

Régime de charriage – Mesures

Un module de l'aide à l'exécution Renaturation des eaux



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral de l'environnement OFEV

Régime de charriage – Mesures

Un module de l'aide à l'exécution Renaturation des eaux

Impressum

Valeur juridique

La présente publication est une aide à l'exécution élaborée par l'OFEV en tant qu'autorité de surveillance. Destinée en premier lieu aux autorités d'exécution, elle concrétise les exigences du droit fédéral de l'environnement (notions juridiques indéterminées, portée et exercice du pouvoir d'appréciation) et favorise ainsi une application uniforme de la législation. Si les autorités d'exécution en tiennent compte, elles peuvent partir du principe que leurs décisions seront conformes au droit fédéral. D'autres solutions sont aussi licites dans la mesure où elles sont conformes au droit en vigueur.

Éditeur

Office fédéral de l'environnement (OFEV)

L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

Auteurs

Manuel Nitsche, Martin Pfaundler ; avec le soutien de Lukas Hunzinger, d'Ueli Schälchli, d'Arthur Kirchhofer, de Tobias Rüesch et de Christian Roulier

Groupe d'accompagnement

Daniel Devanthéry, canton du Valais ; Michael Döring, ZHAW Wädenswil ; Rémy Estoppey, OFEV ; Alessandro Grasso, OFEV ; Philipp Gyr, canton de Saint-Gall ; Daniel Hefti, OFEV ; Oliver Hitz, canton de Berne ; Bernhard Hohl, Office fédéral de l'énergie ; Antoine Magnollay, OFEV ; Christian Marti, canton de Zurich ; Ricardo Mendez, Axpo Power AG ; Sabin Nater, canton d'Argovie ; Roger Pfammatter, ASAE (jusqu'à août 2020) ; Anton Schleiss, EPF Lausanne ; David Schmid, canton des Grisons ; Steffen Schweizer, Kraftwerke Oberhasli AG ; Luca Vetterli, ProNatura ; Christine Weber, EAWAG ; Simona Weber, OFEV ; Urs Zehnder, canton de Lucerne ; Frédéric Zuber, canton du Valais

Mise en page

Funke Lettershop AG

Photo de couverture

Déversement de gravier dans la Limmat en aval de la centrale hydroélectrique de Wettingen (Argovie).

© Manuel Nitsche

Téléchargement au format PDF

www.bafu.admin.ch/uv-2325-f

Il n'est pas possible de commander une version imprimée.

Cette publication est également disponible en allemand et en italien. La langue originale est l'allemand.

© OFEV 2024

Table des matières

Abstracts	5	4	Suivi de l'efficacité	65
Avant-propos	6	4.1	Introduction	65
Aide à l'exécution Renaturation des eaux	7	4.2	Indicateurs	66
Modification du droit sur la protection des eaux	7	4.3	Ampleur du suivi de l'efficacité	68
Aide à l'exécution Renaturation des eaux	7	4.4	Vérifier que l'objectif est atteint	70
		4.5	Optimisation de la mesure	70
		Annexes		71
1 Introduction	8	A	Bases légales	
1.1 Aperçu du module	8	B	Bibliographie	
1.2 Importance du charriage dans le cadre d'une renaturation	9	C	Contenu d'une décision d'assainissement	
1.3 Objectifs de l'assainissement et pesée des intérêts	11	D	Approches pour déterminer le débit de charriage dans l'état actuel et l'état proche de l'état naturel	
1.4 Bases légales	12	E	Méthode pour déterminer le débit de charriage nécessaire	
2 Déroulement de l'assainissement	14	F	Précisions pour la planification, l'étude de projet et la mise en œuvre des différents types de mesures	
2.1 Déroulement de l'assainissement des centrales hydrauliques	14	G	Liste de contrôle : Étude sur le type et l'ampleur des mesures	
2.2 Déroulement de l'assainissement des installations non liées à la force hydraulique	17	H	Indicateurs pour le suivi de l'efficacité	
2.3 Principes de base en cas de construction de nouvelles installations ou d'agrandissement d'installations existantes	18			
3 Étude sur le type et l'ampleur des mesures	20			
3.1 Aperçu	20			
3.2 Analyser de manière approfondie l'état actuel et l'état proche de l'état naturel du cours d'eau (étape 1)	23			
3.3 Définir des objectifs morphologiques pour le cours d'eau et le débit de charriage nécessaire (étape 2)	37			
3.4 Définir des objectifs d'assainissement pour les installations (étape 3)	51			
3.5 Élaborer un catalogue de mesures (étape 4)	51			
3.6 Élaborer et apprécier les variantes de mesures (étape 5)	56			
3.7 Retenir la meilleure variante (étape 6)	60			
3.8 Coordonner les mesures de protection des eaux (étape 7)	61			
3.9 Définir la stratégie du suivi de l'efficacité (étape 8)	62			
3.10 Marche à suivre simplifiée	63			

Abstracts

The current module of the implementation guide on river restoration describes the procedure for planning measures to eliminate or prevent bedload deficits in rivers possibly caused by hydropower plants, gravel extractions, flood protection and revitalization projects and other installations in rivers. Planning includes steps for analyzing the situation, defining objectives and measures. The module also suggests a pragmatic method for determining the ecologically required bedload transport as well as a concept and indicators for monitoring the effectiveness of bedload measures.

Le présent module de l'aide à l'exécution Renaturation des eaux présente la procédure de planification des mesures visant à éliminer ou à empêcher les déficits de charriage dans les eaux affectées notamment par des centrales hydroélectriques, des gravières, des dépotoirs à alluvions, des aménagements de protection contre les crues et de revitalisation des eaux. La planification comprend l'analyse de la situation de même que la définition des objectifs et des mesures. Le module propose également une méthode pratique pour déterminer le débit de charriage nécessaire ainsi qu'une stratégie et des indicateurs pour le suivi de l'efficacité des mesures mises en œuvre.

Das vorliegende Modul der Vollzugshilfe «Renaturierung der Gewässer» beschreibt das Vorgehen zur Planung von Massnahmen zur Beseitigung oder Verhinderung von Geschiebedefiziten im Gewässer bei Wasserkraftanlagen, Kiesentnahmen, Geschiebesammlern, Hochwasserschutz- und Revitalisierungsprojekten und anderen Anlagen. Zur Planung gehören Arbeitsschritte zur Situationsanalyse, zur Zieldefinition und zur Massnahmendefinition. Im Modul wird auch eine pragmatische Methodik zur Bestimmung einer erforderlichen Geschiebefracht vorgeschlagen sowie ein Konzept und Indikatoren für die Wirkungskontrolle von Geschiebemaassnahmen.

Questo modulo dell'aiuto all'esecuzione «Rinaturazione delle acque» descrive la procedura di pianificazione delle misure volte a eliminare o prevenire i deficit di apporto solido nei corsi d'acqua in presenza di impianti idroelettrici, prelievi di ghiaia, camere di ritenuta, progetti di rivitalizzazione e protezione contro le piene e altri impianti. La pianificazione comprende le seguenti fasi di lavoro: analisi della situazione, definizione degli obiettivi e definizione delle misure. Il modulo propone anche un metodo prammatico per determinare il carico di fondo necessario, come pure un piano completo di indicatori per il controllo dell'efficacia di misure concernenti il materiale solido di fondo.

Keywords:

Bedload balance, bedload remediation, Waters Protection Act, restoration measures, hydropower utilization, rivers

Mots-clés :

régime de charriage, assainissement du régime de charriage, loi fédérale sur la protection des eaux, mesures d'assainissement, exploitation de la force hydraulique, cours d'eau

Stichwörter:

Geschiebehaushalt, Geschiebesanierung, Gewässerschutzgesetz, Sanierungsmassnahmen, Wasserkraftnutzung, Fliessgewässer

Parole chiave:

bilancio in materiale solido di fondo, risanamento del bilancio in materiale solido di fondo, legge sulla protezione delle acque, misure di risanamento, sfruttamento idrico, corsi d'acqua

Avant-propos

La protection systématique des eaux et de leurs multiples fonctions comme l'utilisation durable de cette ressource constituent les objectifs essentiels de la législation fédérale en la matière. La modification en 2011 de la loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux) visait à trouver des solutions équilibrées respectant à la fois les intérêts de la protection et ceux liés à l'utilisation.

Ces changements représentent un nouveau jalon pour la protection des eaux suisses. Elles ont pour but de valoriser les cours d'eau en tant que milieux naturels afin qu'ils retrouvent un état proche de l'état naturel et qu'ils puissent ainsi contribuer à la conservation et au développement de la biodiversité.

L'aide à l'exécution Renaturation des eaux entend soutenir les cantons dans l'application des dispositions légales et garantir une exécution du droit fédéral homogène et coordonnée. Subdivisée en modules, elle couvre les divers aspects de la renaturation des eaux dans les domaines suivants : revitalisation des cours d'eau et des étendues d'eau, zones alluviales, rétablissement de la migration des poissons et du régime de charriage, assainissement des éclusées et coordination des activités de gestion des eaux. Comme la mise en œuvre de la législation environnementale incombe aux cantons, des représentants de ceux-ci ont participé aux groupes de travail chargés d'élaborer ces documents.

Le présent module est consacré à l'élaboration et à l'évaluation de mesures visant à éliminer ou à éviter des déficits de charriage causés par des centrales hydroélectriques, des projets d'aménagement des cours d'eau ou d'autres installations dans les eaux. L'augmentation du débit de charriage et, dans certains cas, la mobilisation de matériaux charriés grâce à une amélioration de la dynamique d'écoulement comptent au nombre des mesures possibles. Le module présente les principales prescriptions qui président au choix des mesures pouvant être adoptées et indique comment ces dernières peuvent être appréciées. Enfin, il définit une méthodologie pour le suivi de l'efficacité des mesures après leur mise en œuvre. Les exigences relatives à la largeur du fond du lit et à l'espace réservé aux eaux ne font pas l'objet du présent module.

L'OFEV adresse ses remerciements à toutes les personnes qui ont contribué à cette publication, en particulier aux membres de l'équipe du projet, à ceux du groupe de travail et aux experts externes qui se sont engagés afin d'aboutir à des solutions pratiques.

Stephan Müller, division Eaux
Office fédéral de l'environnement (OFEV)

Aide à l'exécution Renaturation des eaux

Modification du droit sur la protection des eaux

En 2009, les Chambres fédérales ont adopté plusieurs modifications de loi avec pour objectif de faire progresser la renaturation des eaux en Suisse. Ces modifications définissent plusieurs orientations :

- encourager les revitalisations (rétablissement, par des mesures constructives, des fonctions naturelles d'eaux superficielles endiguées, corrigées, couvertes ou mises sous terre) ;
- garantir un espace réservé aux eaux et une exploitation extensive de cet espace ;
- rétablir la libre migration des poissons ;
- atténuer les effets négatifs des éclusées en aval des centrales hydroélectriques ;
- améliorer le régime de charriage.

Aide à l'exécution Renaturation des eaux

La présente publication est un module de l'aide à l'exécution Renaturation des eaux, qui aborde tous les aspects importants relevant en particulier de la revitalisation des cours d'eau et des étendues d'eau, des zones alluviales, du rétablissement de la libre migration des poissons, de l'assainissement des éclusées et de l'assainissement du régime de charriage. L'aide à l'exécution est conçue en modules qui traitent, pour ces différents domaines, de la planification stratégique, de la planification de mesures concrètes, du financement, des modèles de données et des exigences applicables aux géodonnées conformément à la loi sur la géoinformation (RS 510.62). Elle contient enfin un module dépassant le cadre thématique de la renaturation relatif à la coordination des activités de gestion des eaux. Les modules peuvent être consultés sur le site Internet *Aide à l'exécution « Renaturation des eaux »*.

1 Introduction

1.1 Aperçu du module

Thématique : modifications du régime de charriage

La loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux ; RS 814.20) prescrit que le régime de charriage d'un cours d'eau ne doit pas être modifié par des installations au point de porter gravement atteinte à la faune et à la flore indigènes et à leurs biotopes, au régime des eaux souterraines et à la protection contre les crues. Est considérée comme une modification du régime de charriage au sens de l'art. 43a LEaux :

- un débit de charriage réduit en aval d'une installation, par exemple à cause de la rétention des matériaux charriés dans des dépotoirs à alluvions et des retenues, ou à cause de l'extraction de matériaux charriés ;
- une réduction des apports de matériaux charriés, par exemple du fait de l'aménagement du lit et des rives des cours d'eau non canalisés ;
- une capacité de transport diminuée du fait d'une modification du régime des crues par des prélèvements d'eau.

Il s'agit d'éliminer ou d'éviter des déficits de charriage. L'exhaussement du lit dû aux dépôts de matériaux charriés dans les retenues des installations peut causer une atteinte grave à la protection contre les crues. Du fait de leur spécificité, les cas de ce type ne sont pas traités dans la présente aide à l'exécution.

Ne font pas l'objet de l'art. 43a LEaux et du présent module :

- l'incision du lit ou les déficits morphologiques provoqués par la canalisation (le rétrécissement) du cours d'eau. Les mesures correspondantes visant, entre autres, à rétablir la largeur sont mises en œuvre dans le cadre de projets de protection contre les crues et de revitalisation fondés sur l'art. 4 de la loi fédérale sur l'aménagement des cours d'eau (RS 721.100) et de l'art. 37 LEaux ;
- le colmatage du fond du lit dû à des prélèvements d'eau. Les mesures correspondantes sont mises en œuvre essentiellement en vertu de dispositions relatives aux eaux résiduelles et de prescriptions sur les purges ;
- les déficits de protection contre les crues engendrés par les processus naturels d'atterrissement ou d'érosion. Les mesures correspondantes sont prises par les cantons en vertu de la loi fédérale sur l'aménagement des cours d'eau.

Destinataires

Afin d'améliorer le régime de charriage, les cantons ont, dans un premier temps, élaboré une planification stratégique, qui a été clôturée le 31 décembre 2014. Il s'agissait d'identifier les tronçons de cours d'eau subissant de graves atteintes à cause d'un régime de charriage modifié et de désigner les installations à l'origine du déficit. Les cantons et les détenteurs de ces installations ont maintenant pour tâche de planifier et de mettre en œuvre des mesures d'assainissement du régime de charriage.

Les projets d'aménagement des cours d'eau visant la protection contre les crues et la revitalisation doivent être planifiés de sorte que les dispositions de la LEaux relatives au régime de charriage soient respectées.

Au travers de cette publication, la Confédération entend aider tous les acteurs impliqués (détenteurs d'installations, cantons et bureaux privés) à planifier et à sélectionner des mesures adéquates.

Installations concernées

Les installations concernées par les mesures sont non seulement les centrales hydroélectriques (captages, barrages, réservoirs, etc.), mais aussi les installations non liées à la force hydraulique, comme les sites d'extraction de gravier, les dépotoirs à alluvions et d'autres installations, notamment liées à des projets de protection contre les crues ou de revitalisation, dès lors que celles-ci induisent une modification du régime de charriage. Il peut s'agir ici aussi bien d'installations existantes que de nouvelles installations, ou d'agrandissements d'installations.

Contenus

Le présent module explique le déroulement de la planification de mesures visant à éliminer ou à éviter des déficits de charriage (chap. 2). Il recommande en premier lieu une méthode détaillant comment élaborer l'étude sur le type et l'ampleur des mesures requise par la législation pour toutes les installations à assainir dans un bassin versant (chap. 3). Il explicite également comment doit être planifié le suivi de l'efficacité (chap 4).

Méthode « Débit de charriage nécessaire »

Le présent module propose des méthodes permettant de définir le « débit de charriage nécessaire », c'est-à-dire le volume de matériaux charriés requis pour supprimer les modifications préjudiciables du régime de charriage et éliminer ainsi les atteintes graves qui en résultent.

Actualisation du module

La méthode proposée dans le présent module sera vérifiée sur la base des expériences d'assainissement et des projets de recherche menés. Il est prévu que ce module soit actualisé afin de prendre en considération l'évolution de l'état des connaissances et les enseignements tirés de la pratique.

1.2 Importance du charriage dans le cadre d'une renaturation

Liens entre charriage, largeur et morphologie du cours d'eau

En son art. 42a, l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux ; RS 814.201) fait mention d'un lien de causalité entre le régime de charriage et les structures morphologiques des cours d'eau. De nombreux travaux scientifiques ont décrit l'influence que pouvait avoir le charriage sur la largeur et la morphologie d'un cours d'eau (p. ex. Parker 1979, Church 2006). Mais la morphologie des cours d'eau non canalisés est aussi influencée par d'autres facteurs que le charriage (débit, végétation et spécificités géologiques).

Lorsqu'un cours d'eau ne présente pas de rétrécissement, la largeur et la morphologie du lit s'ajustent en fonction du régime d'écoulement et des apports de matériaux charriés. Ainsi naissent différents styles fluviaux, qui peuvent aller du lit en méandres au lit ramifié. La largeur relative du lit constitue un élément de différenciation essentiel des styles fluviaux (Ahmari et da Silva 2011, Métivier et Barrier 2012) : par rapport à leur profondeur d'écoulement, les lits ramifiés sont sensiblement plus larges que les lits en méandres ou sinueux. Il a été démontré par des essais pilotes (p. ex. Marti 2006) ainsi que dans une étude menée sur les cours d'eau suisses (Schälchli et Hunzinger, 2021) qu'une modification des apports de matériaux charriés entraînait également des changements de la largeur et de la morphologie du lit.

La largeur des cours d'eau canalisés est souvent réduite, et cette caractéristique constitue alors le facteur essentiel de détermination du style fluvial. L'art. 43a LEaux et le présent module ne portent que sur le facteur du débit de charriage. Cette dernière est essentiellement modifiée ou rétablie dans le cadre de projets de protection contre les

crues ou de revitalisation fondés sur l'art. 4 de la loi fédérale sur l'aménagement des cours d'eau et de l'art. 37 LEaux.

Le fond du lit graveleux est un milieu naturel

La plupart des cours d'eau suisses charrient des matériaux (graviers, galets et sables grossiers) qui, en cas de débit accru, se déplacent sur le fond du lit. Ce phénomène, appelé charriage, donne naissance à des structures toujours renouvelées et, par suite, à de multiples milieux naturels. Les dépôts de gravier sur le fond du lit servent de frayère aux poissons lithophiles. Les bords des bancs de gravier, où les profondeurs sont faibles, abritent les poissons juvéniles. La surface et les pores du fond du lit graveleux offrent un milieu de vie naturel à certaines larves d'insectes dont se nourrissent à leur tour les poissons. Les bancs de gravier qui s'assèchent pendant les débits d'étiage ou moyens accueillent une végétation pionnière et une faune de petite taille (sauterelles, araignées, oiseaux, etc.). Une dynamique sédimentaire importante (marquée par l'érosion, la mobilisation et le dépôt de sables, de graviers et de galets) est l'attribut typique des zones alluviales des cours d'eau charriant des graviers et constitue le facteur essentiel de l'extraordinaire diversité de la faune et la flore de ces milieux. Enfin, un substrat bien irrigué favorise la capacité d'autoépuration des eaux et améliore leur qualité ainsi que les échanges entre les eaux superficielles et souterraines.

Déficits en cas de charriage insuffisant

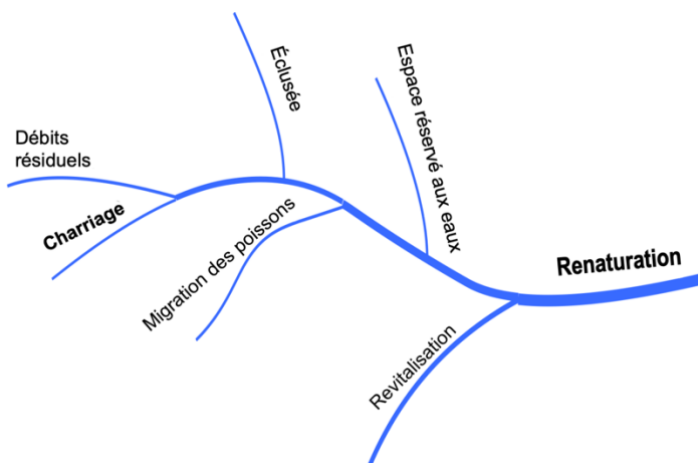
Dans les cours d'eau où l'apport de matériaux charriés est insuffisant, le talweg¹ et les bancs de gravier peuvent s'éroder. Le chenal principal s'enfonce, tandis que les chenaux latéraux et les bancs avoisinants, moins souvent inondés, s'embroussaillent. La largeur dynamique se voit réduite et le style fluvial se transforme en un lit simple. Conséquence du déficit de matériaux charriés, le substrat devient plus grossier et il se produit un phénomène de pavage du fond du lit, qui se colmate alors progressivement. Toutes ces modifications sont associées à une réduction de la dynamique morphologique, qui induit une transformation drastique du milieu naturel aquatique. Les larves d'insectes y sont moins présentes, les espèces lithophiles ne disposent plus du substrat adéquat pour se reproduire, les poissons juvéniles trouvent moins de zones d'eau peu profondes offrant un fond meuble. Moins irriguée, la surface externe des bancs de graviers grossiers est souvent colmatée par des algues séchées et des sédiments fins. En cas d'abaissement du niveau des eaux souterraines, la composition de la végétation des zones alluviales est modifiée au profit d'espèces végétales privilégiant les milieux secs. De manière générale, un charriage insuffisant entraîne un appauvrissement de la morphologie fluviale et, par suite, une diminution de la diversité et de la composition des espèces.

¹ Ligne qui relie les points les plus bas des profils transversaux dans le sens longitudinal d'un cours d'eau.

L'assainissement du régime de charriage comme composante de la renaturation

La LEaux prévoit différentes mesures visant la renaturation des cours d'eau et le rétablissement de leurs fonctions naturelles (fig. 1). L'assainissement du régime de charriage constitue un élément de ces mesures de renaturation. La largeur et le débit du cours d'eau sont aussi déterminants pour sa morphologie que le régime de charriage. Le succès des renaturations implique donc aussi la mise en œuvre d'autres aspects comme la revitalisation, l'assainissement des débits résiduels et l'assainissement des éclusées. Cela signifie aussi que les mesures de charriage sont plus efficaces dans les tronçons de cours d'eau dont la largeur, le débit et la dynamique sont proches de l'état naturel.

Fig. 1 : Les différentes mesures de renaturation des eaux



1.3 Objectifs de l'assainissement et pesée des intérêts

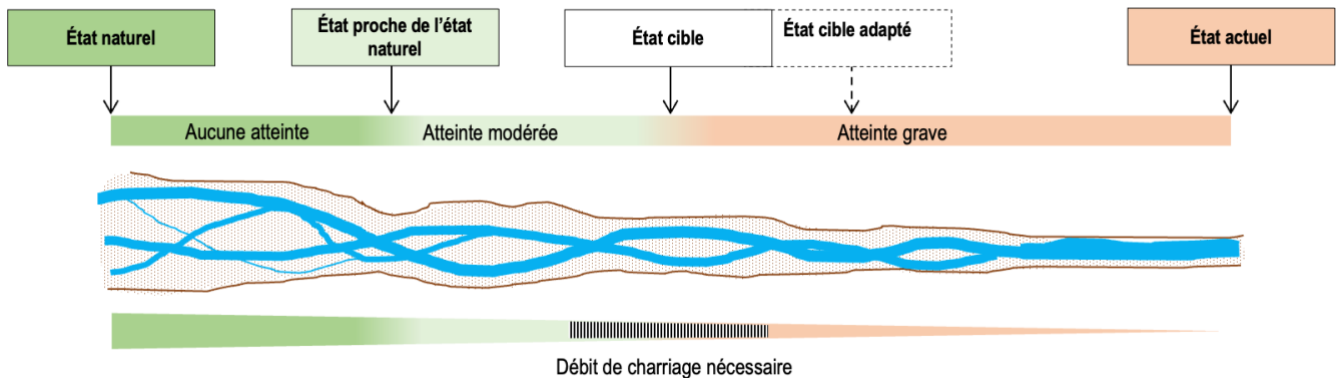
Éliminer les atteintes graves subies par le cours d'eau par rapport à un état proche de l'état naturel

L'assainissement du régime de charriage a pour objectifs d'éliminer les atteintes graves causées par les installations et de rétablir des structures et une dynamique morphologiques aussi naturelles que possible. Les mesures adoptées visent en premier lieu à augmenter le débit de charriage jusqu'à rétablir une structure et une dynamique de la morphologie similaires à celles dans les tronçons présentant une largeur et des caractéristiques de débit proches de l'état naturel (cf. définition au point 3.2.2). Des atteintes modérées sont autorisées (cf. état cible, fig. 2).

Objectifs morphologiques réduits en présence de conditions-cadres spécifiques

Il arrive que certains tronçons présentent une largeur insuffisante ou que la dynamique de l'écoulement soit trop faible pour donner lieu à un régime de charriage ou à une morphologie proches de l'état naturel – y compris lorsque le débit de charriage a été augmenté au niveau de l'installation à assainir. Dans ce type de cas, les objectifs d'assainissement se voient réduits (cf. état cible adapté, fig. 2 et points 3.3.2 à 3.3.7).

Fig. 2 : États morphologiques en fonction des débits de charriage, illustrés par un exemple de cours d'eau ramifié proche de l'état naturel



Les mesures d'assainissement visent à atteindre l'état cible ou l'état cible adapté en augmentant le débit de charriage. La démarche prévoit qu'il soit procédé à une pesée des intérêts au moment où est déterminée la mesure à appliquer. L'ampleur de cette dernière est essentiellement définie au regard de la protection contre les crues (point 3.5.4), laquelle ne doit jamais se trouver compromise par une mesure d'assainissement du régime de charriage. Le cas échéant, il convient donc de mettre en place des mesures complémentaires de protection contre les crues ou de réduire le débit de charriage. Lorsque les objectifs d'assainissement ne peuvent de ce fait pas être réalisés dans leur intégralité, on parle alors d'assainissement partiel (point 3.7).

1.4 Bases légales

Obligation d'éliminer les atteintes graves

Aux termes de l'art. 43a, al. 1, LEaux, les détenteurs d'installations sont tenus de prendre les mesures nécessaires pour éviter les atteintes graves dues à une modification du régime de charriage. On parle d'atteintes graves à la faune et à la flore indigènes et à leurs biotopes lorsque des installations telles que des centrales hydroélectriques, des sites d'extraction de gravier, des dépotoirs à alluvions ou des aménagements modifient durablement les structures morphologiques ou la dynamique morphologique des eaux (art. 42a OEaux). L'extraction de gravier à but commercial est quant à elle assujettie à la réglementation spéciale de l'art. 44 LEaux. L'obligation concerne aussi bien les détenteurs d'installations nouvelles que les détenteurs d'installations existantes.

Pour les cours d'eau subissant déjà de graves atteintes dues à un déséquilibre du régime de charriage, il est obligatoire que les installations soient assainies d'ici au 31 décembre 2030 (art. 83a LEaux). La définition des mesures doit tenir compte des intérêts mentionnés à l'art. 43a, al. 2, let. a à e, LEaux. Enfin, dans le bassin versant des eaux concernées, les mesures doivent être coordonnées après consultation des détenteurs des installations concernées (al. 3).

En outre, un principe général doit être appliqué, à savoir coordonner les projets de gestion des eaux (art. 46, al. 1, OEaux). Tous les détails utiles sont précisés dans le module intitulé Coordination des activités de gestion des eaux.

Étude sur le type et l'ampleur des mesures requises

Dans le cas d'installations pour lesquelles, selon la planification établie, des mesures d'assainissement du régime de charriage s'imposent, les cantons élaborent une étude sur le type et l'ampleur des mesures requises (art. 42c, al. 1, OEaux). Dans le cas des centrales hydroélectriques, les matériaux charriés doivent passer dans la mesure du possible à travers l'installation (art. 42c, al. 2, OEaux).

Suivi de l'efficacité

Une fois l'assainissement réalisé, le détenteur de la centrale hydroélectrique vérifie sur ordre de l'autorité compétente si les objectifs sont atteints en procédant au suivi de l'efficacité (art. 42c, al. 4, OEaux). Le détenteur communique les résultats à l'autorité compétente afin que celle-ci puisse, conformément aux art. 50 LEaux et 49, al. 2, OEaux, évaluer l'efficacité des mesures de protection des eaux réalisées, informer des résultats et, le cas échéant, ordonner des améliorations. Le suivi de l'efficacité est également nécessaire pour les installations nouvelles et les installations non liées à la force hydraulique, car les cantons sont tenus d'informer des mesures prises et de leur efficacité pour la protection des eaux (art. 49, al. 2, OEaux).

Rapport des cantons

Les cantons doivent présenter tous les quatre ans à la Confédération un rapport sur les mesures mises en œuvre (art. 83b, al. 3, LEaux).

