6%	54.8%	10.3%	0.0%	3.7%	0.0%	-	-	-	-
		2021	**-**	14.5%	0.0%	0.9%	7.5%	58.7%	10.7%	0.1%	7.6%	0.0%	-	-	-	-
Ind 1.6	Capacité à la mobilisation	2020	**0.25**	22.6%	1.9%	2.0%	55.3%	18.2%	-	-	-	-	-	-	-	-
		2021	**0.25**	22.0%	1.2%	7.2%	29.1%	40.5%	-	-	-	-	-	-	-	-
IRS	Aptitude à la reproduction	2020	**0.32**	3.6%	7.7%	88.7%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2021	**0.11**	1.2%	9.7%	89.1%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tableau 3: Résultats du tronçon de contrôle sous forme agrégée. Les caractéristiques représentées par les colonnes 1 à 13 varient selon les indicateurs et correspondent aux descriptions fournies au Tableau 1. Pour chaque attribut, la gamme de couleurs des pourcentages varie du bleu (maximum) au rouge (minimum) en passant par le violet (médiane).

lit (léger rehaussement de 0.5 cm). Dans le tronçon de contrôle, les profondeurs d'eau non corrigées suggèrent un abaissement moyen du fond du lit de 6.4 cm.

3.2 Diversité des habitats

Les résultats du relevé du JI1 et des indicateurs HMID et IRS sont résumés dans le *Tableau 2* et le *Tableau 3*. Les scores des indicateurs obtenus avant et après la crue sont présentés sous forme graphique dans la *Figure 4*.

Dans les deux tronçons d'étude, tous les types de structures d'une séquence chenal-plat-radier sont présents avant et après la crue. Le score de l'indicateur 1.1 «structure du fond du lit» des deux tronçons demeure stable à 0.5. Dans la partie aval du tronçon à dépôts de sédiments, l'avancement du chenal a introduit une structure initialement absente et provoque un saut du score de 0.5 à 0.75. La structure de la ligne de rive, essentiellement inaltérée, correspond au critères du score maximum de 1.0 pour l'indicateur 1.2 dans les deux tronçons avant et après la crue. Dans les parties intervention et aval, l'amélioration du score de 0.75 à 1.0 est due à des clarifications techniques reçues entre les deux campagnes de cartographie, relatives à la distinction entre rive plate et rive pentue.

La profondeur d'eau moyenne a considérablement augmenté dans les deux tronçons. Cette augmentation atteint 17 % sur le tronçon à dépôts de sédiments (de 0.35 m à 0.41 m) et 13 % sur le tronçon de

