

9 Continuité des sédiments et mesures de recharge sédimentaire

Une altération du charriage peut entraîner différents effets néfastes sur l'hydromorpho-écodynamique du milieu fluvial. Lorsque bien conçues, les mesures de recharge sédimentaire représentent une approche d'atténuation prometteuse à différentes échelles. Le présent chapitre s'intéresse à des expériences sur un canal expérimental menées dans le but d'étudier l'influence de la recharge sédimentaire sur les structures morphologiques des lits et la persistance des formes de lit qui en résultent. Il inclut également des informations sur les critères de conception et les méthodes d'évaluation des résultats.

Christian Mörtl, Robin Schroff et Giovanni De Cesare

9.1 Interruption de la continuité des sédiments

De leur source à leur delta, les cours d'eau transportent des sédiments. Lorsqu'il existe des sources naturelles de sédiments, que le débit n'est pas perturbé et que celui-ci varie en fonction des événements de crue et des saisons, un processus continu d'érosion et de sédimentation donne sa forme au cours d'eau et définit la morphologie du lit. Cette dynamique naturelle est essentielle à la diversité des habitats fluviaux (OFEV 2017a).

Dans les cours d'eau régulés, le régime naturel des sédiments est souvent perturbé par (i) une altération du régime des débits, (ii) une capacité de transport accrue résultant de la canalisation ou (iii) une réduction des volumes de transport disponibles. L'altération du régime des débits provient principalement de la régulation de l'écoulement visant la production d'énergie (débit résiduel et éclusées) ou la protection contre les crues. Cela réduit les débits de pointe pourtant nécessaires à des événements majeurs de mobilisation du charriage. En tant que modification historique d'un cours d'eau, la canalisation fait grimper la capacité de transport du cours d'eau et entraîne une incision du lit et un aplatissement progressif de la pente du canal. Il est possible de réduire les volumes de charriage disponibles en protégeant les rives ou en extrayant les sédiments alluviaux. La continuité longitudinale du transport solide peut être interrompue avec des dépotoirs à alluvions ou des structures hydrauliques telles que des centrales au fil de l'eau et des barrages à larges réservoirs, ce qui peut se traduire par l'absence totale de matériaux de charriage dans le segment aval du cours d'eau.

Sachant que l'atténuation des impacts néfastes de la production hydroélectrique sur le régime de charriage joue un rôle clé dans la révision de 2009 de la loi fédérale sur la protection des eaux (art. 43a LEaux, 1991), cette première section de chapitre est dédiée à l'impact des réservoirs sur la continuité des sédiments.

Impact des réservoirs

Une interruption de la continuité du transport des sédiments liée aux réservoirs peut avoir des impacts directs ou indirects à l'amont, à l'aval et sur le site du réservoir (fig. 52). À l'entrée amont de grands réservoirs, les matériaux de charriage s'accumulent en raison des vitesses d'écoulement réduites. La sédimentation peut exhausser le lit du cours d'eau et, dans certains cas, augmenter le risque de crue. À l'intérieur de grands réservoirs, les sédiments fins en suspension affluent vers le barrage, s'y déposent et contribuent ainsi à remplir progressivement le réservoir. La sédimentation des réservoirs constitue un danger pour la production hydroélectrique (Schleiss *et al.* 2010), notamment en réduisant la capacité de stockage ou en bloquant les exutoires. À l'aval de grands réservoirs, le déficit en matériaux de charriage, associé à un régime d'écoulement non naturel, peut entraîner une dégradation de l'hydromorpho-écodynamique de l'eau. Lorsque le débit est constamment faible, les fractions granulaires les plus petites du lit du cours d'eau s'érodent et laissent derrière elles une couche de sédiments grossiers et immobiles (couche de pavage ; Kondolf 1997). Au fil du temps, les sédiments fins en suspension se logent dans les espaces interstitiels et entraînent du colmatage (voir chap. 7 ; Dubuis *et al.* 2023 ; chap. 8 ; Takatsu *et al.* 2023). Le colmatage et le pavage engendrent une réduction des habitats

Figure 52

Problématiques liées aux sédiments dans les cours d'eau régulés concernant la discontinuité et les changements morphologiques. Discontinuité des sédiments : (1) accumulation de sédiments, (2) capture de sédiments grossiers, (3) capture de sédiments fins, (4) capture de matière organique, (6) déficit de charriage et (9) surplus de sédiments fins en suspension. Changements morphologiques : (1) exhaussement du lit du cours d'eau, (5) sédimentation dans le réservoir, (6) formation d'une couche de pavage statique, (7) incision du lit du cours d'eau, (8) perte de dynamique morphologique et (9) colmatage des espaces interstitiels (pores).