Obligation de conserver intactes les zones alluviales d'importance nationale

Lors de l'assainissement du régime de charriage, il convient également de prendre en compte les dispositions du droit sur la protection de la nature, en particulier lorsque des zones alluviales d'importance nationale sont concernées. L'ordonnance sur les zones alluviales (RS 451.31) formule en tant que but de protection « la conservation et, pour autant que ce soit judicieux et faisable, le rétablissement de la dynamique naturelle du régime des eaux et du charriage », ainsi que « la conservation des particularités géomorphologiques des objets » (art. 4, al. 1, let. b et c).

Aux termes de l'art. 5, al. 1, de l'ordonnance sur les zones alluviales, les cantons sont tenus de prendre les mesures de protection et d'entretien qui s'imposent pour conserver les objets intacts. Ils veillent notamment à ce que les zones alluviales ayant un régime des eaux et de charriage intact ou peu altéré soient intégralement protégées, à ce que les exploitations existantes ou futures soient en accord avec le but visé par la protection, et à ce que le développement des espèces végétales et animales rares et menacées soit favorisé, de même que celui de leurs biocénoses (art. 5, al. 2, de l'ordonnance sur les zones alluviales). Enfin, conformément à l'art. 8 de la même ordonnance, les cantons veillent, chaque fois que l'occasion se présente, à ce que les atteintes portées aux objets, notamment à la dynamique naturelle du régime des eaux et du charriage, soient dans la mesure du possible réparées.

Il n'est admis de dérogation au but visé par la protection que pour les projets dont l'emplacement s'impose directement par leur destination et qui sont destinés à assurer la sécurité de l'homme face aux effets dommageables de l'eau ou qui servent un autre intérêt public prépondérant d'importance nationale également (art. 4, al. 2, de l'ordonnance sur les zones alluviales). Le caractère d'intérêt national des centrales hydroélectriques est défini dans l'art. 8 de l'ordonnance sur l'énergie (OEne ; RS 730.01) sur la base de seuils de production.

Les articles de loi déterminants pour planifier les mesures d'assainissement du régime de charriage figurent à l'annexe A.

2 Déroulement de l'assainissement

2.1 Déroulement de l'assainissement des centrales hydrauliques

L'assainissement du régime de charriage se déroule en cinq phases : 1) planification stratégique des cantons, 2) étude sur le type et l'ampleur des mesures et étude de projet, 3) demande d'indemnisation et mise en œuvre, 4) décompte et paiement, ainsi que 5) suivi des résultats.

La figure 3 donne un aperçu des différentes phases de l'assainissement des centrales hydrauliques et montre le rôle et les tâches des différents acteurs : détenteur de l'installation, cantons et Office fédéral de l'environnement (OFEV).

Pour les centrales hydrauliques sur eaux frontalières, l'autorité compétente est l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) et non le canton. L'OFEN coordonne les mesures avec les autorités du pays voisin.

Phase 1 Planification stratégique des cantons

Les cantons ont identifié, pour fin 2014, les tronçons de cours d'eau subissant des atteintes graves, ainsi que les installations à assainir. Les résultats ont été adoptés par le canton et publiés au titre de la planification cantonale. En 2015, l'OFEV a pris position sur toutes les planifications cantonales.

Phase 2 Étude sur le type et l'ampleur des mesures et étude de projet

Après la planification stratégique débute la phase de planification des mesures. La législation sur la protection des eaux utilise la notion « étude sur le type et l'ampleur des mesures » pour qualifier ces travaux. Cette étude a pour but de définir et de fixer des objectifs concrets pour les cours d'eau ainsi que les mesures qui permettront de les atteindre. Cette planification au stade de l'étude préliminaire (phase 2 du modèle de prestations SIA 112) est élaborée par les cantons dans la perspective du bassin versant concerné. Il est recommandé d'inclure les détenteurs des installations dans l'élaboration de l'étude. Si l'étude sur le type et l'ampleur montre qu'une installation

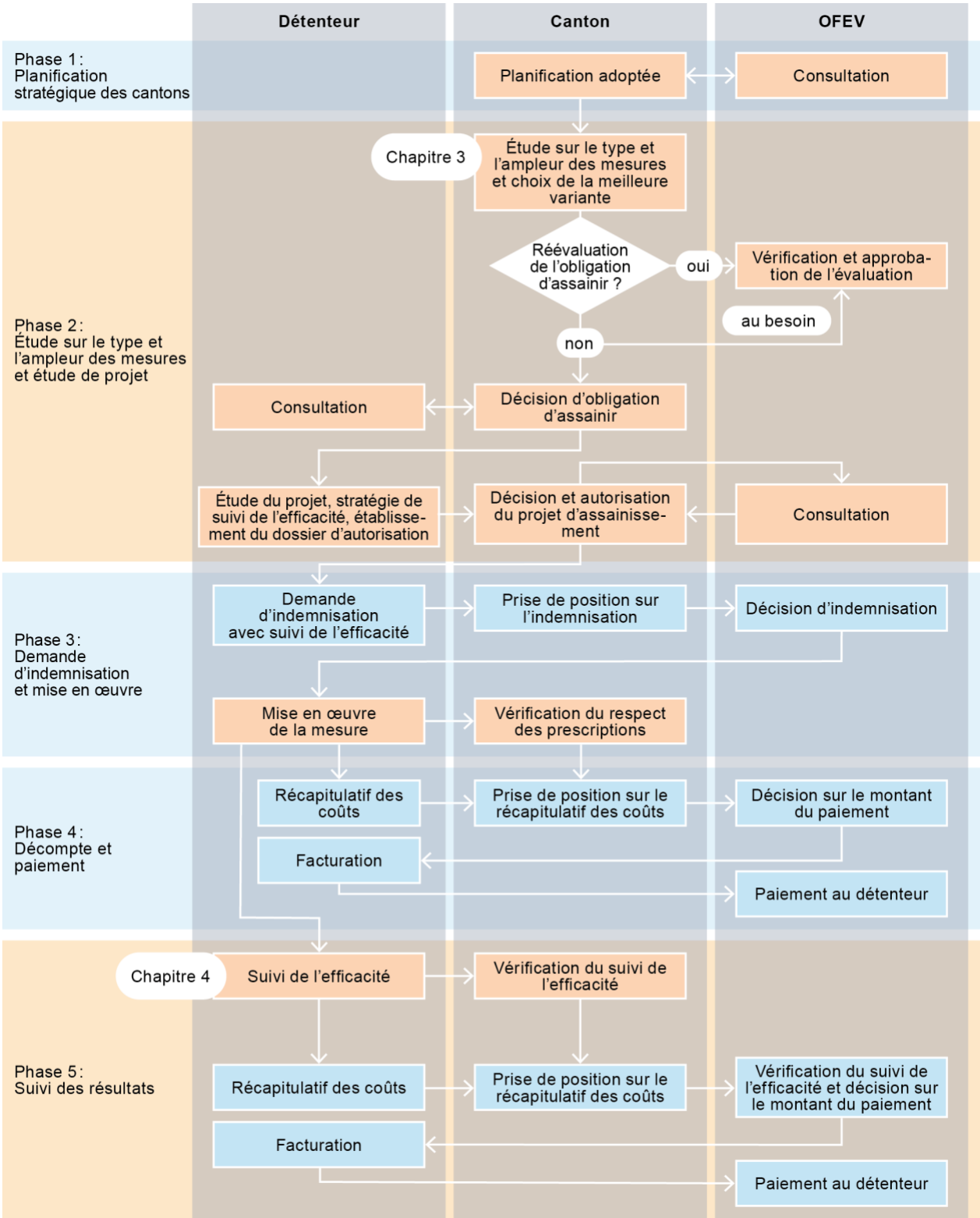
- a) ne porte pas d'atteinte grave ou
- b) ne saurait tolérer de mesure pour des raisons de proportionnalité, de protection contre les crues ou de politique énergétique,

cette installation peut, après examen par l'OFEV, être exemptée de l'obligation d'assainir, si bien que le canton ne doit plus prendre de décision en la matière. La procédure pour a) est décrite au paragraphe sur la réévaluation à la fin du point 2.1 et celle pour b), dans le document « Assainissement écologique de la force hydraulique : assainissement partiel »² de l'OFEV (cf. point 3.7, paragraphe sur l'assainissement partiel).

Après avoir entendu les détenteurs des installations, le canton ordonne par voie de décision l'obligation d'assainir ainsi que le type et l'ampleur des mesures en se fondant sur l'étude réalisée. Le détenteur de l'installation se charge de l'étude de projet des mesures ordonnées et établit le dossier en octroi d'autorisation. Après consultation de l'OFEV, le canton rend ensuite sa décision sur le projet d'assainissement.

2 https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/wasser/fachinfo-daten/oekologische-sanierung-wasserkraft-fragestellungen-zur-teilsanierung.pdf/download.pdf/%C3%96kologische_Sanierung_Wasserkraft_-_Fragestellungen_zur_Teilsanierung_-_Webversion.pdf

Fig. 3 : Phases de l'assainissement du régime de charriage des centrales hydrauliques
Les champs orange désignent la teneur des étapes de l'assainissement, les champs bleus, le financement des mesures.



Phase 3 Demande d'indemnisation et mise en œuvre

Lorsque le canton a rendu sa décision sur la mesure d'assainissement et que toutes les autorisations requises ont été obtenues, le détenteur d'une centrale hydraulique présente une demande d'indemnisation des coûts. Une fois que le canton a pris position, l'OFEV examine de son côté la requête. Il octroie l'indemnisation des coûts prévus au détenteur par voie de décision. Dès que l'OFEV a octroyé le financement, la mesure peut être mise en œuvre par le détenteur de l'installation (OFEV 2016, chap. 7).

Phase 4 Décompte et paiement

Lorsque des mesures d'assainissement sont réalisées en tout ou en partie, les détenteurs de centrales hydrauliques peuvent présenter un récapitulatif des coûts au canton. Ce dernier vérifie que les prescriptions propres au projet sont respectées et transmet ensuite le récapitulatif des coûts et sa prise de position à l'OFEV. L'OFEV vérifie à son tour le dossier, ajuste son évaluation avec le canton et décide du montant de l'indemnité effectivement accordée. C'est sur la base de cette décision que le détenteur de l'installation peut procéder à la facturation (OFEV 2016, chap. 7).

Phase 5 Suivi des résultats

Le suivi des résultats comprend d'une part le suivi de la mise en œuvre et d'autre part le suivi de l'efficacité.

Le suivi de la mise en œuvre doit prouver que les mesures décidées ont été appliquées conformément aux prescriptions et conditions imposées. Le canton contrôle si les mesures décidées ont été mises en œuvre correctement et dans les délais impartis. La mise en œuvre est contrôlée une seule fois dans les cas simples (p. ex. suppression d'un dépotoir à alluvions) et inclut la vérification de la mesure d'assainissement ordonnée. Dans le cas de mesures récurrentes (p. ex. déversement périodique de gravier), l'exécution est vérifiée après chaque réalisation. Les cantons cosignent, à compter de 2018, la mise en œuvre dans un rapport remis tous les quatre ans à l'OFEV (art. 83b, al. 3, LEaux).

En outre, les détenteurs d'installation contrôlent l'efficacité des mesures qu'ils ont mises en œuvre et présentent un rapport au canton. Celui-ci évalue l'efficacité en fonction des objectifs indiqués dans l'étude sur le type et l'ampleur des mesures et ordonne au besoin une amélioration de la mesure. Les coûts du suivi de l'efficacité peuvent également être indemnisés en vertu de l'art. 34 de la loi sur l'énergie (LEne ; RS 730.0). Les procédures à suivre pour le décompte et le paiement de ce suivi sont les mêmes que pour le décompte des mesures (cf. phase 4). La teneur du suivi de l'efficacité est exposée au chapitre 4 du présent module.

Réévaluation ultérieure de l'atteinte grave et de l'obligation d'assainir

Il est en principe possible de réévaluer l'atteinte grave et l'obligation d'assainir en ce qui concerne des installations individuelles ayant déjà fait l'objet d'une planification stratégique cantonale. Toutefois, des raisons matérielles doivent être invoquées pour motiver toute réévaluation différant de la planification stratégique (p. ex. nouvelles conclusions tirées de l'étude sur le type et l'ampleur des mesures). La procédure de réévaluation se déroule en trois étapes : 1) transmission par le canton de la réévaluation avec justification écrite des motifs à l'OFEV, 2) évaluation de l'OFEV appuyant l'avis du canton et 3) transmission de l'OFEV au canton de la confirmation écrite de la réévaluation (une procédure analogue à celle des prises de position de l'OFEV vis-à-vis des rapports finaux cantonaux est appliquée ici aux installations individuelles).

2.2 Déroulement de l'assainissement des installations non liées à la force hydraulique

L'assainissement des installations non liées à la force hydraulique (fig. 4) se déroule de la même manière que celui des installations des centrales hydrauliques, à quelques particularités près exposées ci-dessous :

Consultation sur des projets d'assainissement (Phase 2)

L'OFEV n'est consulté avant la décision d'assainissement que lorsque l'assainissement est mis en œuvre et financé dans le cadre d'un projet individuel³ de protection contre les crues ou de revitalisation.

Financement (Phases 3, 4, 5)

Les coûts des mesures d'assainissement d'installations non liées à la force hydraulique ne peuvent pas être indemnisés en vertu de l'art. 34 LEn par le fonds alimenté par le supplément perçu sur le réseau (art. 35, al. 2, let. h, LEn). Des mesures constructives uniques, comme la transformation ou le démantèlement de l'installation, sont toutefois considérées comme une revitalisation et ouvrent donc droit à des subventions si elles permettent de rétablir les fonctions naturelles d'un cours d'eau subissant les atteintes de l'installation en question. Cependant, les subventions sont allouées uniquement pour le démantèlement d'une installation auquel aucun détenteur n'est tenu de procéder (art. 62b, al. 4, LEaux), ou pour les transformations ou démantèlements non destinés à la protection contre les crues (ouvrage ayant besoin d'être conforté p. ex.). La procédure en cas de subventionnement suit les mêmes règles que les projets de revitalisation, comme fixé dans le Manuel sur les conventions-programmes conclues dans le domaine de l'environnement (OFEV 2018, Partie 11). Si l'installation est transformée ou démantelée au motif de la protection contre les crues, l'indemnisation éventuelle s'inscrit dans le cadre du programme Ouvrages de protection. La procédure suit les mêmes règles que les projets de protection contre les crues, comme fixé dans le Manuel sur les conventions-programmes conclues dans le domaine de l'environnement (OFEV 2018, Partie 6). Les mesures d'exploitation et les mesures d'extraction de gravier ne sont pas subventionnées.

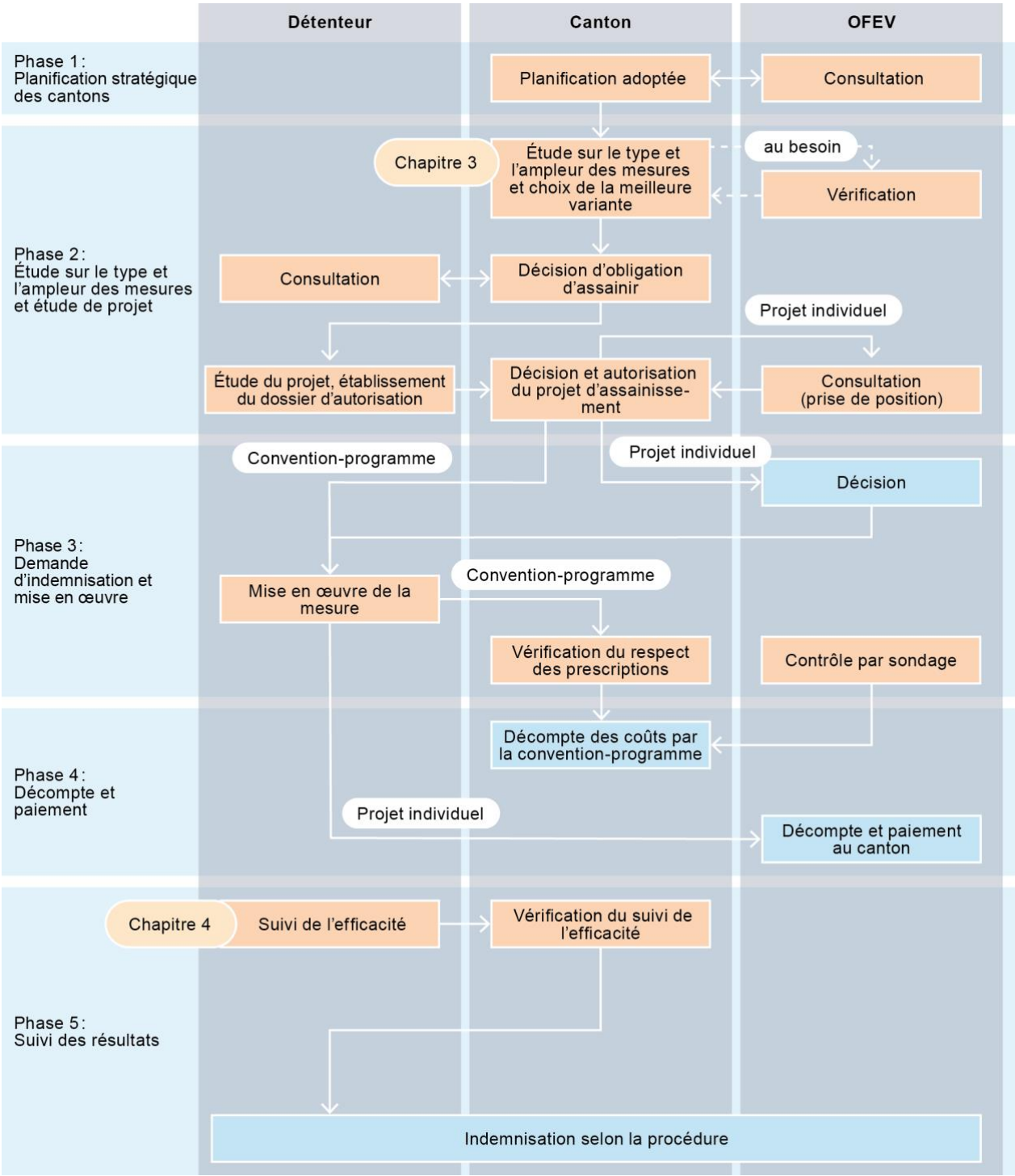
³ Projet individuel au sens du Manuel sur les conventions-programmes conclues dans le domaine de l'environnement (OFEV 2018).

2.3 Principes de base en cas de construction de nouvelles installations ou d'agrandissement d'installations existantes

Les nouvelles installations (au nombre desquelles comptent également les projets de protection contre les crues et les projets de revitalisation), les agrandissements d'installations et les nouvelles concessions sont soumis aux mêmes exigences en termes de régime de charriage que les installations existantes. Ainsi, les principes suivants s'appliquent :

- Toute atteinte grave qui résulterait d'une modification du régime de charriage doit être empêchée.
- La nouvelle installation doit en principe être conçue de manière à pouvoir être traversée par les matériaux charriés.
- En cas de projet de protection contre les crues, on ne peut prélever des matériaux charriés qu'à hauteur de ce qui est absolument nécessaire pour assurer une protection contre les crues. Un abaissement du lit générant une pente inférieure à la pente de la vallée est à éviter et n'est conforme à la loi que si le régime de charriage observé en aval ne subit pas d'atteintes graves.
- S'agissant des nouvelles installations ou des agrandissements d'installations, le détenteur doit démontrer quels effets l'installation aura sur le régime de charriage. Il est recommandé de suivre les étapes de l'étude sur le type et l'ampleur des mesures (chap. 3) dans le cadre de l'étude de projet, ou, s'agissant des centrales hydrauliques, dans le cadre de la procédure d'octroi de concession.
- S'agissant des nouvelles installations, le canton et l'OFEV sont impliqués lors de l'étude de projet et de la procédure d'octroi de concession.
- S'agissant de l'agrandissement d'une centrale hydraulique, seules sont indemnisées les mesures qui éliminent les atteintes graves existantes dues à un régime de charriage modifié.

Fig. 4 : Phases de l'assainissement du régime de charriage des installations non liées à la force hydraulique
Le financement des projets individuels et des projets selon les conventions-programmes est réglé dans le Manuel sur les conventions-programmes conclues dans le domaine de l'environnement.



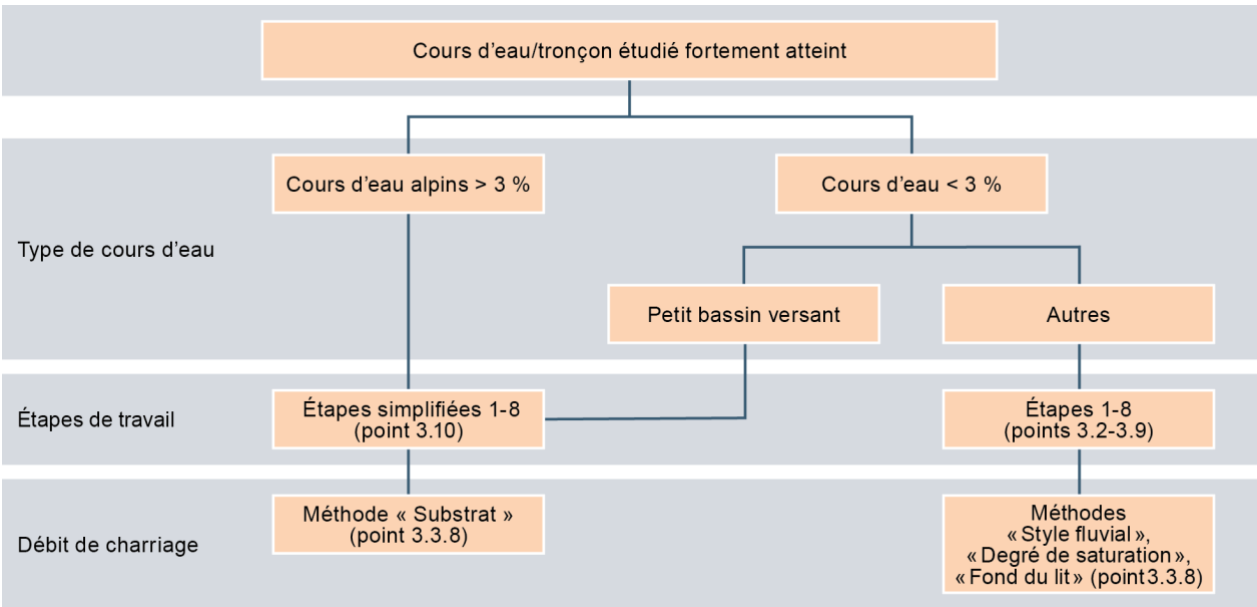
3 Étude sur le type et l'ampleur des mesures

3.1 Aperçu

3.1.1 Étapes de travail

Dans le cadre de l'étude sur le type et l'ampleur des mesures, il est judicieux d'adapter les étapes de travail en fonction du type de cours d'eau pour ce qui est de leur dimension et de la méthode appliquée afin de déterminer le débit de charriage nécessaire (fig. 5). S'agissant de cours d'eau à faible pente (< 3 %), il est recommandé de parcourir toutes les étapes de travail et d'appliquer toutes les méthodes proposées aux points 3.2 à 3.9. Dans les cours d'eau alpins à forte pente et dans les situations où les travaux relatifs à l'étude sur le type et l'ampleur des mesures s'avèrent disproportionnés par rapport aux mesures possibles (p. ex. du fait de la moindre taille du cours d'eau concerné), il est possible d'opter pour une planification et une mise en œuvre simplifiées. Les étapes de la marche à suivre simplifiée sont décrites au point 3.10).

Fig. 5 : Étapes de travail et méthodes recommandées, selon le type de cours d'eau



L'étude a pour objectif de déterminer le type et l'ampleur des mesures pour toutes les installations concernées dans un bassin versant. Ces données permettent au canton de décider si les détenteurs des installations ont l'obligation d'assainir et d'ordonner l'étude de projet pour le type de mesures fixées et dans l'ampleur déterminée (cf. annexe C).

L'étude sur le type et l'ampleur des mesures comprend huit étapes (fig. 6) lors desquelles sont notamment définis la morphologie et le débit de charriage des eaux dans l'état actuel, dans l'état proche de l'état naturel et dans l'état cible (fig 7).

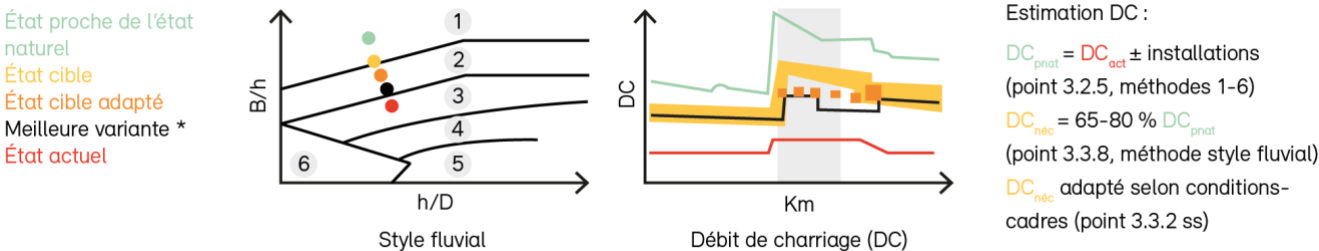
Fig. 6 : Étapes de l'étude sur le type et l'ampleur des mesures

Flèche entre l'étape 6 et l'étape 3 : si aucune mesure proportionnée ne peut être trouvée pour qu'une installation puisse atteindre l'objectif d'assainissement, il convient de revoir l'objectif d'assainissement de l'installation.

Étapes	Périmètre	Point
Analyse de la situation		
1) Analyser l'état actuel et l'état proche de l'état naturel du cours d'eau	Bassin versant Cours d'eau cibles Installations	3.2
Définition des objectifs		
2) Définir des objectifs morphologiques pour le cours d'eau et le débit de charriage nécessaire	Cours d'eau cibles	3.3
3) Définir des objectifs d'assainissement pour les installations	Installations	3.4
Définition des mesures		
4) Élaborer un catalogue de mesures	Installations	3.5
5) Élaborer et apprécier des variantes de mesures	Installations	3.6
6) Choisir la meilleure variante	Installations	3.7
7) Coordonner les mesures de protection des eaux	Bassin versant	3.8
Mise en œuvre		
8) Définir la stratégie du suivi de l'efficacité	Cours d'eau cibles Installations	3.9

Fig. 7 : Illustration des résultats des étapes de travail

Les résultats peuvent être présentés pour chaque état sur la base du style fluvial du tronçon et du débit de charriage (DC) le long du cours d'eau (= diagramme de transport des matériaux charriés). Le style fluvial est déterminé ici en fonction des paramètres de largeur B , de profondeur d'écoulement h et de granulométrie D (d'après Ahmari et da Silva, 2011). La numérotation utilisée ici fait référence aux styles fluviaux présentés à la figure 8. Le DC est estimé pour différents états : état proche de l'état naturel DC_{pnat} , état actuel DC_{act} et état nécessaire DC_{nec} .



* En principe, des variantes sont élaborées pour atteindre l'état cible et le DC_{nec} . Il est possible de réduire l'état cible et le DC, dès lors que la protection contre les crues pourrait être menacée ou que la variante élaborée s'avérerait non proportionnée.

Analyse de la situation

Étape 1 : La situation dans le système hydrographique doit être connue, car elle est la base de toutes les étapes de la planification. Il s'agit de réaliser une description de la morphologie et du régime de charriage des eaux dans l'état actuel et dans l'état proche de l'état naturel – l'accent étant mis sur les cours d'eau cibles désignés dans la planification stratégique – ainsi que de procéder à une analyse quantitative de l'impact des installations sur la morphologie et sur le régime de charriage. L'étape 1 consiste donc à préparer les bases dans la mesure où elles n'ont pas déjà été élaborées dans le cadre de la planification stratégique.

Définition des objectifs

Étape 2 : Les mesures d'assainissement doivent s'aligner sur les objectifs définis pour le cours d'eau et l'installation. Ces objectifs sont formulés de manière générale au paragraphe 3.3.2. L'étape 2 permet de les quantifier pour le cours d'eau en question et de déterminer le débit de charriage nécessaire pour que les structures morphologiques typiques et une dynamique puissent se former lorsque la largeur du lit n'est pas réduite et qu'il ne soit pas porté atteinte au régime des eaux souterraines ni à la protection contre les crues.

Étape 3 : Le débit de charriage nécessaire et les déficits existants permettent de définir un objectif d'assainissement pour les différentes installations situées dans le bassin versant.

Définition des mesures

Étape 4 : Les mesures les mieux adaptées pour l'assainissement du régime de charriage sont ensuite déterminées sur la base d'un catalogue de mesures.

Étape 5 : Dans la plupart des cas, il est nécessaire d'élaborer différentes variantes et de les évaluer. Il est très important à ce stade de considérer dans leur ensemble les installations situées sur un cours d'eau et au sein de son bassin versant et de coordonner les mesures applicables aux différentes installations.