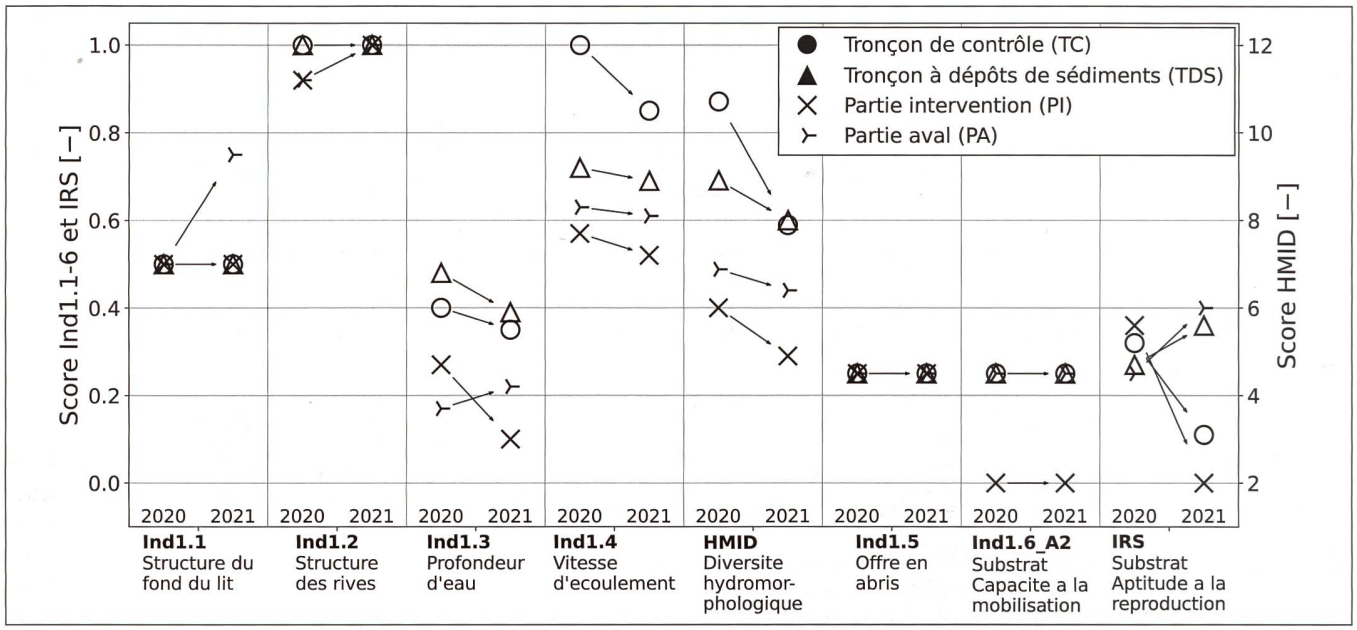

Figure 4: Scores des différents indicateurs avant et après la crue. Pour le tronçon à dépôts de sédiments, les indicateurs hydrométriques sont calculés sur la base du sous-ensemble SE_14, pour le tronçon de contrôle sur la base du SE_5. L'axe secondaire à droite indique les scores du HMID. L'axe principal à gauche indique les scores des autres indicateurs.

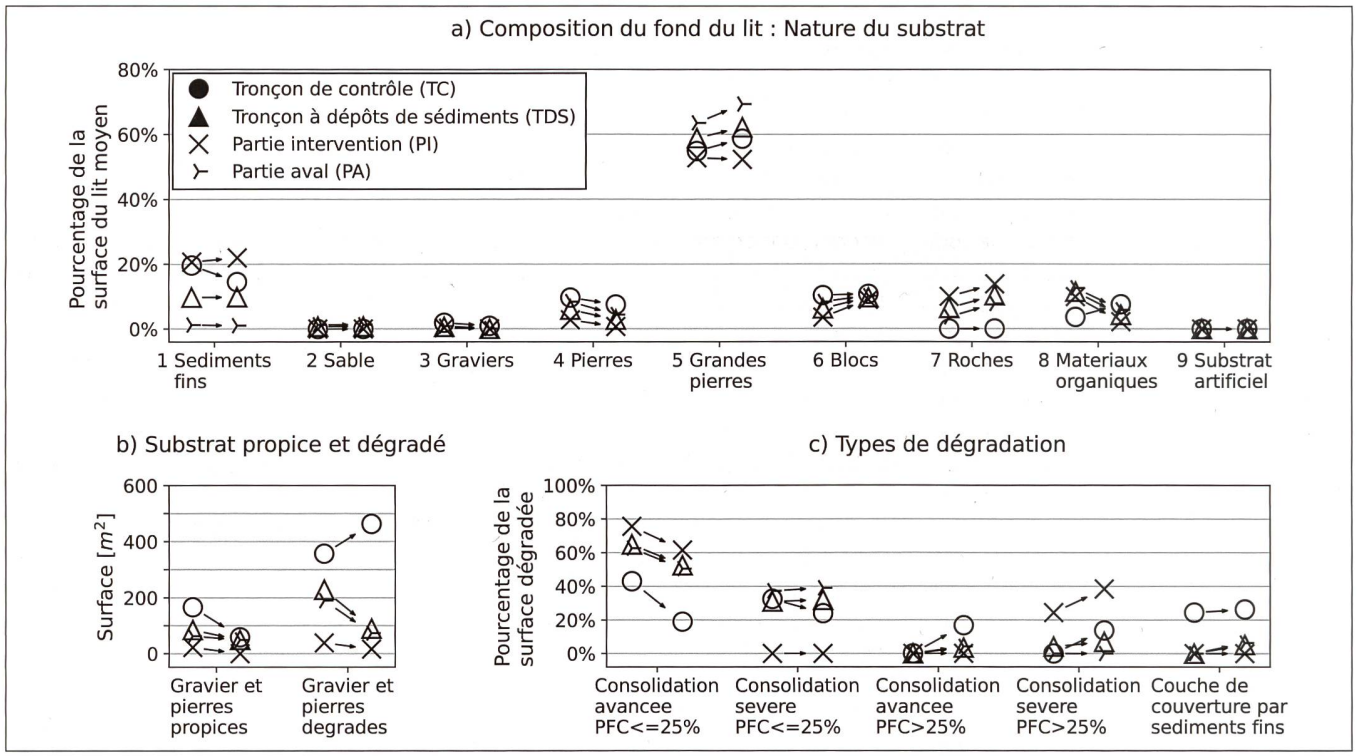

Figure 5: Evolution de la composition et de la dégradation du substrat dans les tronçons d'étude suite à la crue. a) Répartition granulométrique d'après les caractéristiques de l'indicateur 1.6. b) Surface absolue propice à la reproduction des truites et surface absolue dégradée. c) Analyse en détail de la surface dégradée. PFC désigne le pourcentage de surface couverte par des sédiments fins, une mesure locale du colmatage extérieur.