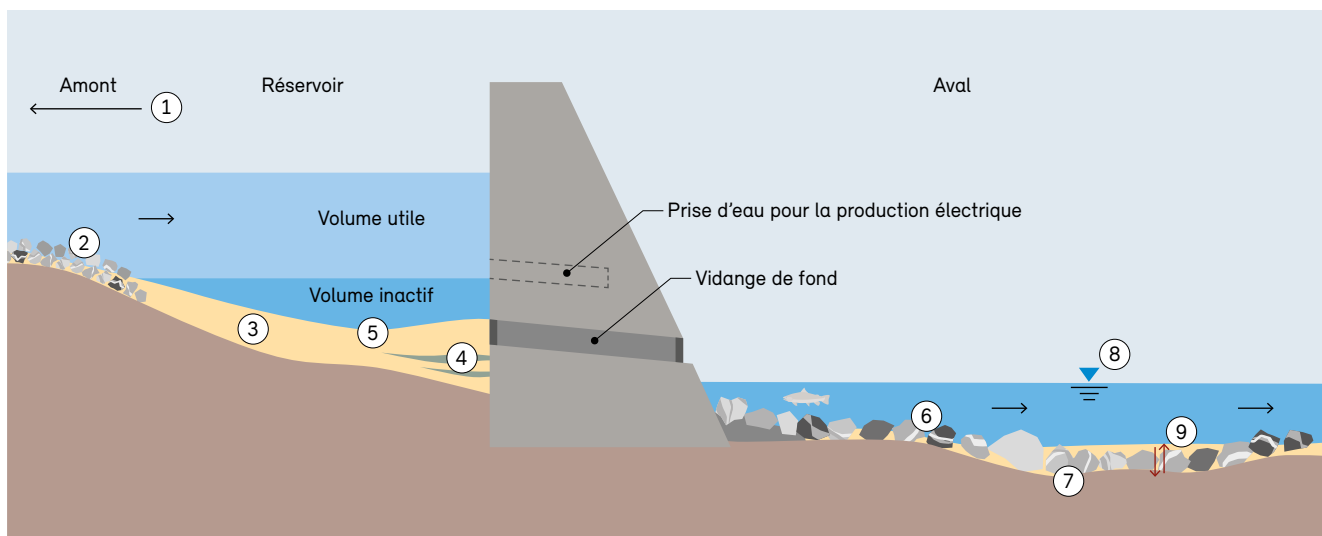


Figure adaptée de Mörtil *et al.* (2020)

pour les poissons frayant dans le gravier, une dégradation des habitats des macroinvertébrés et une perturbation de l'écoulement hyporhéique (Schälchli 1993). Lorsque les débits sont élevés, la couche de pavage peut se briser et libérer des sédiments fins stockés dans les couches inférieures. S'il y a déficit de matériaux de charriage, le lit du cours d'eau est exposé à des risques d'érosion permanente (incision du lit). À long terme, la réduction de la dynamique hydromorphologique cause un appauvrissement des zones d'habitat aquatiques et riveraines.

9.2 Mesures de recharge sédimentaire

9.2.1 Description et application

On appelle recharge sédimentaire l'apport artificiel de sédiments à un cours d'eau. Une mesure de recharge sédimentaire comprend le placement direct de sédiments sous la forme de bancs artificiels ou d'autres structures morphologiques dans un cours d'eau. Il est également possible de procéder à un apport à l'amont de sédiments en créant des dépôts érodables dans le lit ou le long des

berges qui soient conçus pour être mobilisés durant les événements de crue. Par ailleurs, si les sédiments peuvent être placés en une seule fois, ils peuvent également être ajoutés en continu lors d'une crue, par exemple à l'aide d'un tapis roulant ou d'un couloir de déversement. La recharge sédimentaire peut aussi être effectuée indirectement, en causant une érosion des berges, par exemple avec des structures de guidage ou le retrait de la protection des berges.

9.2.2 Cadre légal

Dans la législation suisse, la restauration des cours d'eau comprend la revitalisation, l'atténuation des effets de la production hydroélectrique et la restauration du débit résiduel. La revitalisation des cours d'eau se donne pour objectif de rétablir les fonctions fluviales naturelles en compensant les interventions humaines directes sur la morphologie des lits via des travaux d'aménagement. L'atténuation des effets de la production hydroélectrique implique de rétablir la connectivité longitudinale servant la migration piscicole, de diminuer les effets des éclusées et de revitaliser les régimes sédimentaires perturbés.

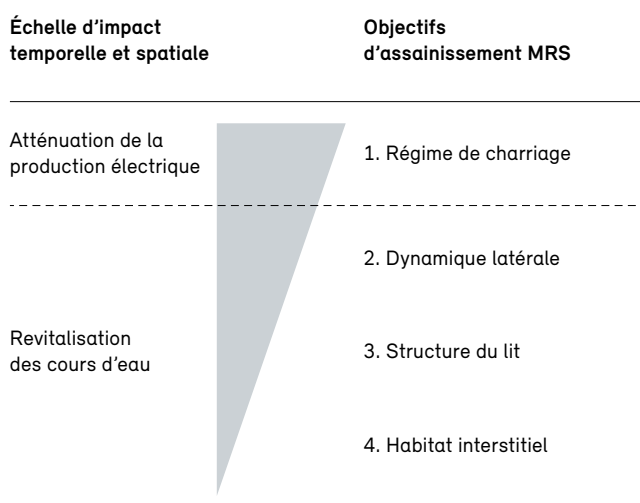
S'il n'est ni faisable ni adéquat de restaurer la continuité des sédiments dans le cadre d'une structure existante, des mesures de recharge sédimentaire peuvent être implémentées pour assainir le régime de charriage à l'aval (Schälchli et Kirchhofer 2012). La recharge sédimentaire peut aussi être utilisée dans le cadre de projets de revitalisation de cours d'eau. Elle peut s'intégrer à une mesure de revitalisation (p. ex. la création d'un habitat de frai ou l'enrichissement d'une diversité structurelle), promouvoir le fonctionnement d'une mesure de revitalisation (p. ex. l'élargissement dynamique des cours d'eau) ou encore atténuer les effets secondaires d'une mesure de revitalisation (déficit de charriage à l'aval en raison des travaux d'élargissement du cours d'eau).