Étape 6 : La meilleure variante à mettre en œuvre peut ensuite être sélectionnée parmi les variantes proposées.

Étape 7 : La meilleure variante doit être coordonnée avec les autres mesures de protection des eaux, en particulier avec les revitalisations. Selon les circonstances, il peut arriver que l'objectif d'assainissement d'une installation ne puisse être atteint au moyen de mesures proportionnées. Il faut alors revoir l'objectif d'assainissement pour l'installation (étape 3), et élaborer et évaluer de nouvelles variantes (flèche de la fig. 6).

Étape 8 : La dernière étape doit permettre d'élaborer une stratégie de suivi de l'efficacité.

3.1.2 Pesée des intérêts et prise en compte de la protection contre les crues

L'assainissement du régime de charriage exige de procéder à une pesée des intérêts. Sur le plan formel, l'objectif d'assainissement est certes indépendant de toute considération d'intérêts (art. 43a, al. 1, LEaux). La pesée des intérêts fait néanmoins partie intégrante du processus de définition des mesures (étapes 4 à 7), en cela que l'ampleur de la mesure s'appuie aussi sur différents facteurs tels que la protection contre les crues, les objectifs de politique énergétique et la proportionnalité des coûts (art. 43a, al. 2, LEaux) (cf. point 3.6).

La protection contre les crues doit être prise en compte à deux titres : les objectifs doivent tout d'abord être définis de manière à ce que le charriage soit suffisamment élevé pour éviter qu'une érosion du lit compromette la protection contre les crues (étape 2) ; les mesures doivent ensuite être planifiées de façon à empêcher les atterrissements portant atteinte à la protection contre les crues (étape 5, point 3.5.4). Ce dernier aspect implique

d'intégrer dans la planification les mesures complémentaires nécessaires au titre de la protection contre les crues et d'inclure dans l'évaluation des mesures et le choix de la meilleure variante les effets négatifs que celles-ci pourraient éventuellement exercer vis-à-vis de la protection contre les crues.

3.1.3 Synergies avec des études déjà menées

Reprise des résultats de la planification stratégique

S'il existe déjà des résultats – issus par exemple de la planification stratégique des cantons ou des études déjà menées sur le régime de charriage – dont le niveau de détail correspond à celui d'une étude préliminaire pour quelques étapes (fig. 6) de l'étude sur le type et l'ampleur des mesures, il est possible de les utiliser pour décider de l'obligation d'assainir, sans avoir à les produire à nouveau. Pour les installations pour lesquelles toutes les étapes de l'étude ont déjà été menées ou ne s'avèrent pas toutes utiles, parce qu'il n'existe qu'une seule mesure réalisable et aucun besoin de coordination, la mesure issue de la planification stratégique peut faire directement l'objet d'une décision.

3.1.4 Étude des variantes dans le cadre de l'étude de projet

Il est parfois pertinent d'élaborer les étapes de définition des mesures (étude des variantes avec choix de la meilleure variante) au niveau de l'étude de projet. Cette démarche est appropriée lorsqu'au regard de la planification des mesures, le choix de la variante requiert un degré de détails qu'une étude préliminaire ne saurait fournir. Les mesures mises en œuvre dans le bassin versant doivent alors être coordonnées au niveau du projet. Si l'étude des variantes est reportée au stade du projet, le canton doit l'ordonner dans la décision d'assainissement à l'attention du détenteur de l'installation (cf. teneur d'une décision d'assainissement à l'annexe B). En pareil cas, le choix de la variante et les décisions y afférentes relèvent néanmoins toujours du canton.

3.2 Étape 1 : Analyser de manière approfondie l'état actuel et l'état proche de l'état naturel du cours d'eau

3.2.1 Introduction

Objectifs et résultats escomptés

Cette étape de travail doit permettre de connaître la morphologie et le régime de charriage des eaux dans l'état actuel et en situation dans l'état proche de l'état naturel et de comparer la situation actuelle à un état proche de l'état naturel, de sorte à pouvoir identifier les déficits dans le débit de charriage.

Voici les résultats escomptés de cette étape :

- une description de la morphologie et de la dynamique du cours d'eau dans l'état actuel et dans l'état proche de l'état naturel ;
- une liste des installations qui influencent le débit de charriage (en raison desquelles le débit de l'état actuel n'équivaut plus à un débit proche de l'état naturel), avec indication du degré de réduction du débit de charriage imputable aux installations ;
- le profil longitudinal du débit de charriage dans l'état actuel et dans l'état proche de l'état naturel ;
- une description du déficit que présente le débit de charriage de l'état actuel par rapport au débit de charriage proche de l'état naturel.

3.2.2 Définition de l'état naturel, de l'état proche de l'état naturel, de l'état cible, de l'état actuel et du déficit

État naturel

L'état naturel correspond à l'état du cours d'eau sans intervention anthropique. La largeur du lit, le style fluvial et le tracé du cours d'eau à l'état naturel sont approximativement ceux qui figurent sur les cartes historiques ou sur d'autres documents (p. ex. photos). À l'état naturel, le régime de charriage ne subit aucune influence anthropique.

État proche de l'état naturel

L'état proche de l'état naturel correspond à la situation où la morphologie, la largeur, le régime d'écoulement et le régime de charriage du cours d'eau sont certes influencés par les conditions climatiques actuelles, mais où ni le cours d'eau ni les zones à proximité immédiate de celui-ci ne sont exploités. Cet état se distingue de l'état naturel uniquement par le fait qu'il inclut des modifications anthropiques telles que les déboisements à grande échelle, les assèchements de zones humides et les détournements de cours d'eau dans un lac.

L'état proche de l'état naturel sert avant tout de ligne directrice pour appréhender les notions de morphologie et de dynamique proches de l'état naturel et illustrer ce que serait le développement du cours d'eau sans influences négatives liées à l'exploitation de celui-ci ou de ses abords. La comparaison entre l'état proche de l'état naturel et l'état actuel met en évidence le déficit, qu'il s'agit de combler, au moins en partie, à l'aide de mesures appropriées. L'état proche de l'état naturel permet de distinguer les atteintes graves et modérées portées au cours d'eau et constitue le point de départ pour concevoir des mesures en matière de charriage.

État cible

L'état cible correspond à la situation où un cours d'eau ne subit pas d'atteinte et le débit de charriage sont axés sur l'état proche de l'état naturel et lui correspondent au mieux. Toutefois, l'objectif de l'assainissement est non pas d'atteindre impérativement l'état proche de l'état naturel, mais d'éliminer les modifications importantes par rapport à cet état.

Si le fond du lit a fait l'objet d'aménagements et a ainsi vu sa largeur réduite, ou si le régime d'écoulement ou les apports de matériaux charriés ont été modifiés, des mesures de charriage ne suffiront pas à rétablir une morphologie et une dynamique proches de l'état naturel. Dans ce cas de figure, les objectifs en matière de morphologie peuvent être adaptés (points 3.3.2 ss).

L'ampleur effective des mesures de charriage est également fonction de la gravité des atteintes portées au cours d'eau, du potentiel écologique de ce dernier, de la proportionnalité des coûts, des objectifs de la protection contre les crues et des objectifs de politique énergétique en matière de promotion des énergies renouvelables (point 3.6). Le point 3.3 décrit de manière détaillée les bases sur lesquelles définir les objectifs pour différentes situations de cours d'eau.

État actuel

L'état actuel correspond à l'état présent du cours d'eau avec toutes les installations ainsi que les corrections et les aménagements. Dans l'état actuel, le régime de charriage est éventuellement modifié par des centrales hydrauliques, des dépotoirs à alluvions, des aménagements, des sites d'extraction de gravier et autres installations.

Déficit

Le déficit correspond à la différence entre l'état actuel et l'état proche de l'état naturel. Il s'agit essentiellement de déficits de morphologie et de débit de charriage.

3.2.3 Caractérisation de la morphologie

Caractéristiques morphologiques

La morphologie d'un cours d'eau présente plusieurs caractéristiques typiques : le style fluvial, la présence et l'étendue des dépôts de matériaux charriés, notamment des bancs de gravier, et le substrat. Les autres éléments pris en compte sont la largeur du cours d'eau et sa pente longitudinale.

Style fluvial

Le style fluvial correspond à la configuration du cours d'eau telle que vue du ciel. En référence à la classification des styles fluviaux opérée par Leopold et Wolman (1959) et Ahmari et da Silva (2011), on distingue en Suisse six styles fluviaux (fig. 8) :

(1) *Lit ramifié avec plus de deux chenaux* : par débit moyen, le cours d'eau se divise en plusieurs bras entre lesquels se trouvent des bancs de gravier sans arbres ni arbustes. Les bancs de gravier sont inondés en cas de crue et leur emplacement change à chaque épisode de crue. Le lit est large et la profondeur d'écoulement moyenne est relativement faible même en cas de crue.

(2) *Lit ramifié avec deux chenaux* : très semblable au modèle décrit ci-dessus (1). La différence réside dans le nombre des chenaux. Le lit est un peu moins large que le lit ramifié avec plus de deux chenaux.

(3) *Lit sinueux avec îlots et bancs* : le cours d'eau compte un ou plusieurs chenaux, séparés les uns des autres par des îlots boisés. Ces derniers ne sont déplacés que lors des grandes crues par la migration des chenaux. Les bancs de gravier suivent les îlots et se forment le long de leurs berges.

(4) *Lit sinueux avec bancs* : les bancs se forment dans les zones à faible courant le long des berges ou dans des élargissements locaux. Ils sont inondés en cas de crue et ne sont, à quelques exceptions près, pas boisés. Cette forme de lit peut aussi être désignée comme un lit en méandres avec charriage.

(5) *Lit en méandres sans charriage* : les hautes eaux et les basses eaux coulent dans le même lit. Le fond du lit est fait de sable.

(6) *Lit sinueux ou linéaire* : le style fluvial des lits à forte pente (plus de 3 %) est défini par la géologie et la topographie et non par le débit de charriage.

Le style fluvial proche de l'état naturel peut avoir varié en fonction de l'histoire des crues. Il existe de nombreuses cartes historiques datant de différentes années⁴, des vues aériennes ou des plans des premières corrections de cours d'eau qui permettent de déterminer le style fluvial proche de l'état naturel. Parfois une ancienne forme de lit peut être retrouvée à partir des traces laissées sur le terrain, qui peuvent être observées aujourd'hui encore grâce à des modèles numériques de terrain à haute résolution, ou à partir d'un tronçon existant proche de l'état naturel. Les mêmes documents permettent de déterminer la largeur du cours d'eau sans boisement. Les formes de lit dans l'état actuel peuvent être déterminées à partir de cartes actuelles et de vues aériennes, ou encore lors d'une visite sur le terrain, et éventuellement être vérifiées au moyen de critères de délimitation (p. ex. Ahmari et da Silva 2011, cf. annexe E).

⁴ P. ex. pour le Rhin alpin Suisse/Autriche : cartes Römer et Duile ; pour l'Argovie : carte Michaelis ; pour la Suisse : cartes Siegfried

Fig. 8 : Styles fluviaux*Exemples tirés de cartes historiques et de vues aériennes.*

1 Lit ramifié avec plus de 2 chenaux . 		Carte : Rhin postérieur près de Rhäzuns Photos : Rhône près de Loèche ; Singine près de Planfayon
2 Lit ramifié avec 2 chenaux 		Carte : Rhin alpin près de Kriessern Photos : Schwarzwasser près de Rüschegg ; Gérine près de Chevrières
3 Lit sinueux avec îlots et bancs 		Carte : Limmat près de Dietikon Photos : Moesa près de Soazza ; Rhin antérieur près de Disla
4 Lit sinueux avec bancs 		Carte : Aar près de Wynau Photos : Singine près de Rougemont ; Töss près de Dättikon
5 Lit en méandres sans charriage 		Carte : Aar près de Granges Photos : Aar près de Granges ; Biber près de Rothenthurm
6 Lit sinueux ou linéaire 		Carte : Chirel dans le Diemtigtal Photos : Schmadri Lütschine près de Stechelberg ; Verzasca près de Sonogno

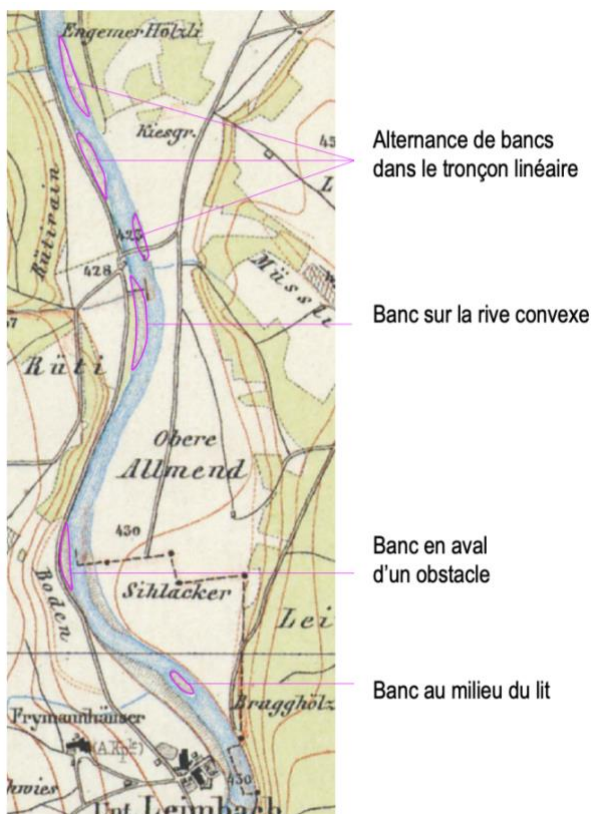
Dépôts de matériaux charriés

Quelle que soit la forme du lit, des matériaux charriés se déposent dans les zones à faible courant du fond du lit. Le gravier peut se déposer en couche ou sous forme de bancs. Les dépôts de matériaux charriés, et en particulier les bancs de gravier, peuvent émerger par eaux basses ou moyennes. Voici les types de dépôt rencontrés en fonction de leur emplacement et de leur disposition (fig. 9) :

- dépôt sur la rive convexe dans une courbure (banc stationnaire ; peu mobile en cas de migration du cours d'eau),
- dépôt en îlot dans un élargissement ou dans une ramification (banc stationnaire ou mobile),
- dépôts alternés sur les rives dans des tronçons linéaires (banc stationnaire ou mobile),
- dépôts derrière des obstacles (banc stationnaire),
- dépôts dans le talweg d'un chenal (en cas de débits de crue modérés).

Fig. 9 : Différentes structures de bancs de gravier dans la Sihl près de Zurich

Direction d'écoulement du sud au nord. Carte Wild 1843-51. Échelle 1:15 000.



Largeur

La largeur est une caractéristique morphologique essentielle des cours d'eau. Elle varie en fonction du régime d'écoulement, du débit de charriage, de la granulométrie et des propriétés géologiques. Rapportée à la profondeur d'écoulement, la largeur des lits ramifiés est souvent beaucoup plus importante que celle des lits sinueux ou linéaires. Les zones de transition entre le fond du lit, le talus, la forêt alluviale à bois tendre et la forêt alluviale à bois dur présentent souvent des limites assez floues, de telle sorte que, selon l'usage que l'on en a, la largeur du cours d'eau peut être définie de diverses façons. Dans les analyses établissant une comparaison morphologique des cours d'eau, on utilise souvent la largeur du plan d'eau en débit à pleins bords (p. ex. HQ_2), laquelle est également appelée « largeur de plein-bord » ou « largeur du lit ». D'autres désignations, telles que « largeur naturelle du lit », sont également employées pour définir l'espace réservé aux eaux (DTAP et al. 2019, OFEV 2023).

La largeur proche de l'état naturel peut, selon le cas de figure et les bases disponibles, être retrouvée à partir de cartes historiques, de plans de correction, de vues aériennes et de tronçons de référence. Dans ces documents, la zone mouillée correspond souvent à des conditions de débit moyen. D'autres débits peuvent néanmoins aussi y être représentés.

La largeur varie parfois très fortement en direction du courant et selon l'histoire des crues. En règle générale, c'est une valeur moyenne, prise sur un tronçon de morphologie uniforme, qui est considérée comme pertinente. La comparaison de cartes historiques et de vues aériennes permet de repérer les différences liées à l'évolution des débits et aux interventions anthropiques.

En l'absence de documentation adéquate, la largeur peut être estimée par des méthodes empiriques et des formules approximatives (p. ex. Parker 1979). Il convient alors de tenir compte du style fluvial proche de l'état naturel.

La largeur dans l'état actuel peut être mesurée sur le terrain à partir de profils transversaux ou de vues aériennes.

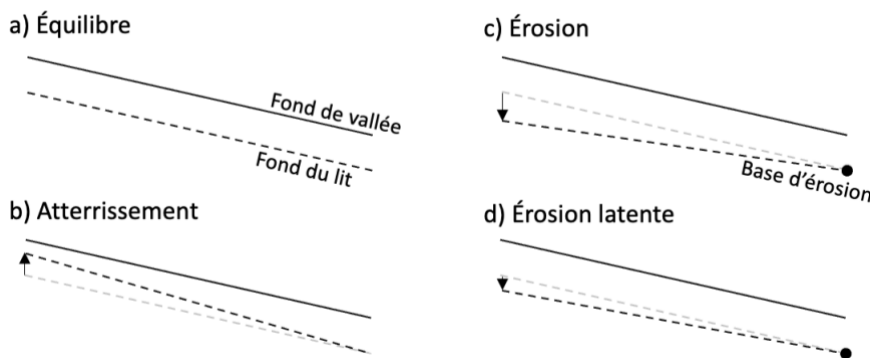
Pente longitudinale

La pente longitudinale proche de l'état naturel peut être déterminée au moyen de cartes historiques avec courbes de niveau (p. ex. la carte Siegfried ou la carte Wild) ou à partir de la pente de la vallée. La pente longitudinale dans l'état actuel est calculée à partir des relevés de profils en travers, des cartes topographiques ou d'un modèle numérique du terrain.

La pente longitudinale et la pente de la vallée se différencient comme suit en cas d'érosion ou d'atterrissement (cf. fig. 10).

- Équilibre : pente longitudinale = pente de la vallée.
- Atterrissement : la pente longitudinale est généralement supérieure à celle de la vallée. Il existe des digues le long du cours d'eau. En cas de crues, une augmentation significative de la pente longitudinale par rapport à celle de la vallée est empêchée par le déplacement du lit et les épandages.
- Érosion : en règle générale, la pente longitudinale est inférieure à celle de la vallée.
- Érosion sous-jacente⁵ : la pente longitudinale est souvent inférieure à celle de la vallée. La plupart du temps, le fond du lit s'enfoncé par rapport à la zone de plaine de la vallée située latéralement.

Fig. 10 : Pente longitudinale du fond du lit et pente de la vallée selon différents cas de figure



Substrat

Le substrat se caractérise par les différents types de substrats présents à la surface et par le degré du colmatage interne (fig. 11). Le colmatage interne est causé par l'infiltration de matières en suspension et peut être diminué par la mobilisation du fond du lit (décolmatage). Le procédé employé pour évaluer les caractéristiques du substrat est décrit à l'annexe H.

Pour évaluer le colmatage, il convient de prendre en compte les conditions géologiques et glaciologiques ainsi que l'histoire des crues. Dans les cours d'eau à turbidité naturellement élevée (p. ex. bassins versants avec flysch, marnes, ardoises et zones glaciaires), le fond du lit se colmate généralement plus vite. Dans un cours d'eau où aucune crue n'est venue mobiliser le fond du lit depuis longtemps, on peut également partir du principe que le colmatage sera plus important.

Pour déterminer le substrat proche de l'état naturel, on suppose que, dans les lits ramifiés, les dépôts de matériaux charriés dominant sur le fond du lit (types de substrats 2 et 3 dominants, fig. 11) ou que tous les types de substrats sont également représentés et que le fond du lit est comparativement peu colmaté ; que dans les lits sinueux, ce sont surtout les matériaux charriés qui se déposent le long des berges convexes (types de substrats 2 et 3, fig. 11) ; et que dans le talweg, on trouve principalement des matériaux du fond du lit mêlés à des matériaux charriés ou un lit pavé (types de substrats 4 et 5 dominants, fig. 11) avec un degré de colmatage au fond du lit comparativement faible à moyen (degré de colmatage 1 à 3 à la fig. 11). Les tronçons de référence non influencés par le déficit de charriage et ayant une pente et un débit comparables (p. ex. en amont des installations) peuvent fournir des indications sur le substrat proche de l'état naturel.

⁵ Dans un cours d'eau en état d'érosion sous-jacente, le débit de charriage est inférieur à la capacité de charriage. Le pavage empêche une incision du fond du lit.

Fig. 11 : À gauche : types de substrats. À droite : degrés de colmatage interne

Exemple de gauche : la Kander en aval du confluent avec la Simme. Les granulométries absolues des types de substrats sont spécifiques au cours d'eau. Les photos 2 à 5 ont à peu près la même échelle.



1 : Dépôts de matériaux en suspension :
sable, limon.



2 : Matériaux charriés fins :
particules fines des matériaux
charriés régulièrement.



3 : Matériaux charriés grossiers :
particules grossières des matériaux
charriés régulièrement.



**4 : Matériaux du fond du lit mêlés à des
matériaux charriés :**
particules des matériaux charriés déposées
entre les grains grossiers du fond du lit.



5 : Pavage :
dominance de grains grossiers du
fond du lit.



1 : Aucun colmatage :
sous la couche de pavage se trouvent
surtout du gravier et un peu de sable.



2 : Faible colmatage :
sous les grains de la couche de pavage se
trouvent très peu de dépôts de limon et
d'argile.



3 : Colmatage moyen :
environ un quart des pores sont remplis de
dépôts de limon et d'argile.



4 : Fort colmatage :
environ la moitié des pores sont remplis de
dépôts de limon et d'argile.



5 : Colmatage total :
les pores sont pratiquement partout remplis
de dépôts de limon et d'argile.

3.2.4 Caractérisation des cours d'eau d'après le régime de charriage

En matière de régime de charriage, on peut diviser les tronçons de cours d'eau en quatre types de zones (tab. 1) :

- zones d'atterrissement ;
- zones d'équilibre (également appelées zones de déplacement de matériaux) ;
- zones d'érosion sous-jacente ;
- zones d'érosion.

Les zones d'atterrissement apparaissent surtout en amont de l'embouchure des cours d'eau dans un lac (p. ex. Rhin alpin) ou de marais et zones humides (p. ex. vieille Aar, Minster). Le degré de saturation⁶ est supérieur à 1. Dans les zones d'atterrissement, les matériaux transportés sur le fond du lit et ceux qui constituent le fond du lit présentent des distributions granulométriques identiques.

Dans les zones d'équilibre, l'apport de matériaux charriés équivaut à la capacité de charriage et le degré de saturation est de 1. Il s'agit souvent de zones d'atterrissement postglaciaires où le processus d'atterrissement est achevé depuis longtemps. Dans les zones d'équilibre, les matériaux transportés et ceux qui constituent le fond du lit présentent des distributions granulométriques identiques.

De nombreux cours d'eau suisses sont soumis à une érosion sous-jacente. L'apport de matériaux charriés est alors inférieur à la capacité de charriage (degré de saturation inférieur à 1). Les matériaux relativement grossiers du fond du lit constituent une couche pavée stable qui empêche l'érosion. Cette couche se forme lors de débits de crue générant proportionnellement peu de charriage, lorsque seuls les matériaux les plus fins sont enlevés du fond du lit. Le fond du lit sera uniquement dépavé en présence de débits de crue importants, les débits de crue plus faibles ne déplaçant que les matériaux plus fins que ceux du fond du lit.

Dans les zones d'érosion, l'apport de matériaux charriés est inférieur à la capacité de charriage (degré de saturation inférieur à 1). Le débit comble le déficit de charriage du fond du lit, qui a alors tendance à s'inciser. Les zones d'érosion apparaissent surtout dans les parties supérieures des bassins versants. Les matériaux transportés et ceux qui constituent le fond du lit présentent des distributions granulométriques identiques.

Fig. 12 : Composition des matériaux du fond du lit et des matériaux charriés

À gauche : fond du lit plus grossier que les matériaux charriés, exemple Brenno ; à droite : matériaux du fond du lit et matériaux charriés identiques, exemple Rhin alpin. Photos Flussbau AG SAH.



⁶ Le degré de saturation (également appelé charriage relatif) désigne le rapport entre le débit de charriage et la capacité de charriage.

Tab. 1 : Caractérisation des cours d'eau d'après le régime de charriage

Cours d'eau/degré de saturation	Processus	Distribution granulométrique des matériaux charriés/du fond du lit	Exemples d'état naturel
Zone d'atterrissement/degré de saturation > 1	Cours d'eau tendant à l'atterrissement à long terme. Le fond du lit s'élève parallèlement ou la pente longitudinale s'accroît.	Granulométrie des matériaux charriés = granulométrie du fond du lit	Cours d'eau se jetant dans un lac : Rhin alpin en aval de Coire, Reuss uranaise en aval d'Erstfeld, Tessin dans la plaine de Magadino ; cours d'eau se jetant dans des lacs atterrés ou des zones humides : Wyna en amont de Zetzwil, Aar entre Aarberg et Büren ; Rhône dans la plaine du Rhône ; quelques zones alluviales alpines : Borgne d'Arolla
Zone d'équilibre/degré de saturation = 1	Cours d'eau avec point fixe en aval. Le niveau fond du lit varie autour d'une valeur moyenne et s'équilibre à long terme. Contrairement aux zones d'atterrissement, le niveau et l'emplacement du point fixe ne changent pas avec les dépôts.	Granulométrie des matériaux charriés ≤ granulométrie du fond du lit	Aar avant Brugg, Limmat avant Oetwil, Reuss avant Bremgarten, Brenno dans les zones alluviales près de Marogno et Loderio.
Zone d'érosion sous-jacente/degré de saturation < 1	Cours d'eau où le débit de charriage est inférieur à la capacité de charriage, mais où, grâce au pavage en matériaux grossiers, une érosion ne se produit qu'en cas de fortes crues.	Granulométrie des matériaux charriés < granulométrie du fond du lit	Sihl entre Schindellegi et Adliswil, Doubs dans son cours en Suisse, Reuss uranaise entre Göschenen et Amsteg.
Zone d'érosion/degré de saturation < 1	Cours d'eau à érosion progressive lors des débits de crue.	Granulométrie des matériaux charriés ≤ granulométrie du fond du lit	Un grand nombre de cours d'eau dans leur cours supérieur, en particulier les torrents.

3.2.5 Quantifier le débit de charriage

Importance des évaluations de débit de charriage

Les débits de charriage dans l'état actuel et dans l'état proche de l'état naturel constituent les grandeurs les plus importantes pour planifier des mesures de charriage et donc garantir la protection contre les crues et l'atteinte d'objectifs écologiques.

Approches possibles pour quantifier le débit de charriage

La moyenne annuelle du débit de charriage est utilisée pour définir le débit de charriage caractéristique de la morphologie du cours d'eau.

Les débits de charriage d'un cours d'eau sont déterminés en calculant les apports de matériaux charriés par tous les affluents du bassin versant, avec ou sans installations.

Sur les tronçons d'une certaine longueur, il faut également tenir compte de l'influence exercée par l'érosion du lit, les dépôts et l'abrasion. En ce qui concerne l'état actuel, ces facteurs d'influence peuvent être estimés en analysant les profils transversaux de plusieurs années ou quantifiés à l'aide d'une simulation numérique. Dans l'état proche de l'état naturel, les dépôts déterminants se trouvent dans les zones d'atterrissement avérées. L'abrasion peut être calculée selon la loi de Sternberg en appliquant un coefficient d'abrasion variable selon le type de roche (voir p. ex. Bezzola 2019).

L'annexe D présente six approches éprouvées pour évaluer le débit de charriage dans l'état actuel et l'état proche de l'état naturel. Lors de l'estimation du débit de charriage, les incertitudes peuvent parfois être grandes. Il est donc important de les réduire au strict minimum en combinant différentes approches.

Débit de charriage proche de l'état naturel

Le débit de charriage proche de l'état naturel DC_{pnat} correspond au débit de charriage en l'état actuel DC_{act} plus/moins la modification du débit de charriage par les installations A :

$$DC_{pnat} = DC_{act} \pm A$$

Il en résulte que, au regard du climat, de la forêt, des apports de matériaux, etc., le débit de charriage proche de l'état naturel est basé sur l'état actuel du bassin versant.

Déficits dans le régime de charriage

La différence entre le débit de charriage en l'état actuel et le débit de charriage proche de l'état naturel correspond aux déficits dans le régime de charriage du système hydrographique.

Influence des installations sur le débit de charriage

Les installations dans les cours d'eau ont une influence variable sur le débit de charriage. Les lacs de retenue, les barrages au fil de l'eau ou les sites d'extraction de gravier entraînent généralement une réduction du débit de charriage. Cela signifie que, pour déterminer le débit de charriage proche de l'état naturel, il faut ajouter les valeurs de retenue ou d'extraction au débit de charriage de l'état actuel.