contrôle (de 0.60 m à 0.68 m). En même temps, la variabilité de la profondeur a diminué sur les deux tronçons. Les scores de l'indicateur 1.3 montrent par conséquent une diminution par rapport à l'état avant la crue (TDS: de 0.48 à 0.39, TC: de 0.40 à 0.35). Dans la partie aval, les alluvionnements ont localement augmenté la variabilité des profondeurs. Etroitement corrélée avec la profondeur d'eau, la variabilité de la vitesse d'écoulement et la diversité hydromorphologique ont diminuées dans tous les tronçons d'étude entiers et partiels. L'indicateur 1.4 «vitesse d'écoulement» et le HMID ont connu une diminution importante et systématique. La détérioration est plus prononcée sur le tronçon de contrôle, où le score de l'indicateur 1.4 a diminué de 1.0 à 0.85 et le score du HMID de 10.7 à 7.9.

Globalement, l'offre en abris a peu changé sur les deux tronçons. Dans le tronçon à dépôts de sédiments, une accumulation vaste de bois mort (arbres et branches coupés) a disparue. Le score de l'indicateur 1.5 de 0.25 demeure stable mais bas pour tous les tronçons d'étude

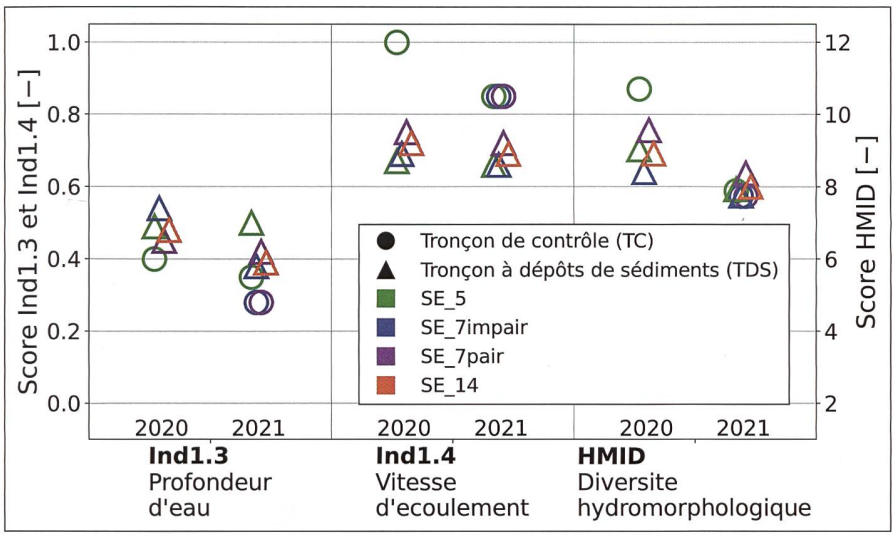

Figure 6: Scores des indicateurs hydrométriques avant et après la crue. Pour chaque indicateur et tronçon d'étude, différents scores sont obtenus en fonction du sous-ensemble (SE) des profils en travers utilisé dans le calcul. Les différents sous-ensembles sont définis dans la Figure 2. L'axe secondaire à droite indique les scores du HMID. L'axe principal à gauche indique les scores des autres indicateurs.

entiers et partiels. Dans la composition du substrat, des changements systématiques ont été observés. Une analyse graphique de la composition du substrat est présentée dans la *Figure 5a*. La prédominance croissante d'une granulométrie plus grossière, c'est-à-dire de grandes pierres et blocs, va de pair avec la perte de graviers et pierres. Sur le tronçon à dépôts de sédiments, le pourcentage de la surface du lit moyen dominé par du gravier et des pierres a été réduit de plus de moitié (de 6.7 % à 2.9 %). Sur le tronçon de contrôle, la diminution est d'environ un quart (de 11.5 % à 8.4 %). La surface dominée par des roches a augmenté d'environ 60 % sur le tronçon à dépôts de sédiments (de 6.4 % à 10.3 %).

D'après l'analyse de la capacité à la mobilisation, les catégories dominantes sont les matériaux du fond du lit et les dépôts de matières en suspension. L'augmentation considérable de la présence de matériaux charriés grossiers et de matériaux du fond du lit grossiers et la diminution des matériaux du fond du lit mêlés à des matériaux charriés est expliqué par des clarifications techniques obtenues entre les deux campagnes de cartographie. Le score de l'indicateur 1.6 demeure stable à 0.25 pour les deux tronçons d'étude. Le relevé de l'IRS met en évidence la diminution de surfaces couvertes par des graviers et des pierres, substrat potentiellement propice à la reproduction de la truite. La surface identifiée comme substrat propice non colmaté a été réduite de moitié sur le tronçon à dépôts de sédiments (de 1.7 % à 0.9 %) et de deux tiers sur le tronçon de contrôle (de 3.6 % à 1.2 %).