9.2.3 Recommandations de conception en fonction des cas

Les objectifs principaux de la recharge sédimentaire sont tous liés à l'amélioration de l'hydromorpho-écodynamique, mais à différentes échelles spatiales et temporelles (Mörtl et De Cesare 2021 ; fig. 53). Par exemple, l'objectif de l'assainissement du régime de charriage est de rétablir le charriage naturel pour créer de meilleures structures morphologiques et dynamiques à tout emplacement du cours d'eau où les conditions sont favorables. Ce processus est conçu pour améliorer l'hydromorpho-écodynamique à long terme sur un tronçon.

Figure 53

Objectifs d'assainissement des mesures de recharge sédimentaire (MRS) selon différentes échelles temporelles et spatiales.



Source : EPFL

S'il est associé à d'autres mesures de revitalisation, telles que des régimes de crue écologiques et un espace suffisant pour le corridor du cours d'eau, il crée les conditions requises pour une évolution naturelle vers un état de référence durable. Une mesure de recharge qui se concentre sur le rétablissement d'un habitat de frai peut engendrer des effets locaux positifs à court terme. Cette mesure peut s'appliquer aux tronçons de cours d'eau limités par des restrictions hydromorphologiques, par exemple des tronçons à débit résiduel, mais les effets bénéfiques pourraient être moins durables dans ce cas.

Assainissement du régime de charriage

La recharge sédimentaire pour l'assainissement du régime de charriage est le plus souvent implémentée à l'amont d'un tronçon de cours d'eau long et continu, avec un potentiel écologique significatif et des processus hydromorphologiques suffisamment forts pour garantir un charriage en continu. La répartition de la granulométrie et le volume prévus doivent correspondre aux matériaux de charriage et au déficit de charriage du cours d'eau (volume de transport requis) (Schälchli et Kirchhofer 2012). Les matériaux peuvent provenir de dépotoirs à alluvions, de réservoirs ou de carrières de gravier. Ils ne devraient toutefois pas contenir une proportion élevée (supérieure à 12 à 14 %) de sédiments plus petits que du gravier fin ou de la matière organique, ce afin de prévenir une forte turbidité et le colmatage du lit (Kondolf 2000). Une méthode de recharge qui s'est montrée rentable est celle des dépôts érodables associés à la mobilisation des crues (OFEV 2017a). La morphologie du lit est un critère d'emplacement important pour une mobilisation efficace, car elle influe sur les paramètres hydrauliques comme la capacité de transport, le régime de débit ou la courbe de reflux. D'autres critères tels que la protection contre les crues, l'infrastructure et l'accessibilité peuvent mener à des restrictions supplémentaires (OFEV 2017a). Le calendrier retenu ne devrait pas coïncider avec la période de frai, mais, idéalement, avec la période précédant la pointe de crue saisonnière. Aux emplacements où le transport de sédiments a été altéré plusieurs décennies durant – et en fonction du rapport entre le volume d'apport et le déficit de charriage annuel –, il peut être nécessaire de renouveler la mesure chaque année. En fonction des restrictions spatiales relatives à l'apport sédimentaire, un renouvellement de la mesure tous les deux ou trois ans peut aussi être une solution rentable du point de vue des coûts.

Promotion de la dynamique latérale

Si la sédimentation est suffisante dans le corridor actif, les taux d'apports sédimentaires peuvent se transformer en moteur de la mobilité latérale (Rachelly *et al.* 2018). Par conséquent, la recharge sédimentaire peut être utilisée pour promouvoir la dynamique latérale, par exemple dans le cadre d'efforts d'élargissement dynamique de la rivière. Lorsque suffisamment d'espace est laissé au cours d'eau (p. ex. retrait de la protection des berges), l'apport artificiel de sédiments peut augmenter le taux d'érosion des berges et donc améliorer la connectivité latérale. Les sédiments fournis artificiellement peuvent être composés d'un mélange de sédiments naturels. Des événements de crue avec un débit de pointe élevé sont nécessaires pour déclencher certains processus hydromorphologiques sous-jacents à une dynamique latérale significative.

Amélioration de la structure du lit

Dans les cours d'eau naturels à graviers du Plateau suisse, la structure longitudinale du lit du cours d'eau est caractérisée par une séquence de fosses, radiers et plats. Lorsque le transport des sédiments et la dynamique du lit sont considérablement altérés, par exemple dans les tronçons à débit résiduel, la recharge sédimentaire par dépôts érodables peut favoriser la diversité structurelle des tronçons à l'échelle locale (Schroff *et al.* 2021). Il est aussi possible déposer directement en place les sédiments pour créer les formes de lit désirées. Rachelly *et al.* (2021) suggèrent que, pour les cours d'eau canalisés à lit de gravier sinueux, l'activité morphologique dépend principalement du taux d'apport de sédiments et du débit, tandis que l'impact de petits changements dans la répartition de la granulométrie des matériaux fournis sur la réponse du lit est faible. La fréquence de répétition devrait dépendre de la réponse morphologique du système de cours d'eau.