L'influence des dépotoirs à alluvions et des aménagements des cours d'eau est un peu plus nuancée :

Les dépotoirs à alluvions génèrent une réduction du débit de charriage lorsque la quantité de gravier qui y est retenue ou extraite est plus importante que celle qui pourrait ensuite être transportée en aval dans l'état proche de l'état naturel.

Les seuils torrentiels provoquent une réduction du débit de charriage, en particulier lors de grandes crues. Lors de petites crues qui, même sans seuils n'auraient pas pour effet d'éroder le fond du lit, les différences constatées entre le débit de charriage proche de l'état naturel et en l'état actuel sont moindres.

Les aménagements réalisés sur les cônes de déjection (canalisation, caniveaux) empêchent le dépôt de matériaux charriés et permettent ainsi une augmentation du débit de charriage comparativement à l'état proche de l'état naturel. Lors de grandes crues, un épandage de sédiments est observé sur le cône de déjection en l'état proche de l'état naturel, ce qui provoque une réduction importante du débit de charriage et des apports de matériaux charriés dans le milieu récepteur. Lors de petites crues, les différences sont plutôt insignifiantes.

Ainsi, les aménagements de correction torrentielle et la canalisation des eaux sur des cônes de déjection exercent donc des effets opposés. La conjugaison des effets de ces deux types d'installations dépend fortement des conditions spécifiques rencontrées. Il est possible que les effets s'annulent, ou bien que le débit de charriage en aval augmente ou diminue.

Le rétrécissement et la canalisation des cours d'eau amènent souvent une érosion du fond du lit et une augmentation du débit de charriage en direction de l'aval. La mise en place de seuils fixant le fond du lit permet de limiter ou d'empêcher ce processus.

Les aménagements de rives empêchent le charriage de matériaux issus de l'érosion des berges.

Profil longitudinal du débit de charriage

En se basant sur les débits de charriage déterminés, l'influence de toutes les installations ainsi que l'abrasion, il est possible de déduire le profil longitudinal des débits de charriage annuels moyens et de le représenter (fig. 13).

Lors de l'élaboration du profil longitudinal du débit de charriage proche de l'état naturel et en l'état actuel, il convient de tenir compte de la capacité de transport dans les tronçons intermédiaires situés entre deux affluents latéraux.

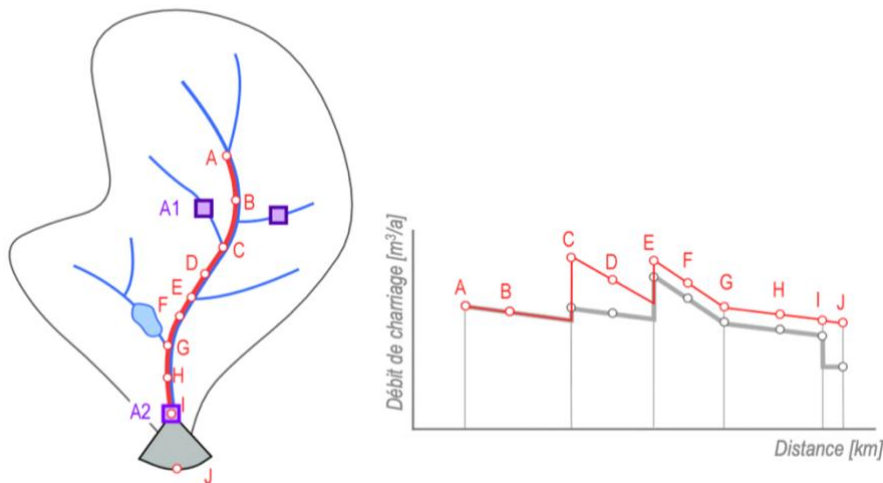
Dans les zones d'équilibre, les matériaux charriés passent sans se déposer et poursuivent leur chemin vers l'aval. Le débit de charriage ne diminue qu'en présence d'un phénomène d'abrasion.

Dans les zones d'atterrissement, il convient de tenir compte d'une réduction du débit de charriage en direction de l'aval. Des modélisations morphologiques peuvent aider à identifier les zones d'atterrissement proches de l'état naturel. L'atterrissement en l'état actuel peut être estimé en analysant les profils transversaux de plusieurs années.

Dans les zones d'érosion, le débit de charriage augmente, sauf lorsque l'abrasion est supérieure aux taux d'érosion relevés.

Fig. 13 : Bassin versant schématisé (à gauche) et diagramme du débit de charriage tout au long du cours d'eau (à droite) en l'état actuel (ligne grise) et en l'état proche de l'état naturel (ligne rouge)

A1 et A2 désignent des installations, les lettres A–J correspondent aux différents points du bassin versant où un débit de charriage a été établi.



Profil longitudinal Débit en l'état actuel (ligne grise) : Dans cet exemple fictif, plusieurs approches ont été utilisées pour déterminer le débit de charriage en l'état actuel pour les points A à J du tronçon de cours d'eau.

- A :** Apports de matériaux charriés issus du cours supérieur : estimation des débits en cas de crues dans les sous-bassins versants considérés et conversion en débit annuel.
- B :** Dans une zone d'équilibre, les matériaux charriés sont transportés sans se déposer. Le débit de charriage décroît en direction de l'aval sous l'effet de l'abrasion.
- C :** Apports de matériaux charriés issus des affluents latéraux avec dépotoir à alluvions (installation A1) : analyse des données d'exploitation du dépotoir, évaluation de la continuité de charriage et estimation du débit de charriage pour les matériaux mobilisés et transportés en aval du dépotoir en cas de crue.
- D :** Dans une zone d'équilibre, les matériaux charriés sont transportés sans se déposer. Le débit de charriage décroît en direction de l'aval sous l'effet de l'abrasion.
- E :** Apports de matériaux charriés issus des affluents latéraux : reprise du débit de charriage de cours d'eau similaires, p. ex. affluents du point A et données de l'installation A1.
- F :** Zone d'atterrissement : la réduction du débit de charriage le long du tronçon considéré est établie à partir des modifications du fond du lit observées. Le débit de charriage décroît en outre en direction de l'aval sous l'effet de l'abrasion.
- G :** Aucun apport de matériaux en provenance d'affluents latéraux (effluent de lac).
- H :** Le débit de charriage est déterminé au moyen d'un calcul de charriage dans le tronçon clé à faible déclivité.
- I :** La réduction du débit de charriage sur une zone d'extraction (installation A2) est établie à partir des statistiques d'extraction de gravier.
- J :** L'apport consécutif de matériaux charriés dans le lac est vérifié et le profil longitudinal éventuellement ajusté en analysant les données de croissance du delta.

Débit proche de l'état naturel (ligne rouge) : Il est établi en supprimant l'influence des installations.

- C :** Les matériaux charriés retenus et extraits dans le dépotoir se retrouvent pour une part acheminés dans le milieu récepteur et se déposent pour une autre part sur le cône de déjection en cas de crue. L'apport de matériaux charriés issus des affluents latéraux augmente.
- D :** Les matériaux charriés en l'état proche de l'état naturel ne peuvent plus être transportés sans se déposer. Le débit de charriage décroît en direction de l'aval (gradient plus important, mais niveau initial plus élevé).
- I :** En l'absence d'extraction de gravier, une plus grande quantité de matériaux charriés est acheminée dans le lac et le delta (point J).

3.3 Étape 2 : Définir des objectifs morphologiques pour le cours d'eau et le débit de charriage nécessaire

3.3.1 Introduction

Objectifs et résultats escomptés

Cette étape consiste à définir des objectifs pour le cours d'eau et à déterminer le débit de charriage nécessaire pour les atteindre.

Voici les résultats escomptés de cette étape :

- description des structures morphologiques visées pour l'état cible ;
- débit de charriage nécessaire dans les tronçons de cours d'eau pour atteindre ces objectifs ;
- débit de charriage nécessaire pour ne pas porter atteinte à la protection contre les crues ni au régime des eaux souterraines.

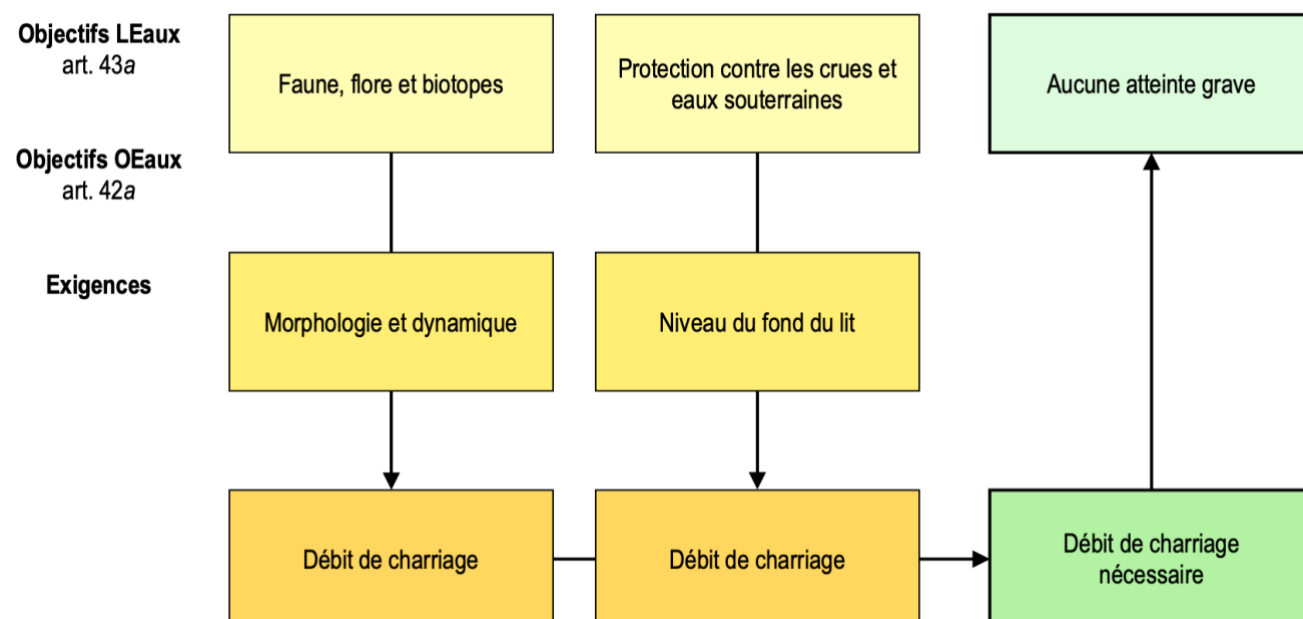
3.3.2 Aperçu des objectifs d'assainissement et exigences en matière de charriage

Objectifs inscrits à l'art. 43a LEaux

L'objectif général inscrit à l'art. 43a LEaux exige qu'aucune atteinte grave ne soit portée à la faune et à la flore indigènes et à leurs biotopes, au régime des eaux souterraines et à la protection contre les crues, y compris en cas de modification du régime de charriage. Les mesures d'assainissement du régime de charriage souscrivent également à cet objectif général (fig. 14). Néanmoins, sa réalisation dépend aussi de facteurs indépendants du régime de charriage : la population piscicole d'un cours d'eau peut ainsi subir des atteintes dues à des paramètres physiques ou chimiques, comme la qualité et la température de l'eau, ou à des obstacles à la migration même si le régime de charriage est inaltéré.

Fig. 14 : Objectifs généraux (LEaux) et concrets (OEaux) d'assainissement du régime de charriage

Sur la base des objectifs concrets, des exigences orientant le choix des mesures sont posées pour le débit de charriage. Lorsque le débit de charriage du cours d'eau atteint le niveau nécessaire, les atteintes graves induites par un régime de charriage modifié disparaissent.



Objectifs inscrits à l'art. 42a OEaux et exigences en matière de charriage

L'objectif général pour *la faune et la flore indigènes et leurs biotopes* se voit donc concrétisé dans l'OEaux, laquelle considère comme une atteinte toute modification durable des structures morphologiques ou de la dynamique morphologique des eaux (art. 42a OEaux). Le débit de charriage et la morphologie doivent présenter des caractéristiques proches de l'état naturel (annexe 1, art. 1, al. 2, OEaux). En vue de répondre concrètement aux objectifs du *régime des eaux souterraines* et de la *protection contre les crues*, un seuil minimal et maximal est défini pour le niveau de fond du lit.

Étant donné qu'un lien étroit existe entre le débit de charriage, les structures morphologiques et le niveau du fond du lit, il est possible d'atteindre les objectifs morphologiques concrets lorsque le débit de charriage est augmenté et, dans certains cas, lorsqu'il se produit un nombre suffisant d'épisodes de crues susceptibles de déplacer les matériaux charriés, en particulier dans les tronçons à débit résiduel et les zones alluviales. Les exigences en matière de débit de charriage se définissent donc en fonction des objectifs concrets à réaliser.

Débit de charriage nécessaire

Le débit de charriage minimal nécessaire pour atteindre les objectifs est appelé ici « débit de charriage nécessaire ». S'il est atteint ou dépassé, on peut partir du principe que les objectifs inscrits à l'art. 43a LEaux ont été réalisés pour le cours d'eau considéré (fig. 14).

État cible morphologique pour les tronçons proches de l'état naturel

L'état cible morphologique doit tendre à s'approcher le plus possible de l'état proche de l'état naturel. La morphologie et le niveau du fond du lit du cours d'eau ne doivent cependant pas nécessairement correspondre exactement à ceux de l'état proche de l'état naturel. Les atteintes modérées sont autorisées (fig. 15).

Le style fluvial du cours d'eau en l'état cible doit être du même type qu'en l'état proche de l'état naturel (fig. 8), avec des formes qui peuvent néanmoins être moins marquées. Une définition quantitative des objectifs du style fluvial en fonction de la largeur relative (rapport entre largeur et profondeur d'écoulement) est proposée dans Schälchli et Hunzinger (2021).

Une morphologie et un niveau du fond du lit semblables à l'état proche de l'état naturel ne peuvent s'instaurer que dans les circonstances suivantes :

- largeur suffisante du cours d'eau et zones riveraines non stabilisées ;
- régime d'écoulement (surtout en période de crue) semblable à l'état proche de l'état naturel et
- apport de matériaux charriés semblable à l'état proche de l'état naturel.

État cible morphologique pour les zones alluviales d'importance nationale

L'état cible morphologique doit correspondre autant que possible de l'état proche de l'état naturel.

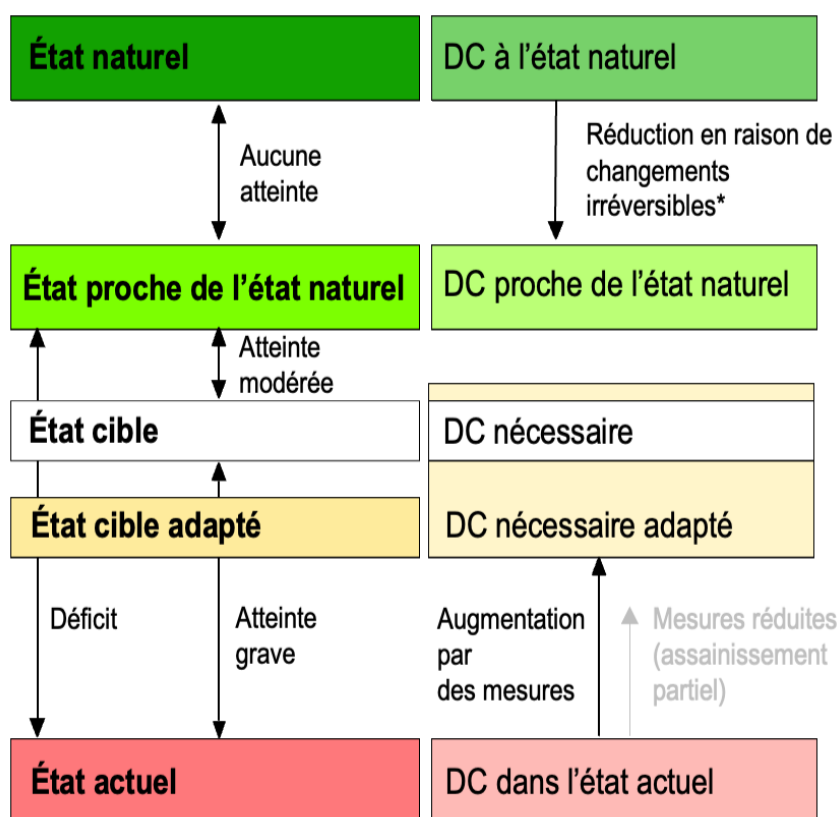
État cible morphologique réduit en cas de réduction de la largeur du lit, du régime d'écoulement ou des apports de matériaux charriés

Il existe des cas de figure dans lesquels des tronçons du cours d'eau présentent une largeur insuffisante, une dynamique d'écoulement fortement restreinte ou de faibles apports de matériaux charriés. Ces conditions ne permettent pas d'atteindre une morphologie et un niveau du fond du lit proches de l'état naturel. Les objectifs morphologiques cités plus haut ne pouvant être entièrement réalisés, ils sont alors révisés « à la baisse » (fig. 15).

La formulation de conditions-cadres particulières implique que les mesures de renaturation soient prises en compte conformément à la planification stratégique des cantons, aux projets de protection contre les crues et aux assainissements des débits résiduels au sens des art. 31 à 33 et de l'art. 80 LEaux.

Fig. 15 : Relation entre état naturel, état proche de l'état naturel, état cible, état actuel et état cible adapté, avec les débits de charriage (DC) correspondants

Adapté d'après OFEV et EAWAG (2006). *Sont considérés comme changements irréversibles : les déboisements à grande échelle, les assèchements de zones humides et les détournements de cours d'eau dans un lac.



Cinq situations ou conditions-cadres distinctes sont à prendre en considération lors de la définition des objectifs dans le cadre d'un assainissement (tab. 2) :

- tronçons proches de l'état naturel,
- zones alluviales d'importance nationale,
- tronçons avec rétrécissement du lit,
- tronçons avec régime d'écoulement modifié,
- tronçons avec apport de matériaux charriés modifié.

En fonction de la situation, les objectifs mentionnés plus haut ou certains détails devront être adaptés tel qu'il est décrit aux pages suivantes (points 3.3.3 à 3.3.7).

Tab. 2 : Aperçu des conditions-cadres et définition des objectifs.

Clichés représentatifs					
Situation	Tronçon proche de l'état naturel existant ou réalisable par revitalisation	Zone alluviale d'importance nationale	Rétrécissement du lit	Régime d'écoulement modifié	Apport de matériaux charriés modifié en direction de l'amont
Objectif morphologie et dynamique	Morphologie et dynamique semblables à l'état proche de l'état naturel.	Morphologie et dynamique correspondant le plus possible à l'état proche de l'état naturel.	Objectif réduit. La largeur établie dans le projet de protection contre les crues ou de revitalisation est déterminante ici.	Objectif réduit, révisé en fonction de la situation.	Objectif réduit. Variable en fonction des apports.
Objectif niveau du fond du lit	Pente longitudinale du fond du lit semblable à l'état proche de l'état naturel. Dans les zones d'atterrissement, la pente longitudinale du fond du lit ne dépasse pas la pente de la vallée.	Niveau du fond du lit le plus proche possible de celui de l'état proche de l'état naturel.	Les éventuels atterrissements ne doivent pas se traduire par une pente longitudinale du fond du lit supérieure à la pente de la vallée.	Pente longitudinale semblable à l'état proche de l'état naturel. Les éventuels atterrissements ne doivent pas se traduire par une pente longitudinale du fond du lit supérieure à la pente de la vallée.	Les éventuels atterrissements ne doivent pas se traduire par une pente longitudinale du fond du lit supérieure à la pente de la vallée.
Objectif en matière de débit de charriage	Débit de charriage nécessaire selon méthodes du point 3.3.8.	Débit de charriage le plus proche possible de l'état proche de l'état naturel.	Débit de charriage selon méthodes du point 3.3.8.	Débit de charriage nécessaire révisé.	Débit de charriage nécessaire = apport de matériaux charriés.
Point	3.3.3	3.3.4	3.3.5	3.3.6	3.3.7

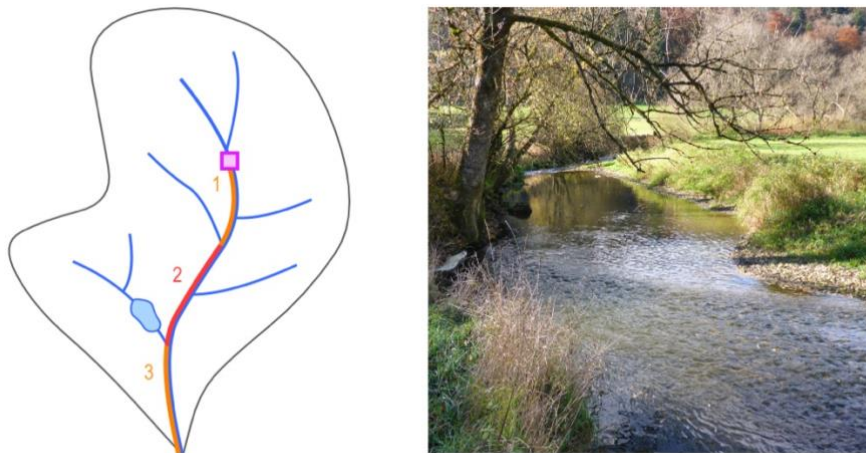
3.3.3 Objectifs morphologiques et exigences en matière de débit de charriage pour les tronçons proches de l'état naturel

Situation

Une installation porte une atteinte grave à un système hydrographique présentant des tronçons proches de l'état naturel ou qui pourraient retrouver un tel état par une revitalisation (fig. 16). Ces tronçons se distinguent par les caractéristiques suivantes : leur largeur n'a pas été réduite (ou ils offrent un potentiel d'élargissement naturel du fond du lit dans le respect de la proportionnalité des coûts), leur régime d'écoulement est proche de l'état naturel et les apports de matériaux charriés sont uniquement influencés par les installations à assainir. Le tronçon considéré est suffisamment long pour les processus morphologiques, c'est-à-dire au minimum dix fois plus long que la largeur du lit proche de l'état naturel.

Fig. 16 : Situation d'un tronçon proche de l'état naturel

Parmi les tronçons de cours d'eau cibles 1 à 3, le tronçon 2 présente un état proche de l'état naturel. Photo : exemple à Basse-Allaine.



Objectifs pour la morphologie et le niveau du fond du lit

Objectif 1 : morphologie et dynamique

- Le style fluvial du cours d'eau est semblable à l'état proche de l'état naturel (même type).
- Les atterrissements ont une étendue et une épaisseur semblables à l'état proche de l'état naturel.
- La distribution locale des types de substrats observe les mêmes proportions que dans l'état proche de l'état naturel. Les dépôts de matériaux charriés sont renouvelés plus d'une fois par an.

Objectif 2 : niveau du fond du lit

- Le fond du lit et le niveau des eaux souterraines en correspondance avec le cours d'eau sont suffisamment élevés pour ne pas porter atteinte aux eaux souterraines exploitables.
- La pente longitudinale est semblable à l'état proche de l'état naturel.
- Pour les cours d'eau qui ont une tendance à l'atterrissement en situation proche de l'état naturel : la pente longitudinale ne dépasse pas la pente de la vallée.

Exigences en matière de débit de charriage

Le débit de charriage est suffisamment élevé pour que puissent s'installer, dans les tronçons proches de l'état naturel, une morphologie, une dynamique et un niveau du fond du lit tels que décrits précédemment. Le débit de charriage nécessaire peut être déterminé grâce aux méthodes indiquées au point 3.3.8.

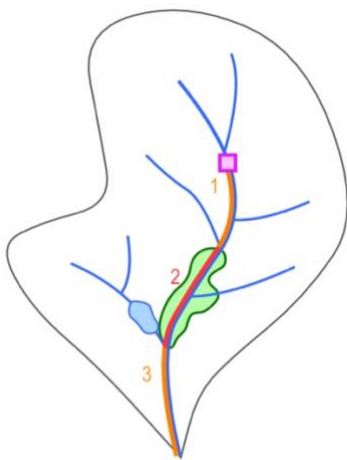
3.3.4 Objectifs morphologiques et exigences en matière de débit de charriage pour les zones alluviales d'importance nationale

Situation

Une installation porte une atteinte grave à une zone alluviale d'importance nationale.

Fig. 17 : Situation d'une zone alluviale d'importance nationale

Parmi les tronçons de cours d'eau cibles 1 à 3, le tronçon 2 est situé dans une zone alluviale d'importance nationale. Photo : exemple de la Bünz près de Möriken-Wildegg.



Objectifs pour la morphologie et le niveau du fond du lit

Les buts de protection visés à l'art. 4 de l'ordonnance sur les zones alluviales exigent la conservation des objets et, pour autant que ce soit judicieux et faisable, le rétablissement de la dynamique naturelle du régime des eaux et du charriage ainsi que la conservation des particularités géomorphologiques des objets.

Objectif 1 : morphologie et dynamique

- Le style fluvial du cours d'eau est le plus proche possible de l'état proche de l'état naturel.
- Les atterrissements ont une étendue et une épaisseur correspondant le plus possible à l'état proche de l'état naturel.
- La distribution locale des types de substrats correspond proportionnellement le plus possible à l'état proche de l'état naturel. Les dépôts de matériaux charriés sont renouvelés plus d'une fois par an.
- Les autres structures typiques des zones alluviales – p. ex. les terrasses sèches, bras morts, sources limnocrènes ou cuvettes marécageuses – correspondent le plus possible à l'état proche de l'état naturel.

Objectif 2 : niveau du fond du lit

- Le fond du lit et le niveau des eaux souterraines en correspondance avec le cours d'eau sont suffisamment élevés pour alimenter en eau les zones humides et sources limnocrènes comme en situation proche de l'état naturel.
- Le fond du lit est situé à un niveau suffisamment élevé pour que les zones alluviales à proximité du cours d'eau soient inondées en période de crues.

Exigences en matière de débit de charriage

Lorsque cela est judicieux et faisable, le débit de charriage doit correspondre à l'état proche de l'état naturel. Le débit de charriage doit cependant être suffisamment élevé pour que puissent s'installer une morphologie et une dynamique

proches de l'état naturel. Le débit de charriage minimal nécessaire peut être déterminé grâce aux méthodes indiquées au point 3.3.8.

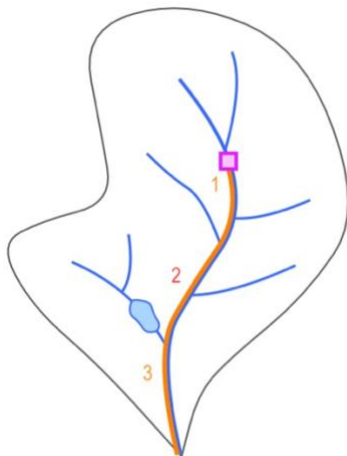
3.3.5 Objectifs morphologiques et exigences en matière de débit de charriage pour les tronçons avec rétrécissement du lit

Situation

Une installation porte une atteinte grave à un système hydrographique dans lequel la largeur du cours d'eau est rétrécie sur toute la longueur du tronçon atteint et où il n'est pas envisageable que la largeur naturelle du fond du lit puisse un jour être rétablie dans le respect de la proportionnalité des coûts, du fait notamment de conditions-cadres complexes telles que la présence de zones d'habitation ou d'infrastructures de transport importantes (fig. 18).

Fig. 18 : Situation avec rétrécissement du lit

Parmi les tronçons de cours d'eau cibles 1 à 3, aucun ne permet de rétablir la largeur naturelle du fond du lit. Photo : exemple de l'Hasliaare au niveau de la gare de Brienzwiler.



Un style fluvial semblable à l'état proche de l'état naturel ne peut être réalisé du fait de la largeur réduite du cours d'eau. Toutefois, les paramètres d'érosion, l'étendue des dépôts de gravier et la qualité du substrat peuvent être améliorés par un débit de charriage augmenté.

Objectifs pour la morphologie et le niveau du fond du lit

Les objectifs caractérisant les tronçons proches de l'état naturel (point 3.3.3) ne peuvent ici être réalisés dans leur intégralité et doivent donc être adaptés.

Objectif 1 : morphologie et dynamique

- Le style fluvial, les atterrissements et la distribution locale des types de substrats correspondent autant que possible à l'état proche de l'état naturel compte tenu du rétrécissement du lit du cours d'eau. La valeur déterminante pour la largeur du lit dépend de la situation rencontrée. Dans le cadre de projets de protection contre les crues ou de revitalisation, la largeur établie dans le projet est déterminante. Lorsque des projets de revitalisation ont été planifiés, il convient de tenir compte de la largeur prévue dans ces projets. Dans le cas où aucun élargissement n'est prévu, il convient de tenir compte de la largeur existante.

Objectif 2 : niveau du fond du lit

- La pente longitudinale du cours d'eau ne dépasse pas celle de la vallée.