Parmi les différents indicateurs, le score maximum est atteint seulement par la structure des rives. Des scores élevés sont obtenus pour les indicateurs incluant les mesures du courant: vitesse d'écoulement et HMID. Pour les indicateurs morphologiques du lit, structure du fond du lit et profondeur d'eau, des scores médiocres sont obtenus. Les scores les plus bas sont obtenus pour l'offre en abris et les indicateurs du substrat. On peut distinguer trois types de tendances interannuelles. Des scores stables sont maintenus par les indicateurs structure du fond du lit, structure des rives, offre en abris et capacité à la mobilisation du substrat. Pour l'IRS, on observe une tendance localement variée. Parmi les indicateurs hydrométriques (profondeur d'eau, vitesse d'écoulement, HMID), une tendance négative prononcée se manifeste. Comme démontré dans la *Figure 6*, cette tendance persiste à travers toutes les stratégies d'échantillonnage appliquées.

3.3 Colmatage et frayères

L'évolution de la surface totale de substrat propice à la reproduction et de substrat dégradé est présentée dans la *Figure 5b*. La surface couverte par des graviers et des pierres, substrat potentiellement propice, a diminuée sur tous les tronçons entiers et partiels. Le taux de dégradation de cette surface a augmenté sur le tronçon de contrôle et diminué sur le tronçon à dépôts de sédiments. Sur les deux tronçons, un déclin important de la surface absolue propice est observé (TDS: de 85 m² à 49 m², TC: de 166 m² à 59 m²). La *Figure 5c* montre une analyse en détail de la surface dégradée quant à son degré de consolidation et de colmatage extérieur. Rapporté à la surface dégradée totale par tronçon, le taux de surface atteinte d'une forme de dégradation sévère a augmenté. Sur les deux tronçons, un accroissement modéré est observé pour le taux de consolidation sévère (TDS: de 35 % à 39 %, TC: de 33 % à 38 %). Le taux de colmatage extérieur d'un niveau nuisible à la reproduction piscicole a connu une augmentation plus importante (TDS: de 4 % à 16 %, TC: de 24 % à 57 %).

La correspondance entre les surfaces identifiées comme propices à la reproduction en été 2020 et les positions de frayères cartographiées en janvier 2020 est bonne *(cf. Schroff et al., 2021)*. Lors du relevé estival en 2021, deux surfaces de substrat ayant abrité des frayères l'hiver précédent ont présenté une consolidation avancée. L'évolution de la surface de frayères entre 1996 et 2022 dans les tronçons *I* à *IV* est représentée dans les *Figures 7a–c*. La *Figure 7a* est complétée par l'hydrogramme du débit en aval du barrage de Rossens. L'hydrogramme montre des valeurs indicatives du débit moyen journalier avant 2010 et des valeurs de débit instantanées dès 2010. La durée des déversements exceptionnels avec $V_{12h} > 1.75e6\,m^3$ est indiquée dans la *Figure 7b*. Le volume déversé à Rossens sur 5 jours, obtenu avec la technique de la fenêtre mobile, est représenté dans la *Figure 7c*.

Après l'augmentation du débit de dotation en 2005 et deux crues importantes en 2005 et 2007, un fort accroissement de la surface totale de frayères est observé au début de l'année 2008. Cette augmentation de surfaces de frai a évolué de pair avec une augmentation de captures de truites par les pêcheurs et une augmentation du peuplement de truites détectées lors des pêches électriques. De 2008 à 2013 il n'y a pas eu de déversement exceptionnel. La surface totale de frayères demeure à un niveau stable jusqu'en 2014. De 2014 à 2020, plusieurs lâchers ont été effectués, y compris deux crues artificielles. Dans la même période, les surfaces de frai et le peuplement de truites ont connu une forte baisse. La crue artificielle de 2016 marque une année d'exception. Dans les 900 m en aval des dépôts de sédiments mis en place pour la crue, des surfaces de frai importantes ont été créées et utilisées par les truites. A la suite de la crue morphogène de juillet 2021, d'importantes zones de frai ont été recréées et utilisées pour le frai des truites.