Création d'habitats (de frai) interstitiels

Lorsque l'objectif principal de la recharge sédimentaire est la création directe d'habitats de frai, la conception doit être adaptée en conséquence. La granulométrie caractéristique devrait être choisie selon les exigences en matière de substrats pour le frai des espèces de poissons cibles dominantes (voir chap. 7 ; Dubuis *et al.* 2023 ; chap. 8 ; Takatsu *et al.* 2023) tout en prenant en compte le substrat naturel du type de cours d'eau concerné. Par exemple, la granulométrie préférée pour la truite atlantique (*Salmo trutta*)

est de 2 à 5 cm (Breitenstein et Kirchhofer 2010). Le volume d'apport peut être estimé sur la base du volume de substrat manquant pour le frai ; l'emplacement devrait quant à lui respecter les préférences des espèces cibles en matière de vitesse d'écoulement, de profondeur d'écoulement et de profondeur du frai. En plaçant directement les sédiments, il est possible de créer des formes de lit idéales comme des plats propices au frai (Pulg *et al.* 2013). Il est également possible de concevoir un apport indirect à partir de dépôts érodables ; cette méthode requiert uniquement de petits événements de crue étant donné que la granulométrie pour le frai est généralement petite. La planification nécessite de porter une attention particulière au transport attendu et aux processus de dépôt. Si celle-ci est bien réalisée, elle permet d'assurer un transport suffisant de substrats vers les emplacements de frai potentiels. Comme pour toute mesure de recharge sédimentaire, il convient ici d'évaluer et de réduire au strict minimum les impacts sur la protection contre les crues et sur l'équilibre des eaux souterraines. Il peut être nécessaire de procéder à des répétitions annuelles pour garantir des changements à long terme favorisant la reproduction. La période idéale pour créer un habitat de frai par recharge de graviers s'étend de la fin de l'été à l'automne, entre les périodes de reproduction des espèces de cyprinidés et de salmonidés (Breitenstein et Kirchhofer 2010). La fréquence optimale d'une mesure dépend de l'érosion des dépôts et de l'état de colmatage.

9.3 Fondamentaux des processus

Expérience physique

Des avancées ont été réalisées dans le cadre du projet « Dynamique du charriage et des habitats » pour optimiser la conception des mesures de recharge sédimentaire, grâce à des recherches portant sur les schémas typiques d'érosion, de transport et de déposition (Friedl *et al.* 2017). Dans la section qui suit, nous décrivons une expérience de suivi dans un canal expérimental effectuée pour étudier l'influence des structures morphologiques du lit et la persistance des formes de lit qui en résultent.

Description des expériences

Un canal droit d'une longueur de 34 m et de pente variable (fig. 54 et fig. 55) a été construit pour cette expérience conduite à la Plateforme PL-LCH à l'EPFL. Ce canal

possède une section transversale trapézoïdale et deux sections où la largeur du lit diffère. La section à l'amont contient des matériaux de lit immobiles et présente un canal uniforme d'une largeur de 0,5 m. Dans la section à l'aval, le canal s'élargit pour atteindre un maximum de 0,75 m et contient des matériaux mobiles. De couleur rouge, les matériaux de lit immobiles se composent d'un mélange de sédiments grossiers (granulométrie de 4 à 16 mm) et représentent un lit pavé. Ce mélange pour le lit a été choisi en fonction de tests par scanner afin de représenter une rugosité hydraulique de $K_{ST} = 34 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$. Les matériaux de lit mobiles dans la section large présentent une granulométrie plus fine (de 4 à 8 mm). Les recharges sédimentaires consistent en différents mélanges et sont réparties en quatre dépôts placés de manière alternée (fig. 55b), sur la base des travaux de Battisacco *et al.* (2016). Le volume total de la recharge sédimentaire ($0,21 \text{ m}^3$) correspond à 100 % de la capacité de transport des événements de crue morphogéniques simulés (HQ_2 , 8 h) pour la pente moyenne du canal. La pente du canal est divisée en différentes sections linéaires, qui représentent chacune une structure de lit de cours d'eau différente (fig. 55a), conformément aux définitions du contrôle des effets de l'OFEV pour les projets de revitalisation des cours d'eau (Weber *et al.* 2019). La séquence de structures de lit suit celle identifiée sur le terrain (Schroff *et al.* 2021) à l'aval de l'emplacement de la recharge sédimentaire testée en 2016 dans le tronçon à débit résiduel de la Sarine dans le canton de Fribourg (Stähly *et al.* 2020).

L'objectif des expériences est de trouver les critères de conception optimaux pour la recharge sédimentaire par des dépôts érodables afin d'améliorer la structure du lit des cours d'eau (voir la section 9.2.3).

Structure du lit

Modifier la pente et la section transversale crée différentes conditions hydrauliques le long du canal. Une augmentation locale du niveau du lit crée une retenue à l'amont (chenal) où les vitesses à proximité du lit et les contraintes de cisaillement du lit (requis pour la mobilisation des sédiments) sont considérablement réduites. Lorsque le niveau du lit monte (plat), la profondeur d'eau baisse et l'écoulement s'accélère, car la taille de la zone transversale diminue. Pour un même débit de pointe élevé, les dépôts de sédiments placés au plat subissent de l'érosion

et sont transportés hors de la zone de dépôt à un taux considérablement plus élevé (89 % du volume rechargé ; fig. 55b, type 2) que les dépôts placés dans la section de type chenal à l'amont (46 % ; fig. 55b, type 1).