Exigences en matière de débit de charriage

Les exigences en matière de débit de charriage sont les mêmes que pour les tronçons proches de l'état naturel (point 3.3.3).

Lorsque, dans un tronçon canalisé, la capacité de transport s'avère plus élevée que le débit de charriage nécessaire et que des problèmes d'érosion surviennent de ce fait, il convient, dans le cadre de projets d'aménagement des eaux, de prendre des mesures supplémentaires afin d'endiguer l'érosion.

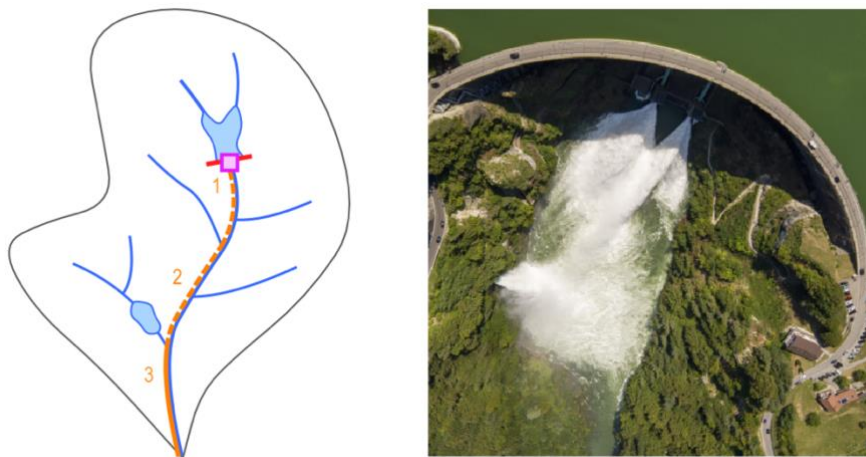
3.3.6 Objectifs morphologiques et exigences en matière de débit de charriage pour les tronçons avec régime d'écoulement modifié

Situation

Une installation porte une atteinte grave, du fait de l'exploitation de la force hydraulique, à un cours d'eau dont le régime d'écoulement est fortement modifié par rapport au régime d'écoulement proche de l'état naturel. Les influences exercées sur la morphologie et la dynamique du cours d'eau varient en fonction de la situation rencontrée. Les influences doivent donc être examinées au cas par cas. La marche à suivre décrite ici aide à déterminer les objectifs morphologiques et les exigences en matière de débit de charriage en présence d'un régime d'écoulement modifié. Est considéré comme régime d'écoulement modifié un régime dont le débit à bords pleins (approximativement HQ_2) est réduit de plus de 10 % par rapport à l'état proche de l'état naturel.

Fig. 19 : Situation avec débit à bords pleins réduit

Dans les tronçons de cours d'eau cibles 1 et 2, le HQ_2 est réduit de plus de 10 % par rapport à l'état sans exploitation de la force hydraulique. Photo : exemple du barrage de Rossens sur la Sarine (photo : groupe de recherche en écohydrologie, ZHAW).



Remarque : après l'arrivée d'un ou plusieurs affluents latéraux dans le lit du cours d'eau, on constate que le débit à bords pleins se rapproche à nouveau du débit sans prélèvements d'eau. Dans ce cas précis, le périmètre d'observation est donc limité en longueur. Les mesures d'assainissement doivent également porter sur les tronçons dans lesquels le régime d'écoulement n'est plus modifié (tronçon 3, fig. 19).

Pour déterminer les objectifs d'assainissement en cas de régime d'écoulement modifié, il est judicieux de prendre en compte différentes situations (tab. 3).

Tab. 3 : Situations et marche à suivre en cas de régime d'écoulement modifié

Situation	A) Cours d'eau cible = tronçon à débit résiduel en aval d'un lac de retenue avec ou sans écoulement périodique par l'évacuateur de crue	B) Cours d'eau cible = tronçon à débit résiduel en aval d'un lac de retenue avec écoulement périodique par l'évacuateur de crue	C) Cours d'eau cible = tronçon à débit résiduel en aval d'une centrale hydroélectrique	D) Cours d'eau cible en aval de la restitution de grands lacs de retenue
Exemple	Centrale de Rossens Lago di Lei	Etzelwerk, Lai da Ova Spin	Centrale de Wildegg-Brugg, centrale de Felsenau	Rhin alpin entre Reichenau et l'embouchure de l'III
Caractéristiques du régime d'écoulement modifié	Débordements inexistants ou rares avec débits de transport significatifs (moins d'une fois tous les trois ans)	Débordements sporadiques ou réguliers avec débits de transport significatifs (tous les trois ans environ, une à trois fois par an)	Débits de transport significatifs plusieurs fois par an	Débits de transport significatifs, mais pointes de débit réduites en été. Déplacement des débits d'été vers les débits d'hiver
Objectifs morphologiques	Observation au cas par cas	« Redimensionnement » des objectifs morphologiques ¹	« Redimensionnement » des objectifs morphologiques ¹	« Redimensionnement » des objectifs morphologiques ¹
Exigences en matière de débit de charriage	Observation au cas par cas. DC_{nec} redimensionné ^{1,2}	DC_{nec} redimensionné ^{1,2}	DC_{nec} redimensionné ^{1,3}	DC_{nec} redimensionné ¹
Suivi de l'efficacité	Observation au cas par cas	Aucune particularité	Aucune particularité	Aucune particularité

1 Redimensionnement, cf. « Redimensionnement du cours d'eau » ci-après.

2 Si des tronçons écologiquement précieux se situent en aval de l'installation, il convient de déterminer au cas par cas l'état cible, le DC_{nec} et éventuellement les crues artificielles.

3 La mesure est à dimensionner en fonction des tronçons en amont et en aval. Si la quantité de matériaux charriés en amont est plus importante que celle pouvant être transportée par le tronçon à débit résiduel et qu'il existe en aval des tronçons avec un DC_{nec} plus élevé, il convient alors de garantir, p. ex. par des mesures d'exploitation, que la quantité nécessaire de matériaux devant être charriés par le tronçon en aval puisse être transportée par le tronçon à débit résiduel.

Objectifs pour la morphologie et le niveau du fond du lit

Les objectifs des tronçons proches de l'état naturel (point 3.3.3) ne pouvant être entièrement réalisés, ils sont révisés « à la baisse ».

Objectif 1 : morphologie et dynamique

- Le style fluvial, les dépôts de gravier, la distribution locale des types de substrats correspondent autant que possible à l'état proche de l'état naturel en considération du régime d'écoulement modifié.

Redimensionnement du cours d'eau

La modification du régime de crue modifie la capacité de transport du cours d'eau, qui peut alors charrier une moindre quantité de matériaux. Pour obtenir avec un régime d'écoulement modifié une morphologie semblable à l'état proche de l'état naturel, il faut aussi réduire le débit de charriage. Dans ces circonstances, le cours d'eau est redimensionné. Un tel redimensionnement est admis dans la mesure où la granulométrie (inchangée) n'exerce pas d'influence significative sur le style fluvial.

La largeur du lit pouvant être atteinte avec le régime d'écoulement modifié peut se définir comme suit en première approximation :

$$LL_{\text{réd}} = LL \sqrt{\frac{HQ_{\text{réd}}}{HQ_2}}$$

$LL_{\text{réd}}$ désigne ici la largeur du lit avec régime d'écoulement réduit, LL la largeur du lit avec régime d'écoulement inchangé et HQ_2 se réfère au débit à bords pleins en situation proche de l'état naturel. $HQ_{\text{réd}}$ est le débit de crue déterminant pour le régime d'écoulement modifié. Pour les situations C et D (tab. 3), le $HQ_{\text{réd}}$ correspond au HQ_2 du régime modifié. Pour le tronçon à débit résiduel en aval d'un lac de retenue avec écoulement périodique par l'évacuateur de crue (situation B, tab. 3), le $HQ_{\text{réd}}$ doit être déterminé au cas par cas.

Objectif 2 : niveau du fond du lit

- Le fond du lit et le niveau des eaux souterraines en correspondance avec le cours d'eau sont suffisamment élevés pour ne pas porter atteinte aux eaux souterraines exploitables.
- La pente longitudinale du cours d'eau est semblable à l'état proche de l'état naturel.
- La pente longitudinale du cours d'eau ne dépasse pas celle de la vallée.

Exigences en matière de débit de charriage

La méthode 1 est utilisée pour déterminer le débit de charriage nécessaire. Le pourcentage est néanmoins appliqué à un débit de charriage réduit en situation proche de l'état naturel $DC_{p\text{nat}_{\text{réd}}}$. L'équation suivante s'applique :

$$DC_{p\text{nat}_{\text{réd}}} = DC_{p\text{nat}} \frac{HQ_{\text{réd}}}{HQ_2}$$

Ainsi, le rapport entre débit de charriage et débit à bords pleins demeure identique à celui sans modification du régime d'écoulement.

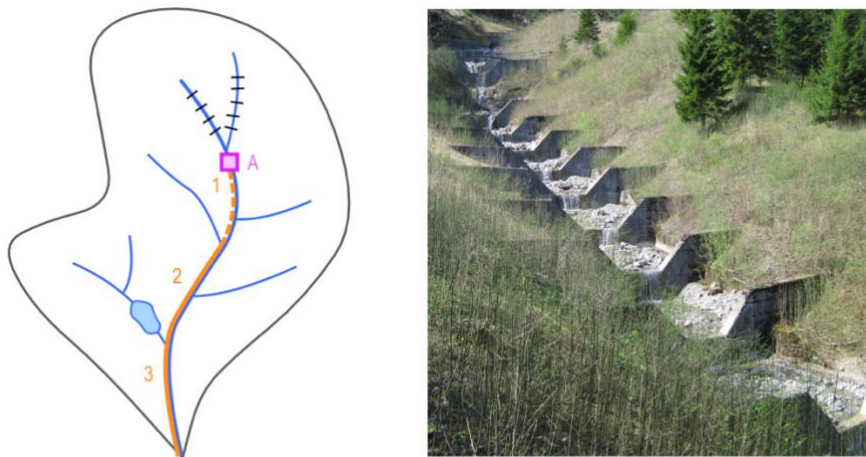
3.3.7 Objectifs morphologiques et exigences en matière de débit de charriage pour les tronçons avec apport de matériaux charriés modifié

Situation

Une installation porte une atteinte grave à un système hydrographique dans lequel l'apport de matériaux charriés en provenance du bassin versant se voit modifié, comparativement à l'état proche de l'état naturel, par des installations non soumises à une obligation d'assainir ou pour lesquelles un assainissement serait disproportionné (p. ex. les aménagements réalisés sur les torrents comme les seuils et les caniveaux sur le cône de déjection) (fig. 20). Si l'apport de matériaux charriés dans le système hydrographique en aval de ces installations est inférieur au débit de charriage nécessaire, il convient d'en tenir compte pour les objectifs morphologiques et les exigences en matière de débit de charriage du cours d'eau cible.

Fig. 20 : Situation avec apport de matériaux charriés réduit

Apport de matériaux charriés réduit du fait d'installations non soumises à une obligation d'assainir dans le bassin versant, comme des aménagements sur les torrents. Photo : exemple du Steinibach à Dallenwil, canton d'Obwald.



Objectifs pour la morphologie et le niveau du fond du lit

Objectif 1 : morphologie et dynamique

- Les objectifs des tronçons proches de l'état naturel sont susceptibles de ne pas être entièrement réalisés. Ils peuvent être révisés « à la baisse ». Le style fluvial et la largeur du lit doivent être estimés en fonction de l'apport de matériaux charriés.

Objectif 2 : niveau du fond du lit

- Pour les cours d'eau qui ont une tendance à l'atterrissement en situation proche de l'état naturel : la pente longitudinale ne dépasse pas celle de la vallée.

Exigences en matière de débit de charriage

Le débit de charriage nécessaire correspond à l'apport de matériaux charriés vers l'installation.

3.3.8 Méthodes pour déterminer le débit de charriage nécessaire

Les méthodes et approches présentées ci-après servent à déterminer le débit de charriage minimal (art. 43a LEaux) nécessaire pour permettre, dans des tronçons proches de l'état naturel, la formation de structures morphologiques elles aussi proches de l'état naturel. Des mesures sont élaborées sur la base du débit de charriage nécessaire déterminé. Le suivi de l'efficacité permet de contrôler si le débit de charriage suffit pour atteindre les objectifs d'assainissement ou s'il doit être adapté. Le charriage doit en effet être augmenté dans certains tronçons canalisés afin d'obtenir un régime de charriage équilibré.

Tab. 4 : Approches permettant de déterminer le débit de charriage nécessaire

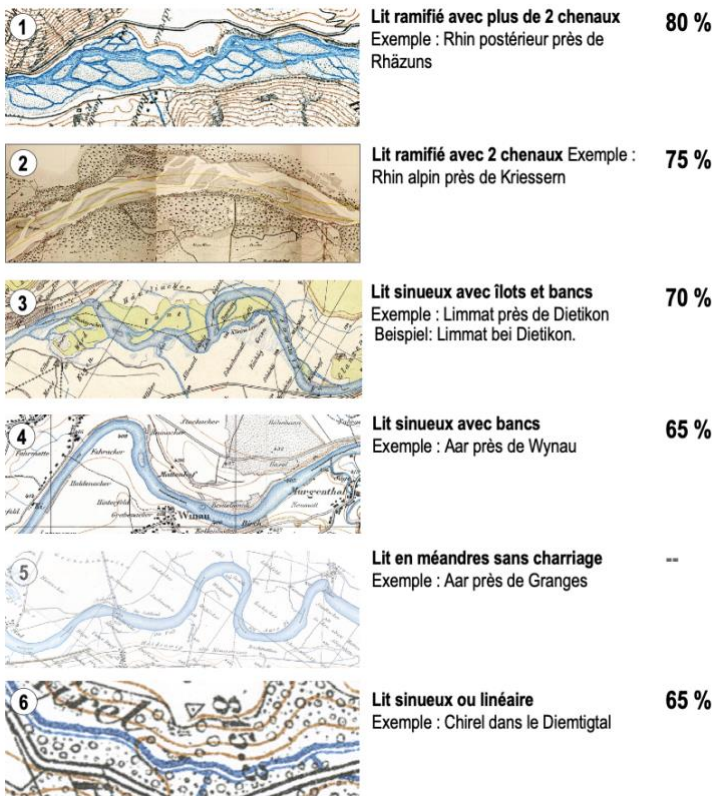
Cours d'eau < 3 %	Cours d'eau alpins > 3 %*
Méthode « Style fluvial » (détermination quantitative), correspond à 65-80 % du débit de charriage proche de l'état naturel	Méthode « Substrat » (détermination qualitative)
Approche « Degré de saturation 1 » (détermination quantitative)	
Méthode « Niveau du fond du lit » (détermination qualitative)	

* Le seuil de 3 % a été sélectionné, car le style fluvial devient de plus en plus linéaire à partir de cette déclivité et que le substrat est un bon indicateur des processus morphologiques dans de tels cours d'eau. En outre, les cours d'eau dont la pente est supérieure à 3 % sont des petits cours d'eau, si bien que la charge liée aux méthodes quantitatives serait plutôt élevée par rapport aux mesures possibles.

Méthode « Style fluvial »

Le débit de charriage nécessaire correspond à un pourcentage du débit de charriage proche de l'état naturel. Ce pourcentage est, en situation proche de l'état naturel, plus élevé pour les lits ramifiés que pour les lits sinueux.

Fig. 21 : Le débit de charriage nécessaire équivaut à un pourcentage du débit de charriage proche de l'état naturel et varie selon le style fluvial proche de l'état naturel



La méthode « Style fluvial » peut être appliquée à tous les cours d'eau pour lesquels le débit de charriage proche de l'état naturel peut être estimé. Développée pour la mise en œuvre de la législation sur la protection des eaux, elle est décrite et expliquée dans le rapport technique de Schälchli et Hunzinger (2021).

Limites d'application

Les valeurs en pourcentage sont entachées des incertitudes typiques inhérentes aux processus morphologiques. Ces incertitudes demeurent toutefois minimales par rapport aux incertitudes liées à la détermination du débit de charriage proche de l'état naturel, ces dernières exerçant, en fin de compte, un plus fort impact sur le résultat. C'est pourquoi il est essentiel de définir aussi précisément que possible le débit de charriage proche de l'état naturel, sur la base de critères ou d'hypothèses plausibles et variés (cf. point 3.2.5). Cette méthode est décrite à l'annexe E.

Tab. 5 : Avantages et inconvénients de la méthode « Style fluvial »

Avantages	Inconvénients
Méthode utilisant explicitement l'état proche de l'état naturel pour mesurer l'atteinte des objectifs, conformément au mandat légal. Méthode garantissant un charriage minimal afin de permettre une morphologie proche de l'état naturel dans des tronçons dont la largeur est proche de l'état naturel	Incertitudes lors de la détermination du débit de charriage proche de l'état naturel

Approche « Degré de saturation 1 »

Le « degré de saturation 1 » est une approche théorique fondée sur la prémisse selon laquelle le débit de charriage et la capacité de charriage sont en équilibre. Le rapport entre ces deux paramètres, c'est-à-dire le degré de saturation, correspond alors à 1. Le matériau charrié équivaut ainsi au matériau du fond du lit.

Cette approche permet de déterminer le charriage nécessaire afin d'atteindre une morphologie du fond du lit naturelle ou proche de l'état naturel, par exemple dans le cadre de projets d'aménagement de cours d'eau pour lesquels la largeur du lit et le niveau du fond du lit sont imposés par des conditions-cadres extérieures.

Il faut toutefois que la largeur du lit tout comme le niveau du fond du lit (notamment la pente) soient dans un état proche de l'état naturel. Il importe en outre que les paramètres sous-jacents au calcul du degré de saturation (p. ex. granulométrie du matériau du fond du lit, soit du matériau charrié) et le débit de charriage qui en résulte soient vérifiés au moyen d'observations (p. ex. volumes déposés ou extraits).

En effet, en s'appuyant uniquement sur l'hypothèse selon laquelle le degré de saturation est égal à 1, c'est-à-dire sans tenir compte des conditions susmentionnées, on peut produire les valeurs les plus diverses s'agissant du débit de charriage. Pour les tronçons présentant un fond de lit abaissé (faible déclivité), il serait ainsi possible de déterminer des débits de charriage nettement inférieurs aux valeurs en situation proche de l'état naturel, malgré un degré de saturation égal à 1. Les structures et la dynamique morphologiques seraient alors limitées et modifiées (art. 42a OEaux).

Limites d'application

Cette approche ne peut être mise en œuvre que si la largeur du lit et le niveau du fond du lit (notamment la pente) sont dans un état proche de l'état naturel. Elle n'est pas applicable aux cours d'eau aménagés présentant une largeur réduite ni aux torrents à forte déclivité en raison de la capacité de charriage élevée. Les débits calculés seraient alors très élevés sans donner lieu à des structures proches de l'état naturel.

Tab. 6 : Avantages et inconvénients de l'approche « Degré de saturation 1 »

Avantages	Inconvénients
Approche adaptée pour définir des débits permettant d'instaurer, lorsque les conditions-cadres concernant la largeur du lit et le niveau du fond du lit sont connues, une morphologie proche de l'état naturel dans les cours d'eau se trouvant à l'intérieur du périmètre de projet d'aménagement	Le débit de charriage étant calculé pour un tronçon local de cours d'eau (périmètre du projet), il faut veiller à ce qu'il soit également suffisant pour le cours d'eau en aval. Les atteintes portées aux tronçons en aval doivent également être examinées. Une approche de calcul prudente à l'égard du choix des paramètres d'entrée et des conditions aux limites s'impose. Ces paramètres et conditions aux limites doivent être contrôlés par comparaison à des valeurs naturelles du bassin versant. Ainsi, il se peut que le débit de charriage calculé soit beaucoup trop élevé (par exemple en cas de largeur du lit restreinte ou de matériaux de charriage trop fins) ou au contraire trop faible, notamment dans des cours d'eau présentant un fond de lit abaissé (faible déclivité).

Méthode « Substrat »

Pour les cours d'eau au lit linéaire ou sinueux ayant une pente supérieure à 3 %, nous recommandons d'estimer qualitativement le débit de charriage nécessaire sur la base de la distribution des types de substrats et du degré de colmatage. En fonction de l'état du fond du lit, il sera ensuite possible d'évaluer si le débit de charriage du cours d'eau est suffisant, ou s'il doit être augmenté. Cette méthode est décrite à l'annexe E.

Méthode « Niveau du fond du lit »

La méthode « Niveau du fond du lit » est utilisée pour vérifier les effets d'un régime de charriage modifié sur le régime des eaux souterraines et la protection contre les crues.

Les effets sur le régime des eaux souterraines ne sont analysés que pour les tronçons avec eaux souterraines exploitables ou zones alluviales inventoriées. On vérifie alors si la modification du régime de charriage a conduit à une modification substantielle du niveau des eaux souterraines. Les indicateurs utilisés sont le niveau du fond du lit et des eaux souterraines dans l'état actuel et l'état proche de l'état naturel. Dans les zones alluviales, il est possible de prendre également en compte l'état de la végétation alluviale. Si un écart important est constaté entre l'état actuel et l'état proche de l'état naturel pour le niveau du fond du lit et celui des eaux souterraines, on peut alors parler d'atteinte grave au régime des eaux souterraines.

Une atteinte grave est portée à la protection contre les crues lorsque le niveau du fond du lit accuse un changement notable suite à la modification du régime de charriage. En guise d'indicateurs, on observe ici l'évolution du fond du lit dans l'état actuel et dans l'état proche de l'état naturel ainsi que l'évolution de la pente de la vallée. Lorsqu'une modification importante du niveau du fond du lit est avérée, suite à la modification du régime de charriage, et que la pente longitudinale est plus faible que la pente de la vallée, on peut partir du principe qu'une atteinte grave a été portée à la protection contre les crues par le régime de charriage modifié. Cette méthode est décrite à l'annexe E.

Limites d'application

Le recours à cette méthode, basée sur la comparaison entre le niveau du fond du lit, la pente et le niveau des eaux souterraines, n'est possible que pour les tronçons de cours d'eau dont la largeur n'a pas été réduite. En effet, dans les tronçons canalisés, l'évolution du niveau du fond du lit est principalement induite par la réduction de la largeur du cours d'eau.

En règle générale, on peut partir du principe que lorsque les débits de charriage sont conformes à la méthode « Style fluvial », le régime des eaux souterraines et la protection contre les crues ne subissent pas d'influences significatives en cas de régime de charriage modifié.

3.4 Étape 3 : Définir des objectifs d'assainissement pour les installations

Objectifs et résultats escomptés

Cette étape de travail doit permettre de déterminer, à partir des objectifs définis pour le cours d'eau et du débit de charriage nécessaire correspondant, des objectifs d'assainissement concrets pour les installations concernées.

Voici les résultats escomptés de cette étape :

- une prescription concrète de débit de charriage en aval d'une installation : volume de charriage indiqué en m³ par an qui doit être transporté dans le cours d'eau en aval de l'installation⁷, ou
- une prescription de fréquence des épisodes de charriage : nombre d'événements par an où les matériaux charriés doivent être transportés en aval de l'installation.

Marche à suivre pour un cours d'eau doté d'une ou plusieurs installations

Si un cours d'eau ne comporte qu'une installation à assainir, l'objectif d'assainissement pour l'installation correspond au débit de charriage nécessaire pour le cours d'eau.

Si un système hydrographique comporte plusieurs installations qui modifient le régime de charriage, l'objectif d'assainissement doit être fixé pour chacune des installations. L'exemple qui suit montre que, pour un régime de charriage donné, il est possible de définir différents objectifs d'assainissement pour une même installation. Selon les circonstances, il est possible que l'objectif d'assainissement relatif à une installation ne puisse être fixé et décidé avant que la combinaison de mesures idéale au regard de l'ensemble du système hydrographique ait été déterminée dans le cadre d'une étude des variantes.

3.5 Étape 4 : Élaborer un catalogue de mesures

3.5.1 Introduction

Objectifs et résultats escomptés

Cette étape consiste à collecter et décrire toutes les mesures grâce auxquelles le débit de charriage peut être augmenté en aval d'une installation donnée. Les mesures doivent être décrites au stade de la planification avec un maximum de détails pour que leurs effets et leurs coûts puissent être évalués aux étapes suivantes.

Voici les résultats escomptés pour cette étape :

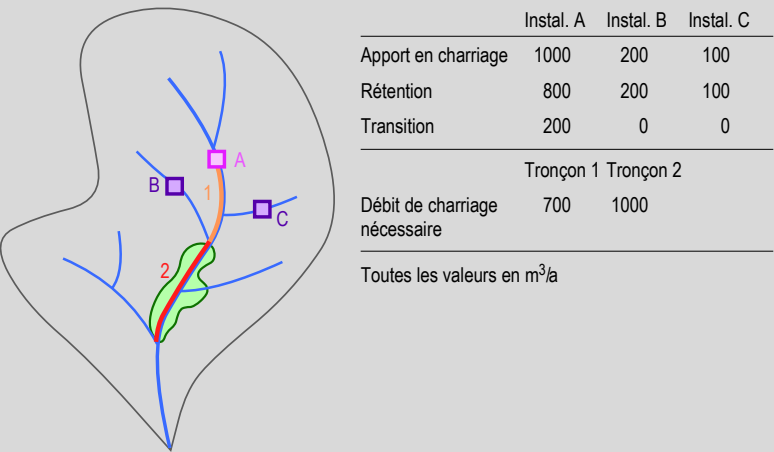
- une liste des mesures constructives et des mesures d'exploitation pour chacune des installations à assainir du système hydrographique ;
- une description des effets des mesures en fonction des critères d'évaluation formulés au point 3.6 ;
- une estimation des coûts y afférents.

⁷ Valeur moyenne sur plusieurs années.

Exemple : Dans le système hydrographique de la figure 22, trois installations (A, B et C) altèrent le régime de charriage et doivent donc être assainies. L'installation A retient 800 m³ des 1000 m³ de matériaux charriés apportés et en laisse passer 200 m³. Les installations B et C retiennent la totalité des matériaux charriés, soit respectivement 200 m³/a et 100 m³/a.

Les tronçons 1 et 2 sont des cours d'eau cibles. Pour le tronçon 1, le débit de charriage nécessaire a été fixé à 700 m³/a, pour le tronçon 2, qui se situe dans une zone alluviale, il a été fixé à 1000 m³/a.

Fig. 22 : Coordination des objectifs d'assainissement lorsque le système hydrographique compte plusieurs installations
Exemple fictif avec les installations A, B et C et deux tronçons avec débits de charriage nécessaires différents.



Les débits de charriage nécessaires peuvent être atteints de deux manières. Premier cas de figure : l'installation A laisse passer 70 % des matériaux apportés, donc 700 m³/a, et les deux installations B et C en laissent passer 100 %. Second cas de figure : l'installation A laisse passer 100 % des matériaux apportés et les installations B et C ne doivent pas laisser passer de matériaux de charriage. Ainsi, le débit de charriage nécessaire est dépassé dans le tronçon 1, ce qui est admis dans la mesure où l'apport de matériaux charriés dans ce tronçon ne cause aucun problème de protection contre les crues.

3.5.2 Mesures possibles

Pour les centrales hydrauliques, les mesures visant à faire transiter les matériaux charriés sont préférables au déversement de gravier. On peut envisager le démantèlement complet pour tous les types d'installations si cette mesure est proportionnée. De plus amples détails sur les mesures constructives et mesures d'exploitation possibles sont fournis dans l'annexe F concernant la planification et l'étude de projet.