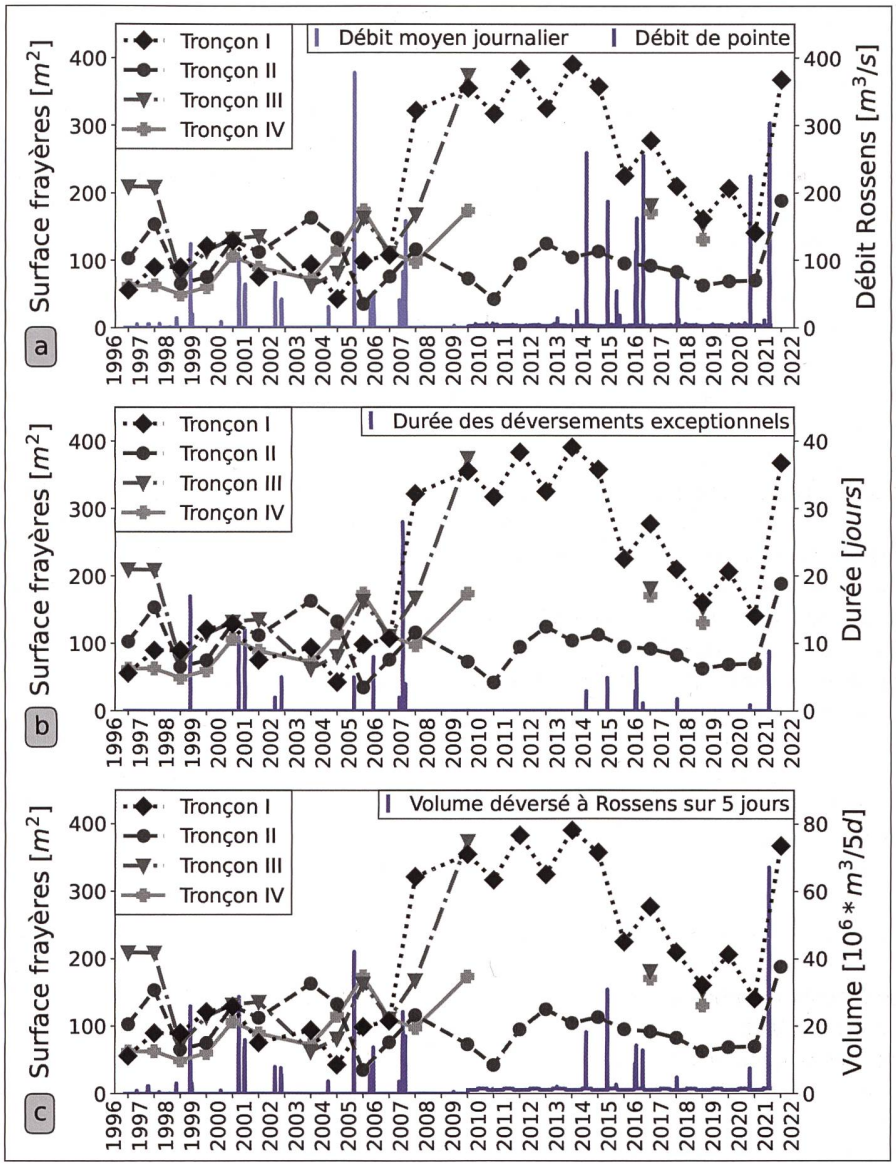

Figure 7: Evolution de la surface de frayères dans la Petite Sarine et corrélations avec différentes caractéristiques des déversements exceptionnels en aval du barrage de Rossens. Corrélation avec a) débit moyen journalier (avant 2010) et débit de pointe (dès 2010). b) durée des déversements. c) volume déversé sur 5 jours. ©données frayères: La Frayère, ©données débit: Groupe E SA.

4. Discussion

4.1 Effets de la crue artificielle 2020

Lors des premières observations après la crue de 2020, la Petite Sarine présentait un lit mouillé débarrassé de la majorité des algues filamenteuses et nettoyé en grande partie des sédiments fins en surface. La morphologie des tronçons d'étude a été impactée de manière modérée. Faute d'une disponibilité sédimentaire suffisante et de la force nécessaire pour remobiliser les sédiments dans l'ancien lit moyen, la crue a accentué l'incision existante du lit et la chenalisation du tracé. Sous conditions hydrologiques équivalentes, à un débit de dotation constant, la profondeur d'eau moyenne a considérablement augmenté par rapport à l'état avant la crue dans les deux tronçons d'étude. L'avancement du chenal au-delà des quatre dépôts de sédiments, au détriment des eaux peu profondes, et le déplacement des bancs d'alluvions vers les rives sont deux autres exemples de l'homogénéisation morphologique provoquée par le manque de charriage. La tendance négative et prononcée des trois indicateurs hydrométriques pour tous les sous-ensembles de profils en travers suggère une détérioration globale et systématique de la diversité des habitats hydromorphologiques dans la Petite Sarine. Sur le tronçon de contrôle, dépourvu d'une réinjection de sédiments alluviaux dans le passé, la détérioration est plus prononcée. Dans le tronçon à dépôts de sédiments, l'équilibre apparent entre érosion et alluvionnement est à considérer à la lumière du gradient longitudinal d'érosion très prononcé. Alors qu'une tendance marquée à l'érosion est observée dans la partie intervention, les alluvionnements dans la partie aval témoignent encore des apports de sédiments de 2016. Le gradient d'érosion sur ce tronçon donne une idée de l'érosion progressive ayant lieu à l'échelle de la Petite Sarine.