Avec une pente croissante à l'aval du plat (radier, pente de 5,5 ‰), les vitesses et les contraintes de cisaillement du lit continuent de croître. Le transport de sédiments et la sédimentation dans la section du radier dépendent de la magnitude, de la forme et de la durée de l'hydrogramme de crues. Durant la montée en crue d'un hydrogramme symétrique, une forte sédimentation se produit le long d'un segment correspondant à 10 fois la largeur du canal (fig. 56). Les dépôts alternés présentant un taux de blocage élevé (proportion de la section d'écoulement transversale mouillée bloquée par les dépôts, un tiers dans le cas présent) engendrent une déviation marquée de l'écoulement et un front de sédiments en direction d'un côté du cours d'eau. Pendant la courbe de décrue, de

Figure 54

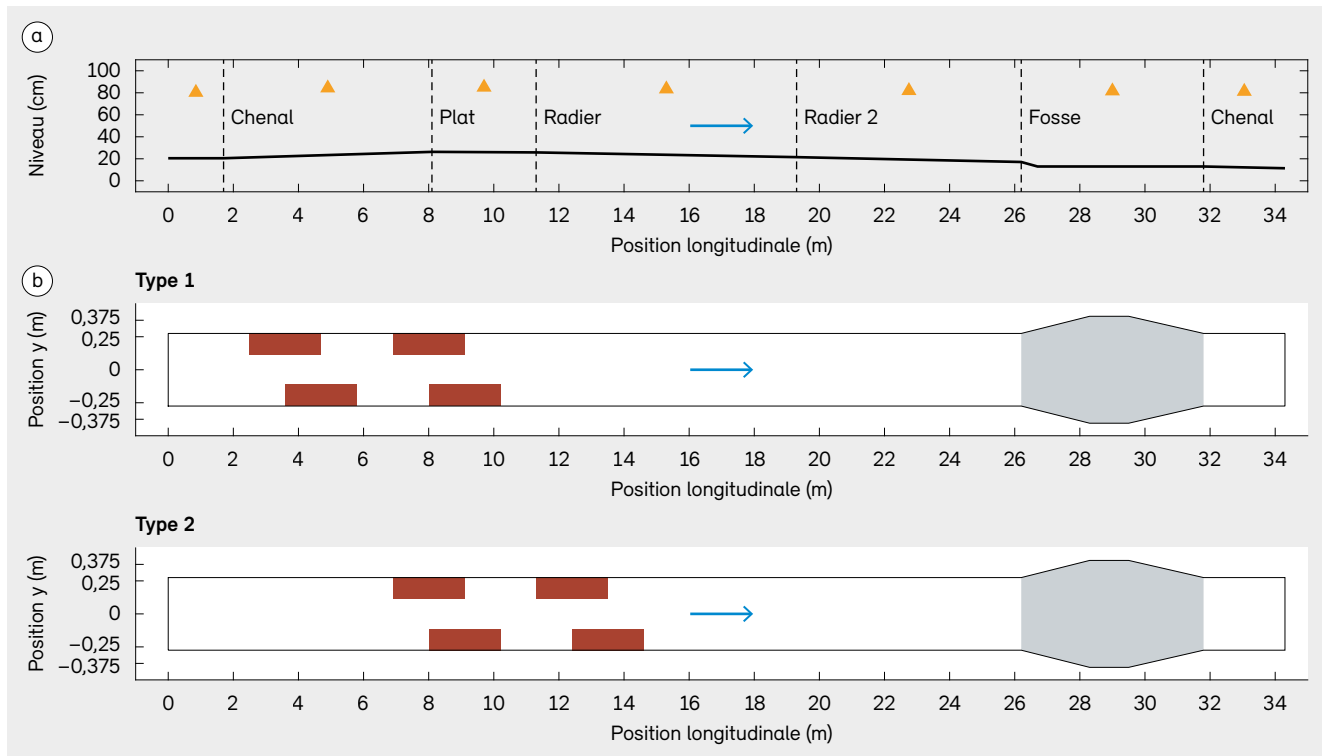
Photo d'un canal morphologique comprenant des dépôts érodables à la Plateforme PL-LCH à l'EPFL.



Photo : C. Mörtl © PL-LCH

Figure 55

(a) Profil longitudinal du canal expérimental, qui montre les sections de différentes structures de fond de lit et la position des limnimètres (triangles jaunes). (b) Vue en plan du canal montrant les deux emplacements des dépôts (rectangles rouges) et la zone de lit érodable (surface grise) dans le tronçon élargi.



Source : EPFL

nouvelles formes de lit se présentent à une distance de 10 à 20 fois la largeur du canal à partir de la zone de dépôt située dans la forte pente (radier 2, 7,0 ‰).