Tab. 7 : Mesures possibles

		Centrales au fil de l' eau/à dérivation	Centrales à accumulation (lac de retenue)	Bassins de rétention des crues	Dépotoirs à alluvions	Extraction de gravier à but d' aménagement	Extraction de gravier à but commercial	Aménagements de cours d' eau
Mesures constructives								
M 1.1	Transformer le barrage	x						
M 1.2	Transformer la galerie de vidange du fond		x					
M 1.3	Aménager une galerie de déviation des matériaux charriés		x					
M 1.4	Transformer l'ouvrage de restitution pour que le bassin ne se remplisse que lors de débits de crue rares			x	x			
M 1.5	Aménager un chenal pilote pour faire transiter les matériaux charriés en cas de crue modérée				x			
M 1.6	Déplacer les barreaux de la grille de rétention				x			
M 1.7	Construire des ouvrages de protection contre les crues le long du cours d'eau				x	x		
M 1.8	Démanteler les ouvrages transversaux et laisser l'érosion agir sur le fond du lit					x		x
M 1.9	Démanteler les ouvrages de stabilisation des berges et laisser agir l'érosion latérale							x
M 1.10	Éliminer les rétrécissements du lit					x		
M 1.11	Aménager une aire de dépôt de matériaux charriés dans un dépotoir à alluvions latéral					x		
M 1.12	Démantèlement	x	x	x	x	x	x	x
Mesures d'exploitation								
M 2.1	Abaissier le niveau d'eau de la retenue en cas de crue	x						
M 2.2	Optimiser les vidanges et les purges du réservoir	x	x					
M 2.3	Permettre l'atterrissement du réservoir jusqu'à rétablissement de la continuité	x			x			
M 2.4	Déverser du gravier en aval	x	x	x	x	x		
M 2.5	Crues artificielles	x	x					
M 2.6	Réduire ou arrêter l'extraction de gravier						x	

3.5.3 Mesures en cas de projets de protection contre les crues et de projets de revitalisation

Les projets de protection contre les crues et de revitalisation des cours d'eau constituent la base essentielle des renaturations réussies. Afin qu'ils répondent aux exigences du régime de charriage, les projets doivent être conçus pour

- ne nécessiter si possible aucune extraction (sauf dans les tronçons d'atterrissement naturel) ;
- permettre les dépôts de matériaux : les interventions nécessaires ne doivent pas être menées à titre préventif, mais seulement lorsque les structures morphologiques visées ont pu se former suite aux dépôts et dès lors que la protection contre les crues peut être assurée ;

- pouvoir aussi choisir le lieu et le moment des extractions ou interventions nécessaires selon les aspects écologiques et morphologiques ;
- ne pas abaisser si possible la pente longitudinale en dessous de celle de l'état proche de l'état naturel : la pente longitudinale peut néanmoins être inférieure dans les tronçons canalisés tant que la capacité de transport n'est pas moindre par rapport à celle des tronçons non canalisés ;
- éviter autant que possible les déficits de charriage en aval du périmètre du projet.

3.5.4 Vérifier et minimiser les effets sur la protection contre les crues et sur le régime des eaux souterraines

Les mesures applicables au régime de charriage augmentent le débit de charriage en aval de l'installation par rapport à l'état actuel. Le débit de charriage nécessaire a été fixé à l'étape 2 de telle manière qu'il n'existe plus de tendance à l'érosion du lit dans les tronçons non canalisés.

Selon la modification du débit de charriage (petite, modérée, importante), les dommages potentiels et le type de cours d'eau, il est nécessaire d'examiner les effets possibles des mesures sur la protection contre les crues. En fonction du processus de déposition, une mesure peut exercer des effets divers sur la protection contre les crues (tab. 8). Différentes méthodes existent pour appréhender plus précisément ces effets éventuels (tab. 9).

Si les débits de charriage augmentés causent des atterrissements indésirables altérant la capacité d'écoulement au point de compromettre au-delà du tolérable la protection des eaux le long du tronçon, il convient de réduire le débit de charriage. Il convient de vérifier si des mesures complémentaires de protection contre les crues sont nécessaires et possibles (p. ex. supprimer les seuils pour augmenter la pente longitudinale ou adapter le terrain et les sommets des berges afin de tenir compte des enjeux de protection contre les crues et des objectifs d'assainissement du régime de charriage). Ces mesures complémentaires font alors partie de l'assainissement du régime de charriage et doivent être prises en compte dans l'estimation des coûts et dans l'appréciation des variantes. Si des mesures complémentaires ne peuvent être prises, l'atteinte portée à la protection contre les crues doit être qualifiée d'effet négatif de la mesure dans l'appréciation des variantes (cf. tab. 12).

Tab. 8 : Processus de déposition possibles et effets sur la protection contre les crues

Processus de déposition	Atteinte à la protection contre les crues
Formation locale de bancs	non
Élévation locale du lit du cours d'eau	à établir
Élévation du lit avec augmentation de la pente longitudinale sur une longue distance ($\geq 10 \times$ largeur du lit)	à établir (cf. tab. 9)

S'il n'existe pas de mesure proportionnée qui permette d'atteindre les objectifs définis à l'étape 3 sans compromettre au-delà du tolérable la protection contre les crues, des alternatives doivent être envisagées même si elles ne permettent d'atteindre qu'une partie des objectifs (cf. explications au point 3.7).

Tab. 9 : Méthodes possibles pour déterminer les effets sur la protection contre les crues

Analyse des processus et évaluation qualitative	Voir tab. 8
Modélisations morphologiques	En prenant appui sur des modélisations morphologiques, il s'agit d'établir si l'augmentation du débit de charriage génère une élévation significative du lit et du niveau de crue.
Analyse des mesures effectuées	Des mesures sont opérées sur le fond du lit du cours d'eau avant et après l'augmentation du débit de charriage dans les tronçons limitant le transport de matériaux. L'analyse des données recueillies permet de détecter un éventuel exhaussement du lit. L'élévation du niveau de crue peut être établie par des calculs hydrauliques. Si des mesures plus anciennes sont disponibles, il convient également de les analyser. Elles permettront de révéler si des incisions antérieures du lit (dues au déficit de charriage provoqué) ont pu être compensées suite à l'augmentation du débit de charriage.

Les effets quantitatifs et qualitatifs des mesures sur le régime des eaux souterraines doivent également être pris en compte pour choisir les mesures adéquates. Il s'agit notamment des effets pouvant s'exercer sur les captages d'intérêt public, les zones de protection ou les périmètres de protection des eaux souterraines dans lesquels s'appliquent aussi les dispositions de la planification en matière de protection des eaux souterraines. Il convient en outre de tenir compte des perturbations de la végétation liées aux modifications du niveau des eaux souterraines.

3.5.5 Estimation des coûts

Les coûts des mesures doivent être déterminés, car ils servent de base pour évaluer et apprécier les différentes variantes et, en particulier, la proportionnalité des dépenses. L'estimation des coûts doit inclure les postes suivants avec une exactitude de $\pm 30\%$ similaire à celle de l'étude préliminaire :

- Coûts des investissements
 - Coûts de l'étude de projet
 - Coûts de construction
 - Acquisition de terrains
 - Coûts inhérents aux risques
- Coûts récurrents
 - Coûts des mesures d'exploitation
 - Coûts de l'entretien des constructions et des installations⁸
 - Pertes de rendement dues à une production réduite par les mesures mises en œuvre au niveau des centrales hydroélectriques
- Coûts du suivi de l'efficacité

Afin de pouvoir comparer les coûts des mesures constructives avec ceux des mesures d'exploitation, il convient soit de convertir les coûts d'investissement en coûts annuels, soit de capitaliser les coûts annuels sur toute la durée d'exploitation. Pour les mesures mises en œuvre au niveau de centrales hydrauliques, la durée d'exploitation est fixée à 40 ans, ce qui correspond à la durée de financement des mesures d'exploitation prévue dans la législation (annexe 3, ch. 1, OEne). Pour les mesures mises en œuvre sur des installations non liées à la force hydraulique, la durée d'exploitation prise en compte est celle des ouvrages, laquelle est calculée sur la base de normes SIA.

⁸ Ces coûts ne sont toutefois pas imputables et ne sont pas indemnisés.

3.6 Étape 5 : Élaborer et apprécier les variantes de mesures

3.6.1 Introduction

Objectifs et résultats escomptés

Cette étape consiste à choisir les mesures du catalogue qui remplissent les objectifs définis pour le cours d'eau et qui sont réalisables et proportionnées. Voici les résultats escomptés de cette étape :

- une liste de variantes qui récapitule les mesures à réaliser sur les différentes installations dans le bassin versant ;
- une explication des critères d'évaluation des variantes ;
- une matrice d'appréciation des variantes.

Le catalogue de mesures dressé au cours de l'étape antérieure permet de combiner les mesures réalisables afin de composer des variantes. Une variante comporte des mesures coordonnées entre elles et devant être réalisées sur les différentes installations d'un bassin versant ou système hydrographique.

Les variantes sont évaluées selon plusieurs critères. Ceux-ci s'inspirent des exigences citées à l'art. 43a, al. 2, LEaux, qui définit les mesures en fonction des facteurs suivants :

- gravité des atteintes portées au cours d'eau,
- potentiel écologique du cours d'eau,
- proportionnalité des coûts,
- protection contre les crues et
- objectifs de politique énergétique en matière de promotion des énergies renouvelables.

3.6.2 Proportionnalité des coûts

L'évaluation d'une mesure s'articule autour du rapport entre coûts et effets visés. Ce rapport est calculé à l'aide d'une analyse coût/efficacité. L'efficacité de la mesure peut être évaluée sur la base du débit de charriage. L'évaluation s'appuie alors sur deux critères : « Débit de charriage et dynamique » et « Longueur du tronçon de cours d'eau » avec régime de charriage amélioré.

Le tab. 10 propose un schéma d'appréciation pour ces deux critères. Concrètement, les appréciations consistent à attribuer des points et à comparer les critères afin de déterminer le degré de réalisation. Dans le même temps, il faut fixer une grandeur cible pour les deux critères, c'est-à-dire fixer quelle appréciation une mesure doit au minimum obtenir (pour chaque critère, ou pour les deux). Pour le critère « Débit de charriage et dynamique », l'objectif est atteint lorsque le débit de charriage correspond au débit de charriage nécessaire ; pour le critère « Longueur du tronçon de cours d'eau », lorsqu'une grande partie du tronçon gravement atteint est revalorisée. Les mesures qui obtiennent l'appréciation minimale pour un des critères sont qualifiées d'inefficaces et inappropriées. Elles ne sont alors pas jugées proportionnées, quels que soient leurs coûts et ne doivent pas être poursuivies. Les critères sont appliqués au tronçon du système hydrographique ayant le débit de charriage nécessaire maximal ou la plus grande importance.

Tab. 10 : Appréciations possibles des effets des mesures et état cible

Critères d'évaluation	Objectif	Appréciation possible
Débit de charriage et dynamique	→	max. Le débit de charriage atteint le niveau de débit proche de l'état naturel, ou tous les matériaux charriés passent à travers l'installation. ... Le débit de charriage atteint le niveau du débit de charriage nécessaire. ... Le débit de charriage est augmenté par rapport à l'état actuel, mais le débit de charriage nécessaire n'est pas atteint. min. Le débit de charriage n'est pas augmenté, ou la dynamique du cours est entravée par des mesures complémentaires (p. ex. mesures de protection contre les crues).
Longueur du tronçon de cours d'eau avec régime de charriage amélioré	→	max. Le régime de charriage est amélioré sur l'ensemble du tronçon gravement atteint. ... Le régime de charriage est amélioré sur une grande partie du tronçon gravement atteint. ... Le régime de charriage est amélioré sur une petite partie du tronçon gravement atteint. min. Le régime de charriage n'est amélioré que sur une très petite partie du tronçon gravement atteint.

Exemple fictif de l'analyse coûts-efficacité présentant cinq variantes de mesures pour une petite installation de retenue :

- **Variante 1** : Abaisser le niveau de retenue en cas de crue et faire transiter tous les matériaux charriés à travers l'installation.
- **Variante 2** : Prélever des matériaux charriés près de la queue de retenue et en déverser une partie en aval de l'installation.
- **Variante 3** : Construire une galerie de déviation par laquelle tous les matériaux charriés transitent en cas de crue.
- **Variantes 4 et 5** : Non spécifiées.

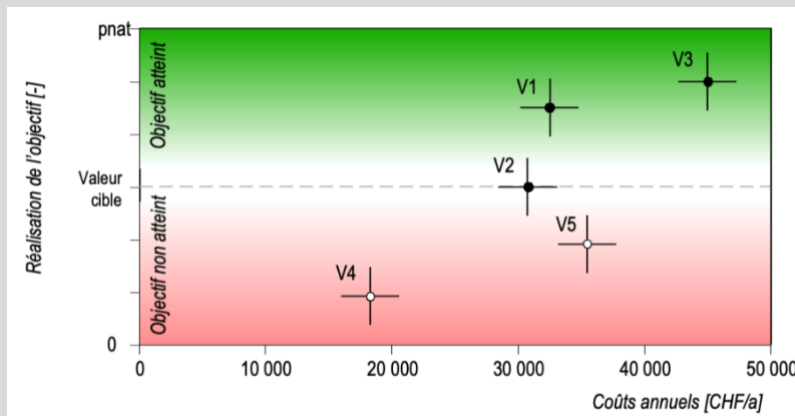
La figure 23 présente l'efficacité par rapport aux coûts pour les cinq variantes (cf. tab. 11). Les variantes V1 à V3 atteignent les objectifs, mais pas les autres. Les variantes V4 et V5 ne sont donc pas poursuivies.

Tab. 11 : Analyse coûts-efficacité

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Efficacité			
Degré de réalisation de l'objectif	Objectif largement atteint	Objectif tout juste atteint	Objectif largement atteint
Coûts			
Coûts d'investissement [millions CHF]	0,6	0,3	1,2
Coûts annuels d'investissement [CHF/a]	13 500	6750	27 000
Coûts récurrents			
Mesures d'exploitation [CHF/a]	10 000	22 000	10 000
Entretien des ouvrages [CHF/a]	4000	2000	8000
Pertes de rendement [CHF/a]	5000	0	0
Total coûts annuels [CHF/a]	32 500	30 750	45 000
Efficacité par rapport aux coûts	haute	moyenne	moyenne

Fig. 23 : Comparaison des variantes de mesures : appréciation de l'efficacité et des coûts

L'abscisse représente les coûts annuels des mesures, l'ordonnée le degré de réalisation de l'objectif (efficacité). Les variantes V1 à V3 atteignent les objectifs, mais pas les variantes 4 et 5.



3.6.3 Gravité des atteintes, potentiel écologique, protection contre les crues et objectifs de politique énergétique

En plus de la proportionnalité des coûts, les mesures doivent répondre à d'autres critères : la gravité des atteintes portées au cours d'eau, le potentiel écologique de celui-ci, la protection contre les crues et les objectifs de politique énergétique en matière de promotion des énergies renouvelables. Ces critères sont donc à apprécier pour chaque variante. Le tableau 12 propose des appréciations possibles. Les zones alluviales d'importance nationale possèdent en principe une grande valeur environnementale et présentent de ce fait un haut potentiel écologique.

Tab. 12 : Ensemble de critères pour apprécier les mesures

Critères d'évaluation	Appréciation possible	
Atteintes portées au débit de charriage dans l'état actuel	max. ... min.	Atteinte très grave dans l'état actuel. Atteinte grave dans l'état actuel. Atteinte importante dans l'état actuel.
Potentiel écologique du cours d'eau avec débit de charriage amélioré	max. min.	Le cours d'eau se trouve dans une zone alluviale d'importance nationale. Le cours d'eau est peu modifié dans son écomorphologie, ou il est dans un état presque naturel, ou une revitalisation prochaine apportera une grande utilité pour la nature et le paysage. Le cours d'eau est fortement modifié dans son écomorphologie, ou il est peu naturel et une revitalisation apportera une utilité moyenne pour la nature et le paysage. Le cours d'eau est fortement modifié dans son écomorphologie, ou il est peu naturel et une revitalisation n'apportera aucune utilité pour la nature et le paysage.
Effets sur la protection contre les crues (s'ils ne sont pas évités par des mesures complémentaires)	aucun graves	La capacité d'écoulement dans le lit n'est pas altérée, ou très peu, et aucun objectif de protection contre les crues n'est compromis. Les objectifs de protection contre les crues pour la catégorie d'objet 2.2 sont compromis par la mesure ⁹ . Les objectifs de protection contre les crues pour les catégories d'objet 2.3 et 3.1 sont compromis par la mesure. Les objectifs de protection contre les crues pour les catégories d'objet 3.2 et 3.3 sont compromis par la mesure.
Atteinte portée à la production d'énergies renouvelables (à n'évaluer que dans le cas de mesures ayant des effets sur les centrales hydroélectriques)	aucune grave	La production d'électricité de la centrale hydroélectrique n'est pas touchée. La production d'électricité de la centrale hydroélectrique est peu réduite. La production d'électricité de la centrale hydroélectrique est fortement réduite. La production d'électricité de la centrale hydroélectrique est impossible.

La comparaison des variantes peut faire ressortir d'autres aspects dans l'appréciation, comme l'intérêt national dans la production énergétique¹⁰ (en particulier dans le cas de zones alluviales d'importance nationale), les émissions (p. ex. émissions de CO₂ et nuisances sonores dues au transport de gravier), l'utilisation des ressources (p. ex. besoins fonciers pour les mesures constructives), augmentation de la turbidité ou impact sur les eaux souterraines (p. ex. mesure portant sur une zone de protection des eaux souterraines d'un captage d'intérêt public). Ces aspects doivent être pris en compte au cas par cas.

⁹ Catégories d'objets et objectifs de protection contre les crues selon OFAT, OFEG et OFEFP (2005) : Aménagement du territoire et dangers naturels.

¹⁰ L'art. 8, al. 1, OEne définit à partir de quel moment une installation hydroélectrique est susceptible de revêtir un intérêt national. Les nouvelles installations hydroélectriques sont considérées d'intérêt national si elles atteignent une production moyenne attendue d'au moins 20 GWh par an, ou une production moyenne attendue d'au moins 10 GWh par an et au moins 800 heures de capacité de retenue à pleine puissance. Les installations hydroélectriques existantes revêtent un intérêt national si, suite à leur agrandissement ou leur rénovation, elles atteignent une production moyenne attendue d'au moins 10 GWh par an, ou une production moyenne attendue d'au moins 5 GWh et au moins 400 heures de capacité de retenue à pleine puissance.

Exemple fictif. Les trois variantes restantes de l'exemple cité plus haut sont appréciées selon le tableau 13.

Tab. 13 : Matrice d'appréciation

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Proportionnalité des coûts	élevée	moyenne	moyenne
Gravité des atteintes dans l'état actuel	forte	forte	forte
Potentiel écologique du cours d'eau	grand	grand	grand
Atteinte à la protection contre les crues	aucune	aucune	aucune
Atteinte à la production d'énergie renouvelable	faible	aucune	aucune

3.7 Étape 6 : Retenir la meilleure variante

Objectifs et résultats escomptés

Cette étape sert à déterminer la meilleure variante pouvant faire ensuite l'objet d'une décision.

- Raisons du choix de la meilleure variante.
- Estimation de la proportionnalité de la meilleure variante.

Évaluation globale

Le choix de la mesure la plus appropriée (variante retenue) requiert une évaluation globale d'après les critères définis au point 3.6. Il nécessite aussi, surtout dans les cas compliqués, une vue d'ensemble de la problématique, de l'expérience et de l'expertise.

La pesée des intérêts qui s'impose constitue un jugement de valeur qui doit être porté au cas par cas et qui, de ce fait, peut difficilement être schématisé. Néanmoins, le choix de la meilleure variante doit à chaque fois être clairement documenté et expliqué.

La variante retenue doit en principe 1) atteindre les objectifs d'assainissement, 2) être proportionnée et 3) assurer autant que possible la continuité du charriage à travers l'installation.

Exemple fictif. Dans l'exemple présenté au point 3.6, les variantes V1 à V3 ont été évaluées, sur les cinq proposées initialement. La variante V1 est retenue pour les raisons suivantes.

- Elle permet la meilleure réalisation de l'objectif, comme la variante 3.
- Elle apporte autant d'utilité que la variante 3, mais elle est bien moins coûteuse.
- Elle est aussi onéreuse que la variante 2, mais elle apporte une utilité bien plus grande.
- La variante 1 répond au principe de continuité intégrale de charriage à travers l'installation.

Proportionnalité

La variante retenue peut faire l'objet d'une décision de mise en œuvre si elle est considérée comme proportionnée, c'est-à-dire si elle remplit les critères suivants :

- La mesure est appropriée pour atteindre les objectifs d'assainissement.
- La mesure est nécessaire, c'est-à-dire que, d'une part, il existe une atteinte grave au sens de l'art. 43a LEaux et, d'autre part, l'objectif d'assainissement ne peut être atteint avec une mesure plus modérée, c'est-à-dire moins onéreuse.
- La mesure a un coût qui est en rapport raisonnable avec l'effet recherché.
- La mesure est acceptable, c'est-à-dire que l'ingérence qui résulte au regard du statut juridique des particuliers apparaît négligeable par rapport aux intérêts publics poursuivis. De plus, la mesure n'exerce pas d'autres effets excessivement négatifs.

Assainissement partiel et renouvellement de la concession

Le document « Assainissement écologique de la force hydraulique : assainissement partiel »¹¹ de l'OFEV précise les conditions à remplir pour que des assainissements partiels soient admissibles et puissent donner lieu à une indemnisation, et présente le cas de figure d'un renouvellement ultérieur de la concession.

3.8 Étape 7 : Coordonner les mesures de protection des eaux

Objectifs et résultats escomptés

Cette étape entend montrer comment les mesures d'assainissement du régime de charriage peuvent être coordonnées avec d'autres mesures prises sur le cours d'eau.

- Liste des autres mesures adoptées dans le bassin versant et des possibles synergies, opportunités ou conflits vis-à-vis des mesures d'assainissement du régime de charriage.

Coordination avec les revitalisations

Le charriage déploie au mieux ses effets écologiques dans les cours d'eau proches de l'état naturel ou revitalisés. À l'inverse, l'effet des revitalisations est en général minime lorsque le débit de charriage ne se révèle pas suffisant pour créer des structures. Par conséquent, il est important que les mesures d'assainissement du régime de charriage et les mesures de revitalisation soient étroitement coordonnées entre elles et rapidement mises en œuvre.

Coordination avec les mesures de protection contre les crues

En matière de projets d'aménagement des eaux, la règle est d'exploiter les synergies et les opportunités à des fins de protection contre les crues et de revitalisation des cours d'eau. En conséquence, les mesures d'assainissement du régime de charriage peuvent – et doivent – être combinées avec des mesures de protection contre les crues, et inversement. Les conflits d'objectifs potentiels entre protection contre les crues et assainissement du régime de charriage devraient être résolus dès la planification des mesures.

¹¹ https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/wasser/fachinfo-daten/oekologische-sanierung-wasserkraft-fragestellungen-zur-teilsanierung.pdf.download.pdf/%C3%96kologische_Sanierung_Wasserkraft_-_Fragestellungen_zur_Teilsanierung_-_Webversion.pdf

Coordination avec les mesures appliquées aux centrales hydroélectriques

Concernant les centrales hydroélectriques, il convient le cas échéant d'adopter également des mesures pour assainir le régime des éclusées, d'assurer la libre migration des poissons, ou encore de sécuriser ou d'assainir les débits résiduels. Pour le détenteur de l'installation, il peut être utile de combiner ces mesures avec l'assainissement du régime de charriage, surtout lorsqu'il doit procéder à des transformations du bâti.

Moment de la mise en œuvre des mesures

Les options de coordination mentionnées plus haut ne signifient pas que les mesures d'assainissement du régime de charriage doivent uniquement être prises au moment où est réalisée une revitalisation, ou un assainissement du régime d'éclusées. Comme les grands systèmes hydrographiques réagissent lentement aux modifications du régime de charriage, les mesures d'assainissement le concernant doivent toujours être introduites le plus rapidement possible. La plupart des systèmes hydrographiques comportent des tronçons de cours d'eau où un assainissement du régime de charriage peut déployer ses effets sans revitalisation. La mise en œuvre des mesures devra avoir débuté au plus tard à la fin de l'année 2030.

3.9 Étape 8 : Définir la stratégie du suivi de l'efficacité

Objectifs et résultats escomptés

Cette étape doit préciser comment et dans quelle mesure les effets des mesures seront contrôlés.

Voici les résultats escomptés de cette étape :

- une liste des indicateurs choisis et les motifs justifiant ces choix,
- la spécification des tronçons étudiés et des tronçons de référence,
- le calendrier des relevés y compris du relevé de l'état actuel avant la mise en œuvre des mesures,
- les coûts prévisionnels du suivi de l'efficacité,
- la coordination avec le suivi de l'efficacité d'autres mesures.

Le but, la méthode et l'ampleur du suivi de l'efficacité sont précisés au chapitre 4. L'annexe H décrit en détail les indicateurs possibles.

3.10 Marche à suivre simplifiée

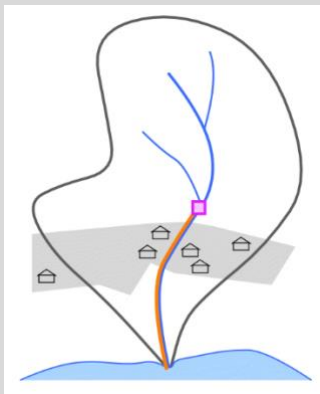
Dans le cadre de la marche à suivre simplifiée, les mesures d'assainissement du régime de charriage sont mises en œuvre de manière progressive. Le débit de charriage est augmenté progressivement, jusqu'à ce que tous les matériaux retenus dans les installations puissent, dans le meilleur des cas, être restitués au cours d'eau. Une attention particulière est portée au suivi de l'efficacité, lequel sert principalement à optimiser les mesures en sondant les limites du débit de charriage possible. Les différentes étapes de travail se déroulent alors de manière extrêmement simplifiée :

- Étape 1 : L'analyse de la situation se contente d'indiquer dans quelle mesure le débit de charriage est réduit par les installations. La description morphologique de l'état proche de l'état naturel et de l'état actuel peut être supprimée.
- Étape 2 : Le débit de charriage nécessaire du cours d'eau correspond au débit maximal possible sans avoir à recourir à des mesures complémentaires disproportionnées de protection contre les crues. Le débit de charriage n'est pas défini a priori, mais établi de manière empirique lors de la mise en œuvre des mesures.
- Étape 3 : L'objectif d'assainissement de l'installation est de restaurer une continuité de charriage si possible totale.
- Étape 4 : Le catalogue de mesures est en principe le même que celui décrit au point 3.5. Dans les petits bassins versants comptant une seule installation, l'éventail des mesures possibles est toutefois souvent limité.
- Étape 5 : La longueur du tronçon avec régime de charriage amélioré est le critère le plus important pour le suivi des résultats de la variante.
- Étape 6 : Deux aspects conditionnent le choix de la meilleure variante : les coûts et la possibilité d'élargir progressivement les mesures.
- Étape 7 : La coordination avec les autres mesures adoptées dans le bassin versant est souvent supprimée.
- Étape 8 : Le suivi de l'efficacité sert avant tout à vérifier si la mesure fonctionne (les matériaux charriés sont-ils mobilisés dans les installations ou au niveau des sites de déversement ?) et à adapter le cas échéant le débit de charriage en l'augmentant ou le réduisant. Éventuellement, il convient également d'observer la modification du niveau moyen du lit afin de repérer et de réduire au strict minimum les risques de crue.

Exemple fictif pour la marche à suivre simplifiée

Dans cet exemple fictif, un petit ruisseau piscicole se jette dans un lac. La seule installation à assainir est un dépotoir à alluvions situé en amont d'une zone d'habitation.

Fig. 24 : Petit bassin versant avec dépotoir à alluvions (carré rosé) en amont d'une zone d'habitation (surface grise)



- Étape 1 : L'exploitation périodique du dépotoir permet de conclure, selon les données recueillies sur de nombreuses années, qu'en moyenne 25 m³ de matériaux charriés y sont retenus.
- Étape 4 : Les mesures suivantes sont envisageables : transformer l'ouvrage de restitution du dépotoir à alluvions (M1.4) ; démanteler le dépotoir à alluvions (M1.12) ; déverser du gravier du dépotoir en aval de la zone d'habitation (M2.4) et combiner M1.4 et M2.4.
- Étape 5 : Le démantèlement du dépotoir à alluvions (M1.12) requiert la mise en œuvre de mesures complémentaires de protection contre les crues coûteuses et disproportionnées dans la zone d'habitation. Il n'est donc pas recommandé d'y recourir. Le seul site de déversement de gravier adapté se trouvant en aval de la zone d'habitation, la mesure M2.4 ne peut déployer son effet que sur un tronçon très court.
- Étape 6 : La combinaison de deux mesures semble être la meilleure variante : transformer l'ouvrage de restitution (M1.4) et déverser du gravier en aval (M2.4). Il convient d'abord de mettre en œuvre la mesure constructive M1.4, avant de la compléter avec la mesure d'exploitation M2.4 quelques années plus tard. Les déversements de gravier peuvent être augmentés, dans la mesure où les dépôts sur le fond du lit ne compromettent pas la protection contre les crues.
- Étape 8 : Lors du suivi de l'efficacité, l'indicateur A1 (dépôts de matériaux charriés, tab. 14) permet de vérifier que la mesure fonctionne. Dans les tronçons soumis au risque de crues, l'indicateur A7 (tab. 14) mesure le niveau moyen du fond du lit. Les indicateurs sont relevés tous les deux ans.

4 Suivi de l'efficacité

4.1 Introduction

But du suivi de l'efficacité

Le suivi de l'efficacité et le suivi de la mise en œuvre sont les deux composantes du suivi des résultats (cf. point 2.1). Le suivi de l'efficacité a pour but de montrer que les atteintes graves portées au cours d'eau par un régime de charriage modifié ont pu être éliminées par les mesures adoptées pour les installations existantes et pourront donc être évitées pour les installations futures.