L'érosion du fond du lit va de pair avec des changements écologiquement désavantageux dans la composition du substrat. La tendance vers une granulométrie plus grossière et la mise à nu grandissante du socle en molasse sont témoins d'un manque d'apport en charriage important. L'augmentation de surfaces rocheuses de 60 % dans le tronçon à dépôts de sédiments est cependant en partie causée par la disparition des arbres coupés et donc surestimée. En tenant compte de la composition granulométrique du lit et en comparant les surfaces absolues lors de l'interprétation de l'IRS, une image plus complète de l'état de la dégradation du substrat est obtenue. L'amélioration apparente de l'aptitude à la reproduction dans le tronçon de contrôle et dans la partie aval est à considérer dans le contexte de la diminution des surfaces absolues de graviers et pierres ainsi que de la surface absolue propice. Dans tous les tronçons, la superposition des effets de l'érosion et du colmatage a provoqué une diminution considérable de l'offre en substrat propice à la reproduction des truites. Le rythme de colmatage peut être considéré comme élevé puisque le substrat de deux surfaces ayant abrité des frayères en janvier 2021 présentait une consolidation avancée six mois plus tard. L'accentuation du colmatage n'étant pas une conséquence attribuable à la crue elle-même, elle souligne bien au contraire l'importance d'effectuer des mesures holistiques, dûment dimensionnées et fréquentes.

4.2 Frayères et charriage

Le déclin important des surfaces de frai depuis 2014 est étroitement corrélé avec la diminution du peuplement de truites détectées lors des pêches électriques. A l'exception de la crue artificielle de 2016 avec ses apports de sédiments, les lâchers entre 2014 et 2020 n'ont pas permis de freiner ce développement. En revanche, les crues naturelles plus puissantes de 2005, 2007 et 2021 ont conduit à une augmentation de la surface totale de frayères. Ces observations suggèrent que les crues moyennes sans apports de sédiments entrainent principalement les sédiments de

petite taille encore présents au sein du lit mineur, enlevant du substrat écologiquement important de la Petite Sarine (gravier et pierres). Les crues majeures semblent remobiliser des sédiments figés en dehors du lit mineur actuel, créant de nouveaux bancs de gravier et sites de frai. Il est important de noter que les réserves de sédiments dans la zone alluviale sont limitées et leur exploitation n'est pas durable. Pour recharger le système en sédiments, des apports provenant de l'amont sont nécessaires au pied du barrage. La surface totale de frayères est un indicateur tant à long terme (population adulte des truites: conditions environnementales des dernières années) qu'à court terme (qualité du substrat: conditions actuelles). Sa tendance négative et continue des dernières années signale une urgence croissante d'agir et demande des interventions stratégiques.

4.3 Stratégies d'assainissement durables

Afin de mettre en place un assainissement durable du régime de charriage, la gestion du débit et des sédiments doit s'orienter sur le fonctionnement naturel du tronçon à assainir. Dans un régime d'écoulement naturel, les crues morphogènes constituent un phénomène de perturbation régulier (retour de 1 à 3 ans), essentiel pour la préservation et la régénération d'une mosaïque des habitats diversifiée et d'une zone alluviale naturelle et fonctionnelle *(cf. Poff et al., 1997)*. Dans les rivières alpines à fort charriage, une crue morphogène provoque la restructuration du lit moyen et de la ligne des rives, créant des habitats caractéristiques tels que les bras morts et les bancs d'alluvions. La restructuration du lit est efficace si la crue présente (a) un débit de pointe puissant, (b) un volume et une durée suffisants, représentatifs du bassin versant et (c) une disponibilité sédimentaire équivalant au minimum à la capacité de transport de la crue. Les crues morphogènes régulières sont complétées par des crues plus importantes et moins fréquentes (retour >5 ans) qui modifient le tracé et la morphologie de la rivière à l'échelle du lit majeur, inondant la zone alluviale, réactivant une partie de ses dépôts alluviaux et contribuant ainsi au développement et la régénération de la zone alluviale.

Entre les crues, la variabilité naturelle du débit au fil des saisons et des intempéries est un facteur déterminant pour la qualité des habitats. Dans une comparaison de différents concepts de débits de dotation, *Perona et al. (2013, 2021)* ont montré que l'approche du débit minimum constant ne représente pas une solution globalement optimale sur le plan environnemental et économique. Un débit de dotation imitant la variabilité naturelle tout en respectant le débit minimum nécessaire (voir le concept «Dynamic Environmental Flow», DEF; *Niayifar & Perona, 2017*) peut améliorer de manière substantielle le fonctionnement des écosystèmes. Un débit dynamique est à compléter avec des apports de sédiments satisfaisant aux critères quantitatifs et qualitatifs.