Dans une séquence typique d'un cours d'eau à lit de gravier, les fosses se forment à l'aval des radiers. Elles fonctionnent comme des bassins de rétention des sédiments qui stockent et diffusent occasionnellement des ondes de sédiments et sont considérées comme un contributeur essentiel aux séquences de remise en mouvement des sédiments (Dhont et Ancey 2018). Dans l'expérience en laboratoire, la majeure partie des matériaux mobilisés étaient déposés dans la fosse après les deux premiers événements de crue (63 % et 73 %). Dans chacun des cas, un pourcentage négligeable était transféré ou libéré plus loin à l'aval. Cependant, sur le tronçon à débit résiduel de la Sarine, les marqueurs présents dans les sédiments déposés ont montré un transport considérable à travers une large fosse ainsi qu'une sédimentation à son

aval (Stähly *et al.* 2020). Cela suggère que des caractéristiques micromorphologiques, la rugosité des berges et les hétérogénéités hydrauliques (p. ex. courants secondaires) peuvent favoriser de manière significative le transport à travers les fosses au cours d'un événement de crue unique. Toutefois, les fosses présentes à l'aval des mesures de recharge sédimentaire (< 20 fois la largeur du canal) réduisent la longueur de l'impact de la mesure jusqu'à ce que des sédiments provenant d'une recharge répétée ou d'apports naturels remplissent suffisamment la fosse pour déclencher un nouvel ajout de sédiments.

Persistance des formes de lit

Nous avons évalué la persistance des formes de lit nouvellement créées à partir des dépôts érodables en effectuant des tests avec des événements de crue successifs présentant des hydrogrammes identiques. Après deux événements de crue, la proportion de couverture de la couche de pavage

(8,3 %) était significativement plus faible par comparaison à la couverture après un seul événement de crue (22,5 %) (fig. 57). À l'exception d'une grande partie du dépôt situé le plus à l'amont, tous les dépôts ont subi de l'érosion et ont été mobilisés, du moins en partie, durant les deux événements de crue. La meilleure persistance des formes de lit a été atteinte à proximité immédiate des emplacements de dépôts d'origine (< 5 fois la largeur du canal). Les formes de lit longitudinales à proximité des rives étaient plus persistantes que les formes de lit transversales au centre du canal. Les résultats obtenus dans le canal expérimental suggèrent que les sédiments devraient être réapprovisionnés après tout événement de crue morphogénique majeur (~HQ₂) du moment où l'objectif est d'améliorer la structure du lit du cours d'eau sur une couche de pavage statique dans le tronçon à l'aval (< 20 fois la largeur du canal). Il conviendrait de réapprovisionner les sédiments pour un volume correspondant à une quantité allant jusqu'à 100 % de la capacité de transport.

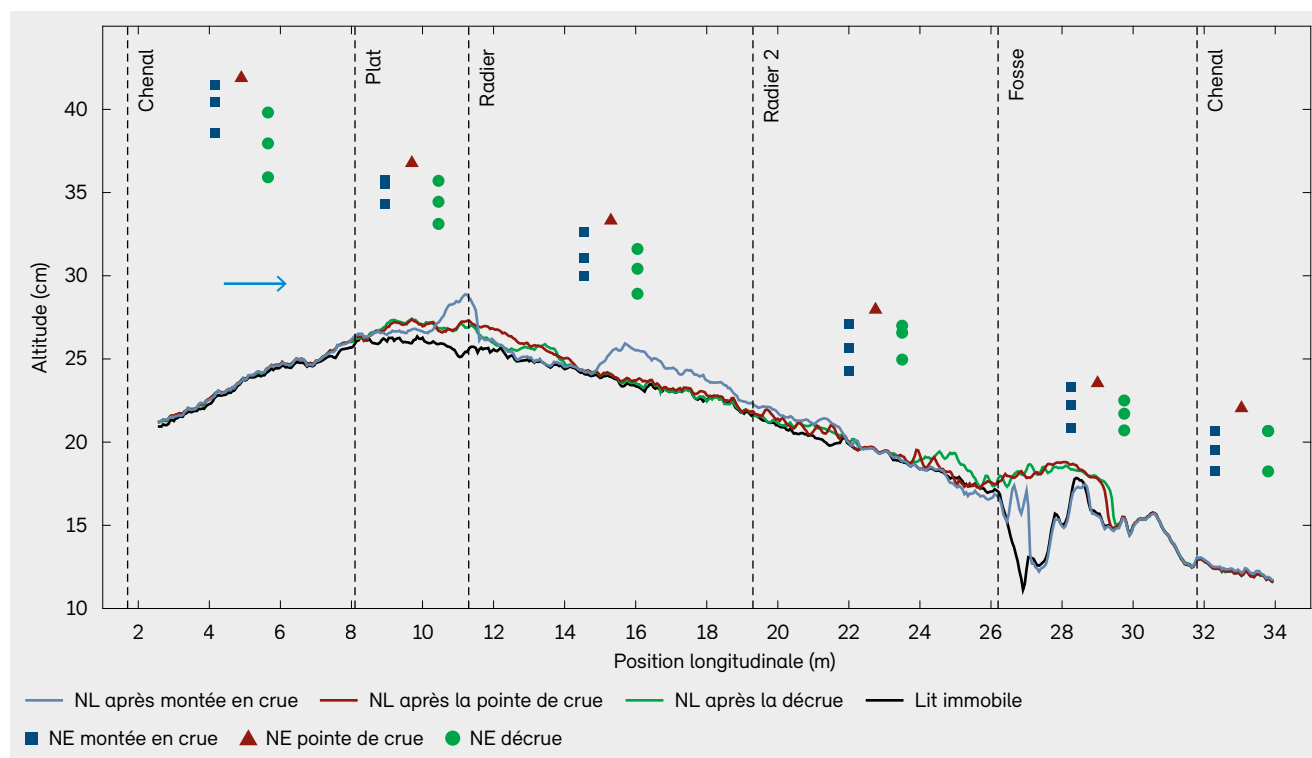
Nous avons observé que les événements avec un débit de pointe plus faible n'avaient que peu d'impact sur les formes de lit nouvellement créées.