Le suivi de l'efficacité sert aussi à optimiser les mesures, en particulier les mesures d'exploitation. Il permet de corriger les incertitudes inhérentes à la définition des mesures, à leur dimensionnement et à l'estimation de leurs effets, notamment en matière de protection contre les crues. Il s'applique tout particulièrement lorsque des mesures sont mises en œuvre pour la première fois.

Enfin, le suivi de l'efficacité permet de rendre compte au public de l'utilisation judicieuse des ressources. Afin que les expériences acquises avec différentes mesures puissent profiter aussi aux projets d'assainissement mis en place sur d'autres cours d'eau, la méthode, les indicateurs et l'ampleur des suivis de l'efficacité doivent être aussi uniformes que possible et respecter les recommandations mentionnées ici.

Étapes de travail

Le suivi de l'efficacité se déroule en quatre étapes (fig. 25). Il convient de relever l'état actuel du cours d'eau avant de mettre en œuvre la première mesure (étape 1). Une fois la mesure mise en œuvre, il s'agit de vérifier sur le terrain si celle-ci fonctionne (p. ex. si le gravier déversé est mobilisé) et d'observer comment l'état du cours d'eau évolue au fil du temps, au moyen des indicateurs abiotiques et biotiques sélectionnés (étape 2). À partir des résultats de ces mesures, il faut ensuite vérifier si l'objectif est réalisé (étape 3) et en déduire s'il existe ou non un besoin d'adaptation des mesures (étape 4).

Fig. 25 : Étapes du suivi de l'efficacité

Selon l'indicateur, il faut procéder à plusieurs relevés et mesures pour pouvoir démontrer l'efficacité.

Étapes	Points
1) Relever l'état actuel du cours d'eau avant la mise en œuvre des mesures	4.2 - 4.3
2) Relever l'état du cours d'eau après la mise en œuvre des mesures	4.2 - 4.3
3) Vérifier la réalisation de l'objectif	4.4
4) Adaptation des mesures	4.5

Coordination

Le suivi de l'efficacité devrait être coordonné avec celui des autres mesures de protection des eaux, en particulier en matière de revitalisation et d'assainissement de la migration des poissons. Cela évite les doublons et permet d'exploiter les synergies, notamment pour relever les indicateurs biotiques. Certains des indicateurs mentionnés plus bas sont également recommandés pour le suivi de l'efficacité des revitalisations à l'échelle nationale (OFEV 2021).

Coûts du suivi de l'efficacité

Les coûts du suivi de l'efficacité doivent être en rapport raisonnable avec

- les coûts et l'importance de la mesure d'assainissement et
- l'importance écologique du cours d'eau.

C'est pourquoi le suivi de l'efficacité utilise des indicateurs différents selon l'ampleur de la mesure et l'importance écologique du cours d'eau.

4.2 Indicateurs

Les indicateurs permettent de vérifier si les objectifs fixés sont réalisés, autrement dit, si les mesures adoptées déploient bien l'effet escompté. Les indicateurs biotiques et abiotiques proposés ici (tab. 14 et tab. 15) conviennent pour déterminer si les mesures fonctionnent avec le débit de charriage nécessaire, si les objectifs concrets définis pour la morphologie et le niveau du fond du lit ont été réalisés et si l'objectif général de ne pas causer d'atteinte grave à la faune et la flore indigènes et à leurs biotopes a bien été atteint.

Pour être pertinents et utiles, les indicateurs doivent :

- être mesurables,
- réagir fortement aux mesures,
- réagir rapidement,
- être autant que possible indépendants d'autres facteurs d'influence,
- être peu ou pas corrélés à d'autres indicateurs relevés en même temps.

Tab. 14 : Indicateurs abiotiques

Indicateurs	Que permettent-ils de vérifier ?
• A1 Dépôts de matériaux charriés dans les installations ou au niveau des sites de déversement	Fonctionnement d'une mesure
• A2 Débit de charriage	Atteinte du débit de charriage nécessaire
• A3 Style fluvial • A4 Extension des dépôts de matériaux charriés • A5 Types de substrats • A6 Colmatage interne • A7 Changement du niveau moyen du fond du lit • A8 Changement du niveau du talweg	Atteinte des objectifs d'assainissement (morphologie et dynamique, protection contre les crues, régime des eaux souterraines)

Tab. 15 : Indicateurs biotiques

Indicateurs	Que permettent-ils de vérifier ?
• B1 Présence d'alevins de truites • B2 Présence de jeunes truites de rivière • B3 Nombre de frayères dans les cours d'eau des zones à truites • B4 Nombre et densité des alevins et des larves d'ombres • B5 Nombre de juvéniles des espèces rhéolithophiles (qui fraient dans le gravier des cours d'eau)	Atteinte des objectifs d'assainissement (faune, flore, biotopes)

Selon le cours d'eau à assainir, et en particulier s'il s'agit d'une zone alluviale, d'autres indicateurs biotiques, décrivant aussi les biotopes et organismes terrestres et amphibiens, doivent être utilisés. Comme le relevé et l'analyse de ces indicateurs sont néanmoins nettement plus onéreux que ceux des indicateurs biotiques du tableau 15, il ne faut y recourir qu'au cas par cas et éventuellement en coordination avec le suivi des résultats des revitalisations¹² :

- la composition et l'abondance du macrozoobenthos,
- la succession des associations et formations végétales,
- la composition de la population de coléoptères,
- la composition de la population de petits mammifères,
- la reproduction du Pluvier petit-gravelot.

Les indicateurs et méthodes de relevés ainsi que les particularités à prendre en considération sont décrits en détail à l'annexe H.

Intervalles et durée des mesures

Le relevé de l'état actuel avant mise en œuvre de la mesure est nécessaire pour que l'efficacité de la mesure puisse être qualifiée et quantifiée.

L'intervalle entre les mesures dépend du type d'indicateur. Outre les contrôles effectués régulièrement, un monitoring de suivi des événements, par exemple après des épisodes de crue ou avant et après des crues artificielles, peut également être envisagé.

Les indicateurs biotiques ont un fort caractère de saisonnalité. Le suivi de l'efficacité doit donc être planifié suffisamment en amont. Compte tenu du réchauffement climatique, certains décalages, notamment des périodes de frai, peuvent survenir et doivent également être pris en compte dans la planification.

Par ailleurs, il convient de compenser les écarts apparaissant dans les relevés réalisés sur plusieurs années en prenant en compte le fait que les paramètres biologiques varient souvent fortement d'une année sur l'autre sous l'effet de divers facteurs d'influence. Cela signifie que les indicateurs correspondants doivent être relevés plusieurs fois et sur de longues périodes afin d'en tirer des affirmations relativement fiables (voir point 4.3).

La durée du suivi de l'efficacité dépend du temps de réaction des processus déterminants. Comme les modifications du régime de charriage ne se manifestent qu'avec les crues, le temps de réaction peut être plus ou moins long. En outre, le régime de charriage des grands cours d'eau répond lentement aux changements. Selon les circonstances, il faut attendre plusieurs épisodes de crue charriant des matériaux avant que des changements puissent être remarqués pour certains indicateurs (voir point 4.3).

¹² On entend ici par coordination l'utilisation des relevés d'autres mesures effectuées sur le cours d'eau, afin d'aboutir à des conclusions plus approfondies sur l'efficacité de l'assainissement.

Tronçons d'échantillonnage et tronçons de contrôle

Les tronçons d'échantillonnage sont ceux pour lesquels des objectifs ont été définis, c'est-à-dire les tronçons pour lesquels la largeur du lit ou la situation hydraulique permettent d'escompter une très grande efficacité. Le nombre de tronçons d'échantillonnage dépend de la longueur du tronçon concerné par la mesure d'assainissement.

Par ailleurs, il importe d'examiner, au moins pour les indicateurs biotiques, s'il faut intégrer dans les contrôles un tronçon qui n'est pas touché par les mesures d'assainissement. Un tel tronçon se situe en général en amont de l'installation à assainir, ce qui permet d'évaluer les influences plus globales s'exerçant sur la biocénose qui ne sont pas induites par l'assainissement du régime de charriage. Il s'agit notamment des changements climatiques, de la fréquence et de l'intensité des crues, de la présence de parasites et de prédateurs, de l'utilisation de l'eau (éclusées, débits résiduels) et d'autres influences anthropiques.

4.3 Ampleur du suivi de l'efficacité

Compte tenu des retours obtenus jusqu'ici sur la mise en œuvre, les coûts et le fonctionnement des différents indicateurs, nous proposons que les indicateurs abiotiques A1 à A8 (tab. 14) soient toujours utilisés lorsque cela s'avère judicieux. Parmi les indicateurs biotiques, on privilégiera pour le suivi de l'efficacité ceux se rapportant à la faune piscicole, en lien avec la région ichtyobiologique (B1-B5, tab. 15). L'ampleur du suivi de l'efficacité est fonction de la taille du cours d'eau, car celle-ci est en général étroitement corrélée avec :

- la dynamique liée aux événements et donc le temps de réaction du cours d'eau,
- l'importance écologique du cours d'eau,
- les dimensions et les coûts de la mesure d'assainissement.

Sont proposés ci-après les indicateurs à relever, les intervalles de mesure et la durée du suivi des résultats pour quatre types de taille de cours d'eau (tab. 16).

Petits cours d'eau

Un suivi complet de l'efficacité est généralement disproportionné pour les petits cours d'eau. Un suivi simple à l'aide des indicateurs A5 « Types de substrats », A6 « Colmatage interne » et A7 « Changement du niveau moyen du fond du lit » est suffisant.

Dans le cadre de la marche à suivre simplifiée dans les petits bassins versants, il suffit de montrer que la mesure fonctionne (indicateur A1 « Dépôts de matériaux charriés dans les installations ou au niveau des sites de déversement » ou A2 « Débit de charriage ») et de vérifier qu'elle ne compromet pas outre mesure la protection contre les crues (indicateur A7 « Changement du niveau moyen du fond du lit »).

Moyens cours d'eau

Dans les cours d'eau de taille moyenne (p. ex. Ergolz, Gürbe, Reppisch), le projet d'assainissement doit être considéré dans le contexte de l'ensemble du tronçon et de son potentiel écologique. Si le potentiel écologique du tronçon est faible, le relevé des indicateurs abiotiques est suffisant. Si le potentiel écologique est grand, il faut aussi relever plusieurs fois les indicateurs biotiques de la faune piscicole, en particulier ceux portant sur la reproduction des truites de rivière (indicateurs B1-3). Un examen sur cinq ans est la durée minimale à prendre en considération.

Grands cours d'eau

Dans les grands cours d'eau (p. ex. Areuse, Emme, Simme, Thur), le projet d'assainissement doit être considéré par rapport au potentiel écologique de l'ensemble du tronçon concerné. Si aucune autre revitalisation ou mesure de protection des eaux n'est prévue à moyen terme (< 10 ans), ou si les effets de l'assainissement du régime de charriage se limitent à un court tronçon (< 3 km) de faible potentiel écologique, le suivi de l'efficacité peut être réduit à deux ou trois relevés des indicateurs abiotiques. Si d'autres revitalisations sont prévues ou si l'importance écologique est grande, il faut procéder à un suivi de l'efficacité recourant aux indicateurs biotiques et abiotiques. En fonction de la mesure (unique ou répétée sur plusieurs années), la durée du suivi devrait s'étendre sur cinq à sept ans, voire plus. Les indicateurs biotiques doivent être relevés tous les ans pour pouvoir identifier avec suffisamment de certitude les effets des mesures sur la faune piscicole lithophile.

Très grands cours d'eau

Dans les très grands cours d'eau (p. ex. l'Aar en aval de Thoune, le Rhin alpin et le haut Rhin, la Limmat en aval de Zurich, la Reuss en aval de Lucerne, le Rhône en aval de Viège, le Tessin en aval de Bellinzone), le suivi de l'efficacité doit être réalisé sur une période de cinq à dix ans au minimum après réalisation des mesures d'assainissement. Les indicateurs abiotiques doivent être relevés tous les deux ans, ou après de grandes crues, et les indicateurs biotiques tous les ans. L'interprétation des données biologiques doit également tenir compte des conditions de débit et de l'évolution des températures pour pouvoir identifier l'impact global sur le développement des populations de poissons lithophiles. Pour vérifier le type et l'ampleur des mesures d'assainissement et leur efficacité, il convient de dresser un bilan provisoire tous les deux ou trois ans au moyen des résultats intermédiaires obtenus et d'adapter au besoin les mesures mises en œuvre.

Tab. 16 : Types d'indicateurs selon la taille du cours d'eau et le potentiel écologique

Taille du cours d'eau	Superficie du bassin versant, débit moyen	Potentiel écologique	Indicateurs abiotiques	Indicateurs biotiques
Petit	< 20 km ² < 0,5 m ³ /s	Faible à moyen	x*	–
Moyen	20–200 km ² 0,5–5,0 m ³ /s	Faible à moyen	x	–
		Élevé	x	x
Grand	200–2000 km ² 5,0–50 m ³ /s	Faible à moyen (pas de revitalisation prévue ou tronçon assaini < 3 km)	x	–
		Élevé (revitalisation prévue ou tronçon assaini ≥ 3 km)	x	x
Très grand	> 2000 km ² > 50 m ³ /s	Élevé	x	x

* avec nombre limité d'indicateurs, voir texte principal.

4.4 Vérifier que l'objectif est atteint

L'analyse des grandeurs mesurées pour les différents indicateurs permet de vérifier le degré de réalisation de l'objectif. Pour ce faire, on compare l'état avant mise en œuvre des mesures (état actuel) et l'état après mise en œuvre avec l'état cible.

L'objectif est en principe atteint lorsque les indicateurs déterminants obtiennent l'appréciation « bien ». Des écarts par rapport à cette évaluation sont admis pour quelques indicateurs. La comparaison systématique des états (voir exemple fictif à la fig. 26) sert à faciliter l'interprétation. Concrètement, le résultat doit toutefois être validé par un avis d'expert.

Fig. 26 : Degré de réalisation de l'objectif de la mesure

Exemple fictif.

Indicateur	État actuel avant mesures			État après mesures			Appréciation
	Tronçon			Tronçon			
	a	b	c	a	b	c	
A2 Débit de charriage	2	2	1	5	4	3	
A3 Style fluvial	3	3	2	4	3	3	
A4 Dépôts de matériaux charriés	2	1	1	4	4	3	
A5 Types de substrat	2	1	1	4	4	4	
A6 Colmatage	1	2	1	4	4	4	
B1 Présence d'alevins de truites	2	2	2	4	4	2	
B3 Nombre de frayères	2	2	1	4	4	3	
							5 Très bon
							4 Bon
							3 Moyen
							2 Médiocre
							1 Mauvais

4.5 Optimisation de la mesure

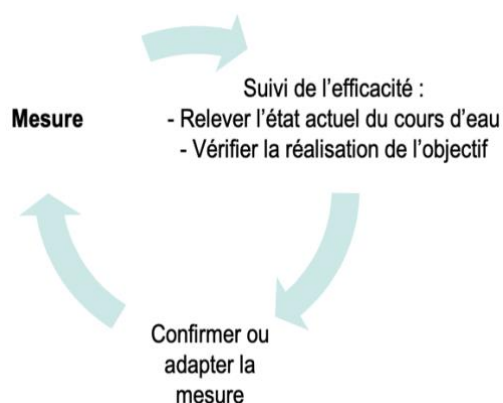
Le suivi de l'efficacité permet d'en déduire des conséquences pour la mesure, car il fait partie du processus d'optimisation (fig. 27). Voici les scénarios envisageables :

- Tous les indicateurs ont au moins obtenu l'appréciation « bien » (pour les écarts de certains indicateurs, cf. point 4.4) : la mesure est poursuivie avec la même ampleur.
- Ni l'indicateur « Débit de charriage » ni les autres indicateurs biotiques et abiotiques n'ont obtenu l'appréciation « bien ». La mesure est inappropriée et son ampleur est insuffisante, elle doit être adaptée.
- L'indicateur « Débit de charriage » a obtenu l'appréciation « bien », mais pas les autres indicateurs biotiques et abiotiques : soit la durée de la mesure ne suffit pas encore pour atteindre l'objectif et la mesure est alors poursuivie, soit le débit de charriage nécessaire doit être révisé à la hausse et la mesure doit être adaptée.
- L'indicateur « Débit de charriage » a tout au plus obtenu l'appréciation « moyen », les autres indicateurs biotiques et abiotiques ont en revanche obtenu l'appréciation « bien » : la mesure est poursuivie avec la même ampleur, le débit de charriage nécessaire peut être révisé à la baisse.

Si le suivi de l'efficacité aboutit à la conclusion que les mesures mises en œuvre ne permettent pas de réaliser les objectifs d'assainissement, le canton peut demander à ce que des mesures supplémentaires soient prises. Dans le cas d'installations hydroélectriques, le détenteur peut alors adresser une nouvelle demande d'indemnisation au sens de l'art. 28 OEn.

Fig. 27 : Suivi de l'efficacité en tant que partie du processus d'optimisation de la mesure

Si les objectifs ne peuvent être atteints, la mesure doit être adaptée.





Annexes

Régime de charriage – Mesures

Un module de l'aide à l'exécution Renaturation
des eaux

Annexe A – Bases légales

Loi fédérale du 24 janvier 1991 sur la protection des eaux (LEaux, RS 814.20)

Art. 43a Régime de charriage

- 1 Le régime de charriage d'un cours d'eau ne doit pas être modifié par des installations au point de porter gravement atteinte à la faune et à la flore indigènes et à leurs biotopes, au régime des eaux souterraines et à la protection contre les crues. Les détenteurs de ces installations prennent les mesures nécessaires.
- 2 Les mesures sont définies en fonction des facteurs suivants :
 - a. gravité des atteintes portées au cours d'eau ;
 - b. potentiel écologique du cours d'eau ;
 - c. proportionnalité des coûts ;
 - d. protection contre les crues ;
 - e. objectifs de politique énergétique en matière de promotion des énergies renouvelables.
- 3 Dans le bassin versant du cours d'eau concerné, les mesures doivent être coordonnées après consultation des détenteurs des installations concernées.

Art. 44 Exploitation de gravier, de sable ou d'autres matériaux

- 1 Quiconque entend exploiter du gravier, du sable ou d'autres matériaux ou entreprendre des fouilles préliminaires à cette fin doit obtenir une autorisation.
- 2 Ces exploitations ne sont pas autorisées :
 - a. dans les zones de protection des eaux souterraines ;
 - b. au-dessous du niveau des nappes souterraines exploitées ;
 - c. dans les cours d'eau, lorsque le débit solide charrié ne compense pas les prélèvements.

Art. 50 Information et conseils

- 1 La Confédération et les cantons examinent les résultats des mesures prises en vertu de la présente loi et informent le public sur la protection des eaux et sur l'état de celles-ci, en particulier : a. ils publient les relevés relatifs aux effets des mesures prévues par la présente loi ; b. ils peuvent publier, après avoir consulté les intéressés et pour autant que les informations concernées soient d'intérêt général, les résultats des relevés et des contrôles effectués dans les eaux privées et dans les eaux publiques (art. 52).

Art. 62b Revitalisation des eaux

- 1 Dans les limites des crédits accordés et sur la base de conventions-programmes, la Confédération alloue aux cantons des indemnités sous la forme de contributions globales pour la planification et la mise en œuvre de mesures destinées à revitaliser les eaux.
- 2 Des indemnités peuvent être allouées aux cantons au cas par cas pour des projets particulièrement onéreux.
- 3 Le montant des indemnités est fixé en fonction de l'importance des mesures pour le rétablissement des fonctions naturelles des eaux et en fonction de leur efficacité.
- 4 Aucune contribution n'est versée pour le démantèlement d'une installation auquel le détenteur est tenu de procéder.
- 5 Les exploitants de l'espace réservé aux eaux sont indemnisés selon la loi du 29 avril 1998 sur l'agriculture pour l'exploitation extensive de leurs surfaces. Le budget et le plafond des dépenses agricoles sont augmentés en conséquence.

Art. 83a Mesures d'assainissement

Les détenteurs de centrales hydroélectriques existantes et d'autres installations situées sur des cours d'eau sont tenus de prendre les mesures d'assainissement conformes aux exigences prévues aux art. 39a et 43a dans un délai de 20 ans à compter de l'entrée en vigueur de la présente disposition.

Art. 83b Planification et rapport

- ¹ Les cantons planifient les mesures visées à l'art. 83a et fixent les délais de leur mise en œuvre. Cette planification comprend également les mesures que doivent prendre les détenteurs de centrales hydroélectriques conformément à l'art. 10 de la loi fédérale du 21 juin 1991 sur la pêche.
- ² Les cantons remettent leur planification à la Confédération le 31 décembre 2014 au plus tard.
- ³ Ils présentent tous les quatre ans à la Confédération un rapport sur les mesures mises en œuvre.

Ordonnance du 28 octobre 1998 sur la protection des eaux (OEaux, RS 814.201)

Art. 42a Atteintes graves dues à une modification du régime de charriage

Une modification du régime de charriage porte gravement atteinte à la faune et à la flore indigènes et à leurs biotopes lorsque des installations telles que des centrales hydroélectriques, des sites d'extraction de gravier, des dépotoirs à alluvions ou des aménagements modifient durablement les structures morphologiques ou la dynamique morphologique des eaux.

Art. 42c Mesures d'assainissement du régime de charriage

- ¹ Dans le cas d'installations pour lesquelles des mesures s'imposent pour assainir le régime de charriage selon la planification établie, les cantons élaborent une étude sur le type et l'ampleur des mesures requises.
- ² L'autorité cantonale ordonne l'assainissement en se fondant sur l'étude visée à l'al. 1. Dans le cas de centrales hydroélectriques, les matériaux charriés doivent passer dans la mesure du possible à travers l'installation.
- ³ Avant de prendre une décision concernant des projets d'assainissement touchant des centrales hydroélectriques, l'autorité consulte l'OFEV. En prévision de la demande à déposer en vertu de l'art. 30, al. 1, OEne, l'OFEV vérifie si le projet respecte les exigences de l'annexe 3, ch. 2, OEne.
- ⁴ Sur ordre de l'autorité, les détenteurs de centrales hydroélectriques examinent l'efficacité des mesures prises.

Art. 49 Information

- ¹ L'OFEV informe la population de l'état des eaux et de leur protection, pour autant que cela présente un intérêt national ; en particulier, il rédige et publie des rapports sur l'état de la protection des eaux en Suisse. Les cantons lui fournissent les indications nécessaires.
- ² Les cantons informent la population de l'état des eaux et de leur protection sur leur territoire ; ce faisant, ils fournissent des informations sur les mesures prises et sur leur efficacité, ainsi que sur les lieux de baignade qui ne remplissent pas les conditions requises pour la baignade (annexe 2, ch. 11, al. 1, let. e).

Loi du 30 septembre 2016 sur l'énergie (LEne, RS 730.0)

Art. 34 Indemnisation au sens des législations sur la protection des eaux et sur la pêche

Le coût total des mesures prises en vertu de l'art. 83a de la loi fédérale du 24 janvier 1991 sur la protection des eaux ou de l'art. 10 de la loi fédérale du 21 juin 1991 sur la pêche doit être remboursé au détenteur d'une installation hydroélectrique (centrale hydroélectrique au sens de la législation sur la protection des eaux).

Ordonnance du 28 octobre 1992 sur la protection des zones alluviales d'importance nationale (ordonnance sur les zones alluviales, RS 451.31)

Art. 4 But visé par la protection

Les objets doivent être conservés intacts. Font notamment partie de ce but :

- a. la conservation et le développement de la flore et de la faune indigènes typiques des zones alluviales et des éléments écologiques indispensables à leur existence ;
- b. la conservation et, pour autant que ce soit judicieux et faisable, le rétablissement de la dynamique naturelle du régime des eaux et du charriage ;
- c. la conservation des particularités géomorphologiques des objets.

Art. 8 Réparation des atteintes

Les cantons veillent, chaque fois que l'occasion se présente, à ce que les atteintes portées aux objets, notamment à la dynamique naturelle du régime des eaux et du charriage, soient réparées dans la mesure du possible.

Annexe B – Bibliographie

Abegg J., Kirchhofer A. et Rutschmann P. (2013). Masterplan – Massnahmen zur Geschiebereaktivierung im Hochrhein. *Bundesamt für Energie, Bern und Regierungspräsidium Freiburg*. 115 p. ([PDF](#))

Ahmari H. et da Silva A.M.F. (2011) : Regions of bars, meandering and braiding in da Silva and Yalin's plan. *Journal of Hydraulic Research*, 49:6, 718-727. <https://doi.org/10.1080/00221686.2011.614518>. ([PDF](#))

Bezzola G. R. (2019) : Flussbau. Vorlesungsmanuskript. EPF Zurich.

Church, Michael (2006) : "Bed Material Transport and the Morphology of Alluvial River Channels." *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 34(1), 325-354.

Dietrich W. E., Kirchner J. W., Ikeda H. et Iseya F. (1989) : Sediment supply and the development of the coarse surface layer in gravel-bedded rivers. *Nature* 340(6230), 215-217. <https://doi.org/10.1038/340215a0>.

DTAP, CDCA, OFEV, ARE, OFAG (éd.) (2019) : Espace réservé aux eaux. Gewässerraum. Guide modulaire pour la détermination et l'utilisation de l'espace réservé aux eaux en Suisse. ([PDF](#))

Friedl F., Kammerer S., Vanzo D., Weitbrecht V., Vetsch D., Boes R. (2017) : Grundlagenversuche zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Geschiebefracht und Morphodynamik in Kiesflüssen. Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement. Rapport VAW 4348. VAW EPF Zurich. 89 p.

Gessler J. (1965). Der Geschiebetriebbeginn bei Mischungen untersucht an natürlichen Abpflästerungserscheinungen in Kanälen. *Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Hydrologie und Glaziologie*, **69**.

Günter A. (1971). Die kritische mittlere Sohlenschubspannung bei Geschiebemischungen unter Berücksichtigung der Deckschichtbildung und der turbulenzbedingten Sohlenschubspannungsschwankungen. *Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich*, **3**. ([PDF](#))

Hanus E., Roulier C., Paccaud G., Bonnard L. et Fragnière Y. (2014) : Besoins de valorisation des zones alluviales d'importance nationale. Assainissement du charriage, des débits résiduels, des éclusées. Revitalisation. –Aufwertungsbedarf in den Auen von nationaler Bedeutung - Sanierung von Geschiebehaushalt, Restwasser und Schwall-Sunk. Revitalisierung. *Office fédéral de l'environnement (OFEV)*, Berne. 28 pp. + annexes. ([PDF](#))

Hunziker R., Niedermayer A., Irniger A., Lehmann C., Gertsch E. et Heim G. (2014) : Abschätzung der mittleren jährlichen Geschiebelieferung in Vorfluter. Praxishilfe. *Rapport rédigé sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement*. ([PDF](#))

Leopold L. B. et Wolman M. G. (1957) : *River channel patterns: braided, meandering, and straight*. US Government Printing Office.

Marti C. (2006) : Morphologie von verzweigten Gerinnen. Ansätze zur Abfluss-, Geschiebetransport- und Kolkiefenberechnung. *Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich*, **199**, 282 p. ([PDF](#))

Métivier F. et L. Barrier (2012) : Alluvial Landscape Evolution: What Do We Know About Metamorphosis of Gravel-Bed Meandering and Braided Streams? 474-501.

Montgomery D. R. et Buffington J. M. (1997) : Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Geological Society of America Bulletin* **109.5**, 596-611. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1997\)109%3C0596:CRMIMD%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1997)109%3C0596:CRMIMD%3E2.3.CO;2).

OFAT, OFEG et OFEFP (2005) : Recommandation. Aménagement du territoire et dangers naturels. ([PDF](#))

OFEV (2014) : Adaptation aux changements climatiques en Suisse. Plan d'action 2014-2019. Deuxième volet de la stratégie du Conseil fédéral. ([PDF](#))

OFEV (2016) : Assainissement écologique des centrales hydrauliques existantes : Financement des mesures requises. Un module de l'aide à l'exécution « Renaturation des eaux ». Office fédéral de l'environnement, Berne. L'environnement pratique n° 1634. 51 p. ([PDF](#))

OFEV (2018) : Manuel sur les conventions-programmes 2020-2024. Communication de l'OFEV en tant qu'autorité d'exécution (communication destinée aux requérants). Office fédéral de l'environnement, Berne. L'environnement pratique n° 1817. 294 p. ([PDF](#))

OFEV (éd.) (2020) : Contrôle des effets des revitalisations de cours d'eau – Apprendre ensemble pour l'avenir. Office fédéral de l'environnement, Berne. ([PDF](#))

OFEV (éd.) (2023) : Détermination de la largeur naturelle du fond du lit des cours d'eau. Office fédéral de l'environnement, Berne. ([PDF](#)).

OFEV et EAWAG (éd.) (2006) : Écomorphologie Niveau C (Cours d'eau). Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau selon le système modulaire gradué. Projet. *Office fédéral de l'environnement*, Berne, 72 p. ([PDF](#))

Parker G. (1979) : Hydraulic Geometry of Active Gravel Rivers. *Proc. ASCE, J. of Hydr. Div.*, **105(HY9)**, 1185-1201.