Bien dimensionnées et effectuées régulièrement, tout en tenant compte de la disponibilité sédimentaire, les crues artificielles sont une mesure clé pour l'assainissement d'un tronçon court-circuité à débit résiduel *(Loire et al., 2021)*. Pour rétablir une mosaïque des habitats diversifiée dans la Petite Sarine, il est estimé nécessaire de représenter la variabilité des crues naturelles dans les fréquences et magnitudes des crues artificielles. Les lâchers fréquents d'une magnitude modérée (Q1 – Q3) permettent de restructurer et décolmater le fond du lit mineur. Des lâchers plus puissants (Q5, Q10, etc.) sont indispensables pour réactiver une morphodynamique proche de l'état naturel à l'échelle du lit majeur. Sans apports de sédiments externes pour compenser le déficit existant, les crues artificielles ont des effets géomorphologiques et écologiques défavorables à moyen et long terme. Afin de contrer l'incision du lit et son pavage, il est indispensable de prévoir des apports de sédiments externes qui surcompensent la capacité de transport du débit pendant et entre les crues artificielles. Une réinjection de sédiments excavés dans l'ancien lit moyen de la rivière ne représente pas un apport net au système et ne constitue donc pas un apport externe.

La comparaison des réactions morphologiques des deux tronçons d'étude souligne la nécessité de prévoir des apports de sédiments suffisants pendant et entre les lâchers. Outre la quantité et le timing des apports, les conditions et restrictions locales sont aussi déterminantes pour divers autres aspects du dimensionnement, tels que les lieux et types d'injection et la granulométrie des sédiments *(cf. Mörtl & De Cesare, 2021)*. Une combinaison de réinjection en continu à différents endroits clés le long de la Petite Sarine et de recharge sédimentaire au pied du barrage peut être efficace. La granulométrie des apports doit non seulement être choisie en considérant la capacité de mobilisation du cours d'eau mais aussi en tenant compte du déficit identifié dans la gamme granulométrique présente, soit des graviers et des pierres. En complément des apports, la stimulation de l'érosion des berges à certains endroit clés de la zone alluviale vieillissante permettrait de redynamiser le lit majeur et réactiver des alluvions figées.

5. Conclusion

La restauration de la zone alluviale de la Petite Sarine est un enjeu à long terme et de plus en plus urgent. Cet enjeu demande des interventions stratégiques, guidées par les processus hydrologiques et géomorphologiques naturels. La crue artificielle de 2020 était importante dans la préparation de cette démarche. Elle a notamment permis d'étudier le potentiel et les limites relatifs à son impact morphologique, facilitant ainsi le dimensionnement de futures mesures. Les effets de la crue sur la morphologie des tronçons d'étude étaient modérés et se concentraient à proximité immédiate des dépôts de sédiments de 2016. La crue de 2020 sans apports de sédiments a accentué l'incision existante du fond du lit et conduit à l'appauvrissement systématique de la diversité hydromorphologique. Le déficit de matériaux charriés, la disponibilité restreinte de surfaces de graviers et pierres propices à la reproduction piscicole et le déclin continu de la surface de frayères sont préoccupants d'un point de vue écologique. Les résultats soulignent qu'un changement de paradigme est nécessaire. Les crues artificielles étant des mesures clés pour la restauration de la zone alluviale, elles doivent être accompagnées d'une recharge sédimentaire suffisante. Ceci afin de remettre en marche une évolution dynamique du lit majeur, rétablir une mosaïque des habitats plus diversifiée et permettre la régénération et le bon fonctionnement de la zone alluviale. Idéalement, les crues artificielles respectent le temps de retour et la variabilité de la magnitude des crues naturelles. Entre les crues artificielles, une variabilité hydraulique naturelle au fil des saisons et des intempéries peut être réalisée à l'aide d'un DEF pour améliorer le fonctionnement des écosystèmes aquatiques et alluviaux. Si la continuité sédimentaire à travers le réservoir ne peut pas être restaurée, des apports de sédiments externes au pied du barrage ainsi qu'à des endroits clés le long de la Petite Sarine sont nécessaires pour recharger le système épuisé. La prise en

considération des exigences écologiques concernant la granulométrie des sédiments est importante. Le volume des apports externes doit surcompenser la capacité de transport du débit déversé pour contrer de manière efficace l'incision du lit et permettre un développement favorable de l'état éco-morphologique. A l'aide d'une série de mesures efficaces, la Petite Sarine et sa zone alluviale peuvent être redynamisées de manière durable.

Remerciements

Cette étude a été cofinancée par l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) dans le cadre du programme de recherche «Aménagement et écologie des cours d'eau». Nous tenons à remercier l'association La Frayère, le groupe de recherche Ökohydrologie de la Haute école des sciences appliquées de Zurich (ZHAW) et la société Groupe E SA pour la mise à disposition de données. Des remerciements s'adressent également au Service des forêts et de la nature (SFN) de l'Etat de Fribourg, à Groupe E SA ainsi qu'à Francis Terreaux pour leur collaboration, nous permettant l'accès à la zone d'étude et aux infrastructures. Nous remercions toutes les collaboratrices et tous les collaborateurs de la PL-LCH ayant contribué au succès de l'étude et à la qualité de l'article.