9.4 Évaluation des effets

Plusieurs méthodes standardisées sont disponibles pour évaluer les effets des mesures de recharge sédimentaire en fonction des objectifs définis. Réaliser l'évaluation sur la base de lignes directrices et de méthodes standardisées garantit la comparabilité des données et facilite les apprentissages mutuels d'un projet à l'autre. Le choix de méthodes appropriées dépend du contexte de la mesure, mais aussi des objectifs d'assainissement. En Suisse, des évaluations des effets sont nécessaires pour les mesures implémentées dans le cadre d'un assainissement du régime de charriage ainsi que pour les projets de revitalisation des eaux (art. 42c et 49 de l'ordonnance sur la protection des eaux).

Figure 56

Profil longitudinal du canal expérimental avec des relevés du niveau du lit (NL) et du niveau de l'eau (NE) à différentes étapes (montée en crue, pointe de crue, décrue) d'un hydrogramme symétrique. Les relevés NL représentent l'élévation moyenne du niveau du lit sur une bande de 18 cm de large (décalage entre les dépôts) le long de l'axe central du canal.



En 2019, l'OFEV a publié une documentation pratique qui décrit une structure définie et une procédure standardisée pour le contrôle des effets des projets de revitalisation des cours d'eau (Weber *et al.* 2019). Une documentation similaire portant sur des projets d'assainissement du régime de charriage est en cours d'élaboration, déjà disponible sous forme de projet. Le principe fondamental du contrôle des effets expliqué dans les deux documents est une comparaison des caractéristiques pertinentes du tronçon de cours d'eau concerné avant et après la revitalisation.

Effets écomorphologiques

Assainissement du régime de charriage

L'objectif principal de l'assainissement du régime de charriage est le rétablissement de structures morphologiques et de dynamiques typiques et proches de l'état naturel (Schälchli

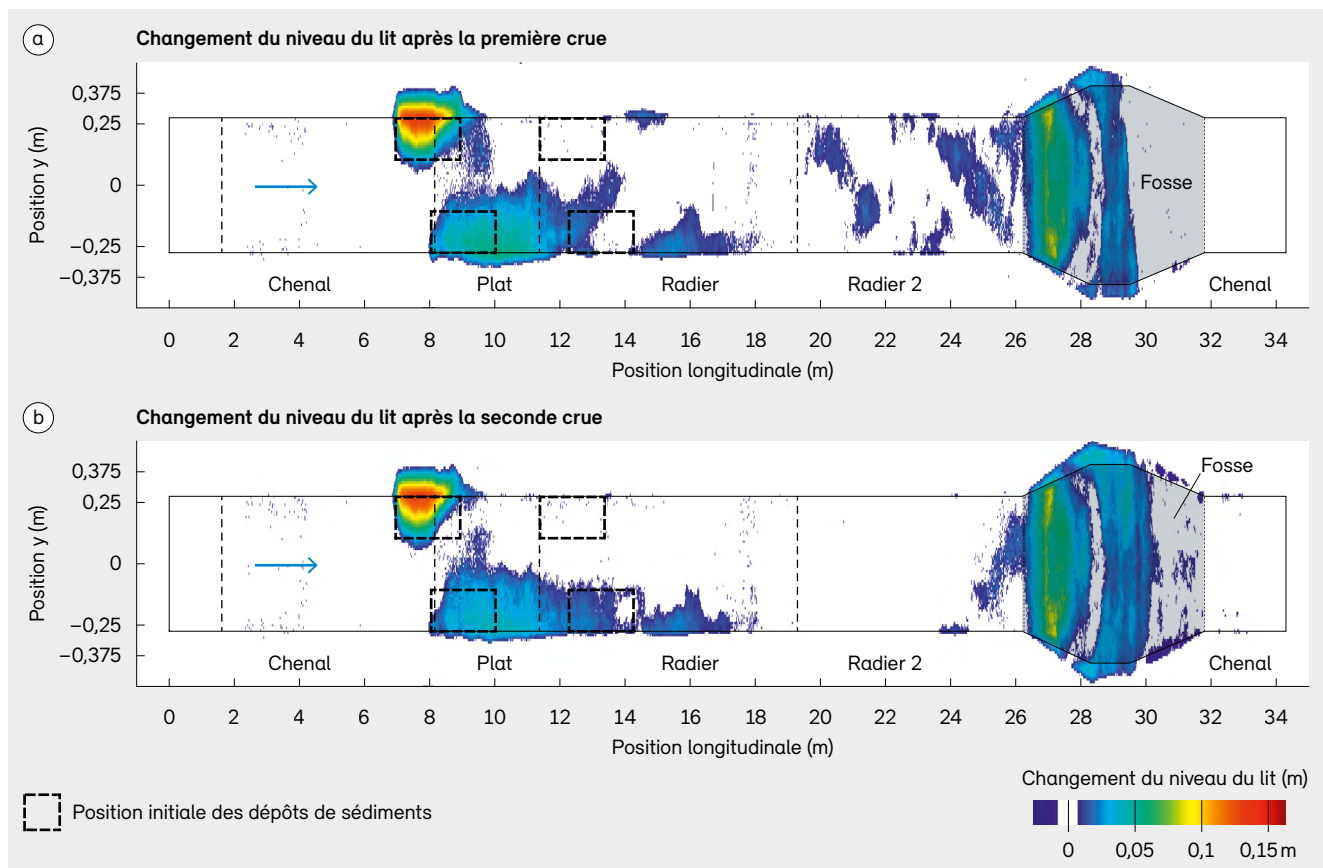
et Kirchhofer 2012). Dans le cadre du contrôle des effets des mesures d'assainissement du régime de charriage, l'évaluation des objectifs de la revitalisation se fonde sur un jeu de six indicateurs abiotiques (forme du lit, étendue des bancs de gravier, composition du substrat, colmatage interne, évolution du talweg et évolution de la position moyenne du lit). Il est possible de compléter ce jeu avec des indicateurs biotiques, en mettant un accent particulier sur la faune piscicole. En outre, il conviendrait d'estimer l'impact réel d'une mesure d'assainissement sur le régime de charriage annuel moyen du tronçon de cours d'eau.

Revitalisation de cours d'eau

La documentation pratique relative au contrôle des effets des mesures des projets de revitalisation des cours d'eau comprend 22 indicateurs, regroupés dans 10 jeux

Figure 57

Vue en plan du changement après (a) la première crue et après (b) la seconde crue pour un hydrogramme identique, à la suite d'une mesure de recharge sédimentaire unique. Les rectangles en pointillés illustrent les positions initiales des dépôts de sédiments.



d'indicateurs (Weber *et al.* 2019). Chaque jeu d'indicateurs représente un objectif de revitalisation spécifique. Le jeu d'indicateurs 1 (diversité des habitats) comprend six indicateurs écomorphologiques : structure du fond du lit, structure des rives, profondeur d'eau, vitesse d'écoulement, offre en abris et substrat. Leur évaluation constitue la base obligatoire pour le contrôle des effets d'un projet de revitalisation (Weber *et al.* 2019). Outre le jeu obligatoire d'indicateurs 1, le jeu d'indicateurs 2 (dynamique)

est également hautement pertinent et peut être un outil d'évaluation efficace pour les mesures de recharge sédimentaire. Les trois indicateurs du deuxième jeu qui sont la dynamique de la structure du fond du lit, la dynamique de la structure des rives et la modification du niveau du fond du lit sont directement liés. L'adéquation des autres jeux d'indicateurs, abiotiques et biotiques, tels que le jeu 7 (poissons), peut être évaluée au cas par cas et dépend des objectifs d'assainissement retenus.

Encadré 12 : En pratique – définition des objectifs et questions centrales

Sandro Rittler, Holinger SA

Cinq questions centrales sont essentielles pour planifier la continuité des sédiments et les mesures de recharge : où, comment et quand les sédiments devraient-ils être déposés ; quelle qualité et quelle quantité de sédiments faut-il utiliser ?

Définition des objectifs

Pour répondre à ces questions, il faut procéder à une analyse détaillée de la situation actuelle concernant la sécurité en matière de crues et l'écologie. Il faut ensuite définir l'état visé par la mise en œuvre des mesures liées aux sédiments. Les objectifs peuvent inclure un charriage proche de l'équilibre, la prévention de l'affouillement et la création de nouveaux habitats et sites de frai. Comme pour les projets de revitalisation, il convient de déterminer les espèces de poissons cibles pour lesquelles les sédiments idéaux sont sélectionnés en matière de substrat de frai.

Questions centrales

Où et comment : durant un événement de crue, les zones de resserrement existantes dans le lit ne devraient pas être réduites davantage par des dépôts de sédiments supplémentaires. En parallèle, il faut tenir compte, dans la planification de recharges sédimentaires, des

structures hydrauliques telles que les centrales hydro-électriques et d'autres contraintes comme les conduites et les usages de loisir. Une fois qu'un site adéquat a été trouvé, il y a lieu de garantir l'accessibilité au cours d'eau et le respect intégral de tous les objets naturels dignes de protection. Lors du déversement, on veillera à introduire les sédiments de façon uniforme et distribuée afin de ne pas surcharger le système. Il faut être en mesure de gérer l'emplacement des dépôts de sédiments d'un point de vue logistique.

Quantité et qualité : la quantité de sédiments nécessaire pour atteindre un état d'équilibre dépend de la capacité de transport et des sédiments disponibles. Par ailleurs, la quantité et la qualité des sédiments pourraient influencer sur la turbidité à l'aval. De manière générale, il est préférable d'introduire des quantités modestes, mais de le faire régulièrement. Pour des raisons de durabilité, les sédiments devraient provenir du même bassin versant. Quand et comment : les aspects liés à la protection contre les crues, à la faune piscicole et à la végétation doivent être pris en compte dans l'établissement du calendrier de recharge sédimentaire. Il est possible d'employer des études pilotes pour acquérir de l'expérience avec les incertitudes et les imprévus, ce afin de définir le meilleur moment pour procéder à la recharge. Finalement, les préoccupations liées à la fois à la sécurité en matière de crue et à l'écologie sont importantes et il s'agit de trouver un équilibre idéal dans la planification de la continuité des sédiments et des mesures de recharge.