Références:

Döring, M., Tonolla, D., Robinson, C. T., Schleiss, A., Stähly, S., Gufler, C., Geilhausen, M., Di Cugno, N. (2018). Künstliches Hochwasser an der Saane – Eine Massnahme zum nachhaltigen Auenmanagement. Wasser Energie Luft, 110(2), 119–127.

Gostner, W., Alp, M., Schleiss, A. J., Robinson, C. T. (2013). The hydro-morphological index of diversity: A tool for describing habitat heterogeneity in river engineering projects. Hydrobiologia, 712(1), 43–60. https://doi.org/10.1007/s10750-012-1288-5

Hunzinger, L., Schälchli, U., Nitsche, M., Kirchhofer, A., Pfaundler, M., Rüesch, T., Roulier, C. (2018, in Anhörung). Geschiebehaushalt – Massnahmen. Ein Modul der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer (Umwelt-Vollzug Nr. X, p. X). Bundesamt für Umwelt.

Mörtl, C., De Cesare, G. (2021). Sediment Augmentation for River Rehabilitation and Management – A Review. Land, 10(12), 1309. https://doi.org/10.3390/land10121309

Niayifar, A., Perona, P. (2017). Dynamic water allocation policies improve the global efficiency of storage systems. Advances in Water Resources, 104, 55–64. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.03.004

OFEV (éd.). (2019). Jeu d'indicateurs 1 – Diversité des habitats. Dans: Contrôle des effets des revitalisations de cours d'eau – Apprendre ensemble pour l'avenir. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne. Fiche technique 1, V1.04.

Perona, P., Dürrenmatt, D. J., Characklis, G. W. (2013). Obtaining natural-like flow releases in diverted river reaches from simple riparian benefit economic models. Journal of Environmental Management, 118, 161–169. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.01.010

Perona, P., Niayifar, A., Schwemmle, R., Razurel, P., Flury, R., Winz, E., Barry, D. A. (2021). Frontiers of (Pareto) Optimal and Sustainable Water Management for Hydropower and Ecology. Frontiers in Environmental Science, 9, 703433. https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.703433

Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegaard, K. L., Richter, B. D., Sparks, R. E., Stromberg, J. C. (1997). The Natural Flow Regime. BioScience, 47(11), 769–784. https://doi.org/10.2307/1313099

Schroff, R., Mörtl, C., De Cesare, G. (2021). Wirkungskontrolle einer Sedimentzugabe: Habitatvielfalt und Kolmation | Eco-morphological evaluation of a sediment augmentation measure. WASSERWIRTSCHAFT, 111(9–10), 68–76. https://doi.org/10.1007/s35147-021-0896-2

Stähly, S., Franca, M. J., Robinson, C. T., Schleiss, A. J. (2019). Sediment replenishment combined with an artificial flood improves river habitats downstream of a dam. Scientific Reports, 9:5176. https://doi.org/10.1038/s41598-019-41575-6

Stähly, S., Tonolla, D., Franca, M. J., Robinson, C. T., Döring, M., Schleiss, A. J. (2021). Künstliche Hochwasser in Restwasserstrecken unter Berücksichtigung von Geschiebevorkommen, hydromorphologischer und ökologischer Indikatoren. Korrespondenz Wasserwirtschaft, 2021(8), 492–502. https://doi.org/10.3243/kwe2021.08.002

Weber, C., Sprecher, L., Åberg, U., Thomas, G., Baumgartner, S., Haertel-Borer, S. (2019). Contrôle des effets STANDARD – Déroulement et organisation. Dans: Contrôle des effets des revitalisations de cours d'eau – Apprendre ensemble pour l'avenir. Office fédéral de l'environnement (OFEV).

Auteurs:

Robin Schroff, robin.schroff@epfl.ch
Christian Mörtl, christian.moertl@epfl.ch
Giovanni De Cesare, giovanni.decesare@epfl.ch
EPFL, Plateforme de Constructions Hydrauliques PL-LCH, CH-1015 Lausanne
Pascal Vonlanthen, p.vonlanthen@aquabios.ch
Aquabios Sàrl, Les Fermes 57, CH-1792 Cordast

Cours de formation continue CIPC 5.7

Cours de formation continue CIPC 5ème série: Développement prospectif des projets d'aménagement des eaux

26/27 octobre 2022, Hôtel-Restaurant Port-Conty à St-Aubin-Sauges

www.swv.ch/fr/detail/cipc-57

KOHS-Weiterbildungskurs Wasserbau 5.8

KOHS-Weiterbildungskurse 5. Serie: Vorausschauende Entwicklung von Wasserbauprojekten

15./16. November 2022, Focus Hotel, Sursee

www.swv.ch/detail/kohs-58