Rosgen D. L. (1994) : A classification of natural rivers. *CATENA* 22(3), 169-199.

Schager E. et Peter A. (2001) : Bachforellensömmerlinge Phase I. *Réseau suisse poissons en diminution Projet partiel 00/12* : 321 p.

Schager E. et Peter A. (2002) : Bachforellensömmerlinge Phase II. *Réseau suisse poissons en diminution Projet partiel 01/12* : 224 p.

Schager E. et Peter A. (2004) : Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau en Suisse – Poissons – niveau R (région). *OFEV. L'environnement pratique, Informations concernant la protection des eaux n° 44* : 63 p. ([PDF](#))

Schälchli U. (1992) : The clogging of coarse gravel river beds by fine sediment. *Sediment/Water Interactions: Proceedings of the Fifth International Symposium*. B. T. Hart and P. G. Sly. Dordrecht, Springer Netherlands: 189-197. <https://doi.org/10.1007/BF00026211>.

Schälchli U. (2005) : Mathematische Modellierung des Geschiebehaushalts der Thur und des Sitter-Unterlaufs. *VAW 75 JAHRE, Festkolloquium 7. Oktober 2005. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich*, **190**, 121-135. ([PDF](#))

Schälchli U., Breitenstein M. et Kirchhofer A. (2010) : Kiesschüttungen zur Reaktivierung des Geschiebehaushalts der Aare – die kieslaichenden Fische freut's. *Eau énergie air* 102/3 : 209-213.

Schälchli U. et Hunzinger L. (2021) : Die erforderliche Geschiebefracht. Fachbericht zum Modul «Geschiebehaushalt – Massnahmen» der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer. *Rapport rédigé sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement*. ([PDF](#))

Schälchli U. et Kirchhofer A. (2012) : Assainissement du régime de charriage. Planification stratégique. Un module de l'aide à l'exécution Renaturation des eaux. *Office fédéral de l'environnement*, Berne. L'environnement pratique n°1226 : 73 p. ([PDF](#))

Schumm, S. A. (1985) : Patterns of Alluvial Rivers. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **13**, 5-27.

Schwindt S., Franca M. J., De Cesare G. et Schleiss A. (2016) : Gestaltung effizienter Geschiebesammler anhand physikalischer Modellversuche mit Fallbeispiel. 18. *Wasserbausymposium*, Wallgau, Germany, 275-284. ([PDF](#))

Thomas G., Baumgartner S. et Haertel-Borer S. (2019) : Finanzierung. Merkblatt 6, V1.02. In: Wirkungskontrolle Revitalisierung – Gemeinsam lernen für die Zukunft. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 2020.

VAW (2011, non publié) : Alpenrhein Internationale Strecke. Nachhaltiger Hochwasserschutz auf der Flussstrecke der Internationalen Rheinregulierung. Machbarkeitsuntersuchung (11.7.2011). Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich. VAW 4262-4. *Rédigé sur mandat de la Régulation internationale du Rhin*.

Yalin S. et da Silva A.M.F. (2001) : Fluvial processes. *IAHR Monograph*, IAHR International Association of Hydraulic Engineering and Research, Delft, The Netherlands.

Zurwerra A., Meile T. et Käser S. (2016) : Künstliche Hochwasser. Massnahme zur Beseitigung ökologischer Beeinträchtigungen in Restwasserstrecken unterhalb von Speicherseen. Auslegeordnung Grundlagen & Handlungsbedarf. *Rédigé sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement*. ([PDF](#))

Annexe C – Contenu d'une décision d'assainissement

Il est recommandé de formuler les décisions cantonales d'assainissement à l'intention des détenteurs d'installation selon les exigences minimales suivantes.

- **Ordre d'assainir** : la décision doit déclarer clairement l'obligation d'assainir (art. 42c, al. 2, OEaux) et se référer aux planifications stratégiques décidées.
- **Obligation d'élaborer un projet d'assainissement** fixant des objectifs d'assainissement les plus concrets possible (type et ampleur).
- **Délais** dans lesquels les mesures doivent être mises à l'étude (présentation d'un dossier susceptible d'autorisation) et mises en œuvre.
- **Demande d'élaborer une stratégie de suivi de l'efficacité**. Comme l'état initial du cours d'eau doit être documenté avant la mise en œuvre des mesures, il est judicieux de concevoir le suivi de l'efficacité dès l'étude de projet.
- **Indications sur la coordination nécessaire des mesures dans le bassin versant.**

Si l'étude sur le type et l'ampleur des mesures réalisée par le canton n'aboutit pas à une décision d'étudier les variantes, mais que l'étude des variantes doit être menée par le détenteur de la centrale, la décision doit en outre contenir les points suivants :

- **délai pour proposer la meilleure variante,**
- **réglementation sur la décision de la variante retenue.**

Annexe D – Approches pour déterminer le débit de charriage dans l'état actuel et l'état proche de l'état naturel

Les six marches à suivre présentées ci-après peuvent être utilisées pour estimer le débit de charriage (tab. D-1). La qualité et la plausibilité des bases employées doivent systématiquement être vérifiées. Le débit de charriage réagissant de manière très sensible à certains paramètres (p. ex. granulométrie des matériaux charriés), il convient donc de relever ceux-ci soigneusement et avec la plus grande précision.

Approche 1 « Statistiques des extractions » : cette approche recourt à l'analyse des données disponibles pour les sites d'extraction de gravier (cours d'eau, dépotoirs à alluvions, etc.) et les dépôts sédimentaires dans les lacs (croissance du delta). À partir des données d'extractions de gravier, il est possible d'estimer, souvent avec une grande précision, le débit de charriage dans les sous-bassins versants. Ces données peuvent ensuite servir de valeurs d'étalonnage pour les bassins versants voisins présentant des caractéristiques similaires (approche 3). La croissance du delta ou les extractions de gravier à l'embouchure du cours d'eau dans un lac (Rhin alpin, Linth) permettent de déterminer le débit de charriage de systèmes hydrographiques entiers.

Approche 2 « Analyses de processus » : cette approche recourt aux relevés de terrain sur la charge solide. Des débits de charriage sont relevés (pour HQ_{300} , HQ_{100} , HQ_{30} , HQ_{10} , HQ_2) dans les affluents puis convertis en débits de charriage annuels moyens. Pour les tronçons de cours d'eau plus longs, il convient de tenir compte de l'abrasion. Cette méthode fournit de bons résultats (marche à suivre décrite dans Hunziker et al. 2014). Si des données d'extractions de gravier sont disponibles pour les sous-bassins versants (approche 1), la plausibilité et la précision des résultats de l'approche 2 pourront encore être augmentées.

Approche 3 « Cours d'eau de référence » : cette approche consiste à reporter sur le (sous-)bassin versant à analyser le débit de charriage de cours d'eau de référence ou permet d'asseoir la plausibilité du débit de charriage obtenu dans le périmètre d'étude. Il s'agit ici de comparer et d'analyser les caractéristiques des bassins versants qui sont déterminantes pour la charge solide (relief, géologie, géomorphologie, végétation, pourcentage de roches meubles, connectivité avec le lit, etc.). En règle générale, le débit de charriage spécifique est estimé en tenant compte de la taille du bassin versant.

Approche 4 « Tronçons clés » : cette approche recourt au calcul du débit de charriage sur des tronçons clés. Les tronçons clés sont les tronçons du cours d'eau présentant la plus faible capacité de transport solide charrié au sein d'un périmètre d'observation donné. On calcule ici la capacité de charriage rapportée à un profil transversal ou un tronçon. Pour les cours d'eau se trouvant dans un état d'équilibre en matière de charriage, le débit calculé correspond au débit de charriage réel. Pour les cours d'eau se trouvant dans un état d'érosion sous-jacente, les débits calculés ne correspondent qu'au seuil maximal limite. Le calcul de la capacité de charriage est lié à de nombreuses incertitudes. L'utilisation de l'approche 4 est donc uniquement recommandée s'il est évident qu'un cours d'eau se trouve en état d'équilibre et que les paramètres sensibles peuvent être établis de manière fiable.

Approche 5 « Modifications du fond du lit » : cette approche recourt à l'analyse des modifications du fond du lit sur plusieurs années. La méthode permet de déterminer la modification du débit de charriage en direction de l'aval, mais pas le débit de charriage absolu. Elle est adaptée pour établir le profil longitudinal du débit de charriage sur de longs tronçons soumis à l'atterrissement ou à l'érosion à partir d'un débit de charriage connu en amont ou en aval. Il convient ici de prendre en compte que le débit de charriage obtenu permettra uniquement de définir l'état du cours d'eau dans la période comprise entre

deux mesures, qui correspond le plus souvent à un état avec des installations en place (p. ex. aménagements de cours d'eau, centrales hydrauliques, sites d'extraction de gravier, etc.) et non à l'état proche de l'état naturel.

Approche 6 « Modélisations numériques » : cette approche consiste à déterminer le profil longitudinal du débit de charriage à partir de modélisations morphologiques. Il s'agit ici de choisir pour le modèle des apports de matériaux charriés permettant de reproduire aussi précisément que possible les modifications du fond du lit survenant entre deux mesures. En plus des données de base offrant souvent un haut degré de précision (profils transversaux, hydrogramme), il convient aussi de porter attention ici au paramètre sensible de la granulométrie. Par ailleurs, il est à noter que le débit de charriage obtenu peut fortement varier pour les modélisations recourant à plusieurs types de calculs (formule de transport solide charrié, contrainte d'entraînement). Il est donc recommandé d'utiliser des modèles intégrant des paramètres déjà calibrés et testés sur des cours d'eau au débit connu (p. ex. extraction complète de graviers, dépôts dans le delta).

En principe, la détermination du débit de charriage exige de recourir à plusieurs approches, car leur combinaison permet d'obtenir un degré de précision plus élevé. En fonction de la taille du bassin versant considéré et de l'effort à consentir, la combinaison des approches suivantes peut s'avérer judicieuse.

- Estimation grossière du débit de charriage dans le cadre d'un processus accéléré : approches 1 et 3 (uniquement pour les bassins versants de petite et moyenne taille et de relativement faible importance).
- Détermination fiable du débit de charriage avec un effort moyen : approches 1, 2 et 3 (pour les bassins versants de toutes tailles).
- Détermination fiable et redondante du débit de charriage avec effort important à consentir : approches 1, 2, 3 et 6, éventuellement complétées des approches 4 et 5.

Tab. D-1 : Approches pour déterminer le débit de charriage.

Les valeurs en pourcentage indiquent les écarts possibles (+/-) par rapport à la valeur plausible.

N°	Approche	Bases nécessaires	Paramètres sensibles (et précision de détermination)	Effort à consentir, évaluation et application	Précision de détermination du débit de charriage ¹
1	Statistiques d'extraction	Volumes extraits sur plusieurs années, mesures, vues aériennes, etc.	- Disponibilité des données (plusieurs années) et fiabilité (10-40 %) - Part estimée Débit de charriage/continuité (10-40 %) - Pourcentage de sédiments fins (10-30 %)	Effort minime Analyse obligatoire des données disponibles	Grande
2	Analyses de processus	Relevés sur le terrain, cartes, vues aériennes, etc.	- Repérage des processus déterminants - Volume estimé Sources de matériaux charriés (20-40 %) - Part Sédiments fins (10-30 %) - Abrasion (10-30 %)	Effort moyen Résultats fiables et application fortement recommandée	Grande
3	Cours d'eau de référence	Données de bassins versants aux propriétés similaires à celles du bassin pour lequel il existe des débits de charriage fiables et plausibles	- Caractérisation du bassin versant - Transférabilité	- Effort minime - Application fortement recommandée - Permet de renforcer la plausibilité des autres méthodes	Moyenne
4	Tronçons clés	- Profils transversaux - Pente - Courbe des débits classés - Granulométrie - Rugosités	- Courbe des débits classés - Granulométrie - Pente - Formule transport des matériaux charriés	Effort minime à moyen Fournit seulement un seuil maximal (capacité de transport) -> le débit peut être limité Application seulement recommandée sur les tronçons en état d'équilibre ou d'atterrissement	Moyenne
5	Modifications du fond du lit	Mesures des profils transversaux sur au moins deux années	- Comparabilité des profils (largeur, etc.) - Débits dans la période entre deux mesures des profils transversaux	Effort minime à moyen Ne donne pas le débit absolu, seulement la modification du débit en aval Fait évent. sens pour les tronçons avec atterrissement et érosion des grands cours d'eau	Moyenne
6	Modélisations numériques	- Profils transversaux d'au moins deux mesures - Hydrogramme de la période de calcul - Granulométrie - Rugosités - Extractions de gravier	- Granulométrie des matériaux charriés (5-20 %) - Granulométrie du fond du lit (5-20 %) - Formule de transport (jusqu'à 50 %) - Hydraulique, contraintes d'entraînement (jusqu'à 30 %) - Qualité de calibrage, écarts état cible/réel (jusqu'à 20 %)	Effort important En ayant connaissance du DC (site d'extraction de gravier, retenue, delta, etc.), bon calibrage possible Si DC inconnu, détermination obligatoire de la granulométrie déterminante -> selon l'utilisateur et le modèle, il faut s'attendre à des résultats très variés du fait des nombreuses méthodes de calcul du DC possibles	Moyenne à grande

¹ La précision absolue dépend fortement du degré de fiabilité des bases et de la précision avec laquelle les paramètres sensibles peuvent être déterminés.

Annexe E – Méthode pour déterminer le débit de charriage nécessaire

E.1 Introduction

La présente annexe expose la marche à suivre pour déterminer le débit de charriage nécessaire à l'atteinte des objectifs définis pour le cours d'eau. Les différentes méthodes présentées ici ont été développées dans le cadre de l'établissement du module d'aide à l'exécution. Elles sont décrites en détail ainsi que leur genèse dans Schälchli et Hunzinger (2021). Elles ne sont explicitées ci-après que dans la mesure où la compréhension de leur application le nécessite.

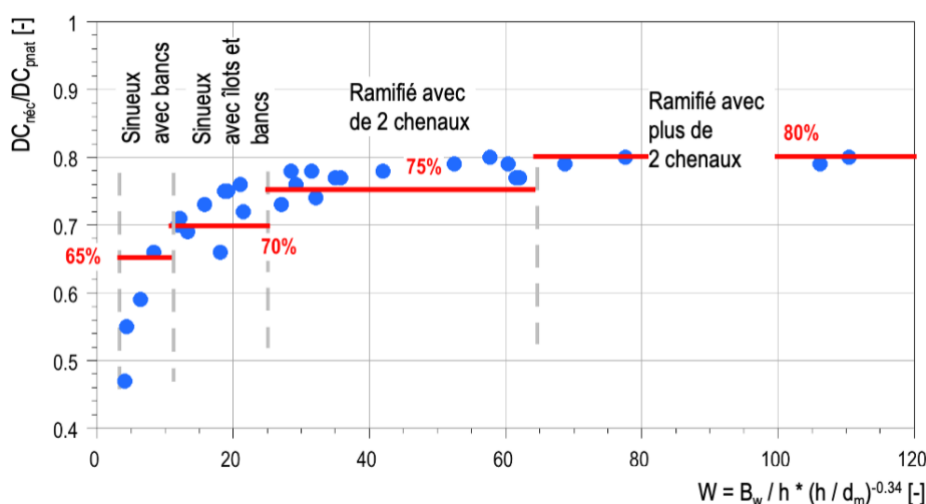
E.2 Méthode Style fluvial

E.2.1 Concept à la base de la méthode

La méthode « Style fluvial » constitue la principale méthode pour déterminer le débit de charriage qui est nécessaire pour atteindre les objectifs morphologiques. Elle est fondée sur le rapport entre le débit de charriage et la largeur du lit, et donc le style fluvial d'un cours d'eau charriant du gravier. Plus le débit de charriage d'un cours d'eau est important, plus le cours d'eau est large¹, et plus le cours d'eau est large (pour un même écoulement et une même pente), plus il est ramifié.

Il convient par suite de viser le débit de charriage avec lequel le cours d'eau peut atteindre une largeur et une forme de lit semblables à l'état proche de l'état naturel. Avec cette méthode, le débit de charriage nécessaire est indiqué en pourcentage du débit de charriage proche de l'état naturel. Les valeurs en pourcentage sont dérivées des formules définies dans Schälchli et Hunzinger (2021) et de leur application sur plus de 30 cours d'eau servant d'exemple (fig. E-1).

Fig. E-1 : Rapport entre le débit de charriage nécessaire et le débit de charriage proche de l'état naturel en fonction du style fluvial, pour 30 cours d'eau d'après Schälchli et Hunzinger (2021).



E.2.2 Marche à suivre

L'évaluation nécessite les bases suivantes :

- cartes historiques (premières cartes à l'échelle), plans de correction, anciennes photos aériennes ;
- débit de charriage dans l'état actuel (à partir des études de régime de charriage, de la planification d'assainissement du régime de charriage, phase I, des relevés sur le terrain) ;
- débit de charriage proche de l'état naturel (débit de charriage dans l'état actuel auquel est ajouté le débit de charriage retenu par les installations en place).

Étape 1 : style fluvial

Le style fluvial proche de l'état naturel est déterminé visuellement à partir de cartes historiques, de plans de correction et d'anciennes photos aériennes. On distingue les différents styles fluviaux présentés à la figure 8 (point 3.2.3).

Pertinence des cartes historiques

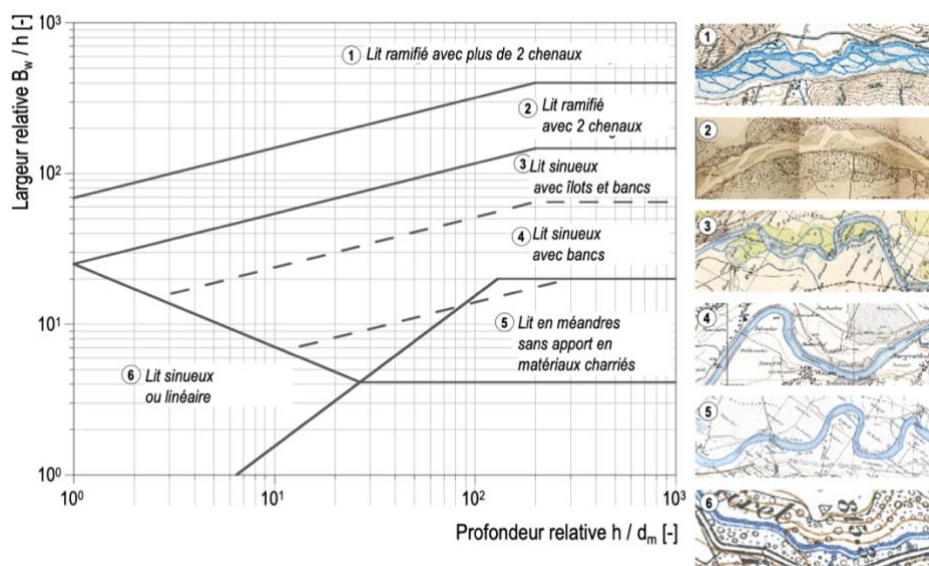
Les cartes historiques illustrent l'état qu'avait le cours d'eau au moment de leur réalisation. Les points suivants doivent donc être pris en considération lorsque l'on fait usage de cartes historiques.

- La carte montre-t-elle un état du cours d'eau sans rétrécissement du lit ou bien la largeur et le style fluvial apparaissent-ils déjà modifiés par des aménagements ?
- La zone dynamique (zone mouillée, bancs de gravier sans/avec végétation pionnière) peut-elle être clairement différenciée de la zone riveraine (forêt, prés à litière, prairies humides) ? La différenciation est-elle plausible ?
- Quelles variations de la largeur et du style fluvial peut-on observer sur les cartes historiques de différentes années ? Les différences relevées sont-elles liées à des interventions anthropiques ou à l'histoire des crues ?
- Pour les cours d'eau sinueux, les cartes révèlent-elles des signes de migration ?
- Dans quelle mesure la largeur du lit varie-t-elle vers l'aval ? La largeur se voit-elle rétrécie par des paramètres géomorphologiques (cône de déjection, cône d'écroulement, flancs de la vallée) ?

Une analyse correspondante des cartes historiques permet de déduire l'état proche de l'état naturel et d'éviter les erreurs d'interprétation.

La plausibilité du style fluvial peut au besoin être confirmée au moyen du diagramme modifié de Ahmari et da Silva (fig. E-2) afin de le situer clairement dans la zone de transition entre deux styles. Les valeurs d'entrée nécessaires en l'occurrence sont les suivantes : largeur du lit *B proche de l'état naturel*, pente du fond du lit, débit à bords pleins HQ_2 et granulométrie caractéristique (d_{90} , d_m) des matériaux du fond du lit. Un calcul de l'écoulement normal dans un chenal rectangulaire avec rugosité des berges $k_{St(Ufer)} = 21m^{1/3}/s$ et rugosité du fond $k_{St(Sohle)} = 21/d_{90}^{1/6}$ permet de déterminer la profondeur d'écoulement h et ensuite la largeur relative B/h et la profondeur d'écoulement relative h/d_m

Fig. E-2 : Diagramme modifié de Ahmari et da Silva pour distinguer différents styles fluviaux en fonction de la profondeur d'écoulement relative et de la largeur relative du lit.



Étape 2 : débit de charriage nécessaire

Le débit de charriage nécessaire $DC_{néc}$ est déterminé en pourcentage du débit de charriage proche de l'état naturel DC_{pnat} . Les valeurs applicables sont celles du tableau E-1 en fonction du style fluvial.

Tab. E-1 : Approche simplifiée. Rapport entre le débit de charriage nécessaire ($DC_{néc}$) et le débit de charriage proche de l'état naturel (DC_{pnat}).

Style fluvial proche de l'état naturel	$DC_{néc}/DC_{pnat}$
Lit ramifié avec plus de deux chenaux	0,80
Lit ramifié avec deux chenaux	0,75
Lit sinueux avec îlots et bancs	0,70
Lit sinueux avec bancs	0,65
Lit sinueux ou linéaire ($J > 3 \%$)	0,65

Pour les lits avec plus de deux chenaux, le débit de charriage nécessaire équivaut à 80 % du débit de charriage proche de l'état naturel ; pour les lits avec deux chenaux, il correspond à 75 % ; pour les lits sinueux avec îlots et bancs, à 70 % ; pour les lits sinueux avec bancs et les lits sinueux ou linéaires à 65 %. Il peut en être déduit que le style fluvial ramifié réagit plus fortement à un déficit de charriage que le style fluvial caractérisé par un lit sinueux ou linéaire.

Pour les cours d'eau affichant une pente supérieure à 3 %, le style fluvial dépend moins du niveau du débit de charriage que des conditions topographiques (forte pente, flancs de la vallée géologiquement prédéfinis). Le style fluvial est ici sinueux à linéaire. Ce qui change en cas de déficit de charriage, c'est surtout la composition du substrat et, par endroits, la forme du fond du lit dans le profil longitudinal. En adoptant une approche pragmatique, on peut supposer qu'aucune atteinte grave n'est portée à la composition du substrat ni aux dépôts de gravier lorsque le débit de charriage atteint une valeur supérieure ou égale à 65 % du débit de charriage proche de l'état naturel.

E.3 Méthode Substrat

E.3.1 Répartition des types de substrats et colmatage

Le substrat se caractérise par deux paramètres : la variabilité des types de substrats à la surface du fond du lit et le colmatage interne (cf. point 3.2.3). La variabilité des types de substrats au fond du lit est le résultat des processus de transport et de déposition. On évalue quels types de substrats sont présents et dans quelle mesure le fond du lit est colmaté. Le colmatage interne est causé par l'infiltration de sédiments fins et il diminue avec la mobilisation du fond du lit du cours d'eau (décolmatage). Pour l'appréciation, il convient de tenir compte des caractéristiques géologiques, glaciaires et hydrologiques du bassin versant qui exercent une influence considérable sur le substrat et le colmatage.

Fig. 0E-4 : Petites structures morphologiques avec différents types de substrats. À gauche : état proche de l'état naturel (Brenno à Castro). À droite : état avec déficit de charriage (Sihl à Finsterseebrugg). Photos : Flussbau AG SAH.



Dynamique du substrat

La dynamique des microstructures se manifeste par le décolmatage du fond du lit du cours d'eau et la modification de la composition locale du substrat. Une mobilisation de la couche pavée décolmate le fond du lit et la perméabilité du substrat atteint un degré maximal. Ainsi, le colmatage interne du fond du lit d'un cours d'eau est un paramètre adéquat pour évaluer la dynamique du substrat. Pour que la composition du substrat se modifie beaucoup localement, il faut en général une migration du chenal ou un déplacement des bancs.

E.3.2 Marche à suivre

L'évaluation nécessite les bases suivantes :

- cartographie des types de substrats et du degré de colmatage interne ;
- modèle d'appréciation pour la répartition des types de substrats et les classes de colmatage interne (fig. E-5).

Étape 1 : types de substrats

Relever les proportions de surface des cinq types de substrats sur le terrain soit par cartographie complète, soit par relevés dans plusieurs sections transversales. Les relevés se font en débit d'étiage et comprennent aussi des secteurs de fond de lit mouillés visibles. Les proportions pour chaque type de substrat sont déterminées en pourcentage et reportées dans l'histogramme. La répartition des cinq types de substrats est évaluée à l'aide des modèles de répartition selon la figure E-6.

Étape 2 : colmatage interne du fond du lit

Relever les proportions de surface des cinq degrés de colmatage interne sur le terrain dans plusieurs sections transversales. Les relevés se font en débit d'étiage et comprennent des secteurs de fond de lit secs. Les proportions pour chaque degré de colmatage sont déterminées en pourcentage et reportées dans l'histogramme. La répartition des cinq degrés de colmatage est évaluée à l'aide des modèles de répartition selon la figure E-6.

Étape 3 : apprécier si une augmentation du débit de charriage est nécessaire

Les répartitions de types de substrats et de degrés de colmatage faites aux étapes 1 et 2 sont reportées dans la matrice de la figure E-5, ce qui permet de délimiter leur intersection. Les intersections bleues ou vertes signifient que le débit et la dynamique de charriage sont suffisants ; les intersections jaunes que le débit de charriage doit si possible être augmenté ; les intersections rouges que le débit de charriage doit impérativement être augmenté. Lorsque le débit de charriage est adapté, l'appréciation du substrat tend vers le haut à gauche.

Les intersections E rose et F mauve représentent les tronçons où apparaissent en général d'autres processus. Les surfaces E peuvent par exemple concerner des zones d'érosion et les surfaces F des zones d'atterrissement. Les causes peuvent être naturelles ou anthropiques et il est nécessaire de les rechercher.

Étape 4 : augmentation nécessaire du débit de charriage

L'évaluation faite à l'étape 3 permet de qualifier la modification du régime de charriage et de limiter l'ampleur de la mesure d'assainissement. Si un tronçon de cours d'eau se situe en bas à droite dans la matrice, l'apport de matériaux charriés doit être fortement augmenté. Plus l'appréciation du tronçon tend vers le haut à gauche, plus la planification des mesures peut se limiter à une augmentation modérée de l'apport de matériaux charriés.

Comme la répartition des types de substrats et du colmatage interne du fond du lit proche de l'état naturel n'est pas connue, le débit de charriage nécessaire ne peut pas être quantifié par cette méthode.

Fig. E-5 : Matrice d'évaluation du régime de charriage exigence 3 : Substrat.

Bleu et vert : pas de mesure. Jaune : ordonner la mesure si possible. Rouge : ordonner la mesure. E et F : rechercher les causes

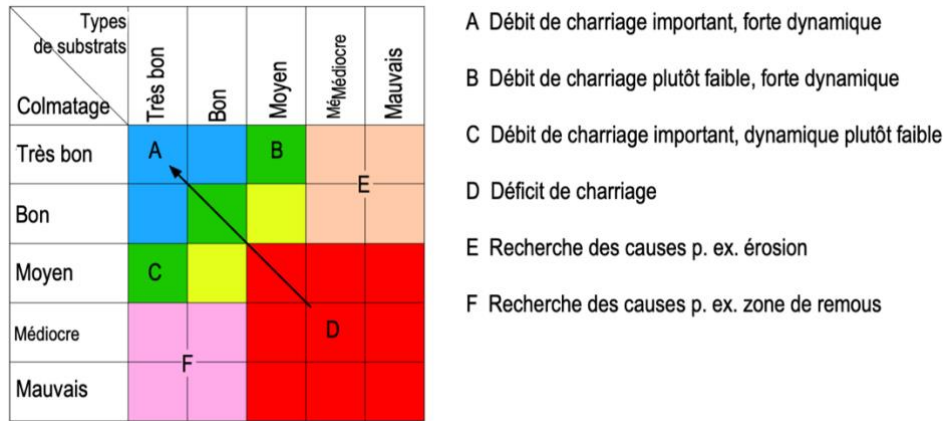
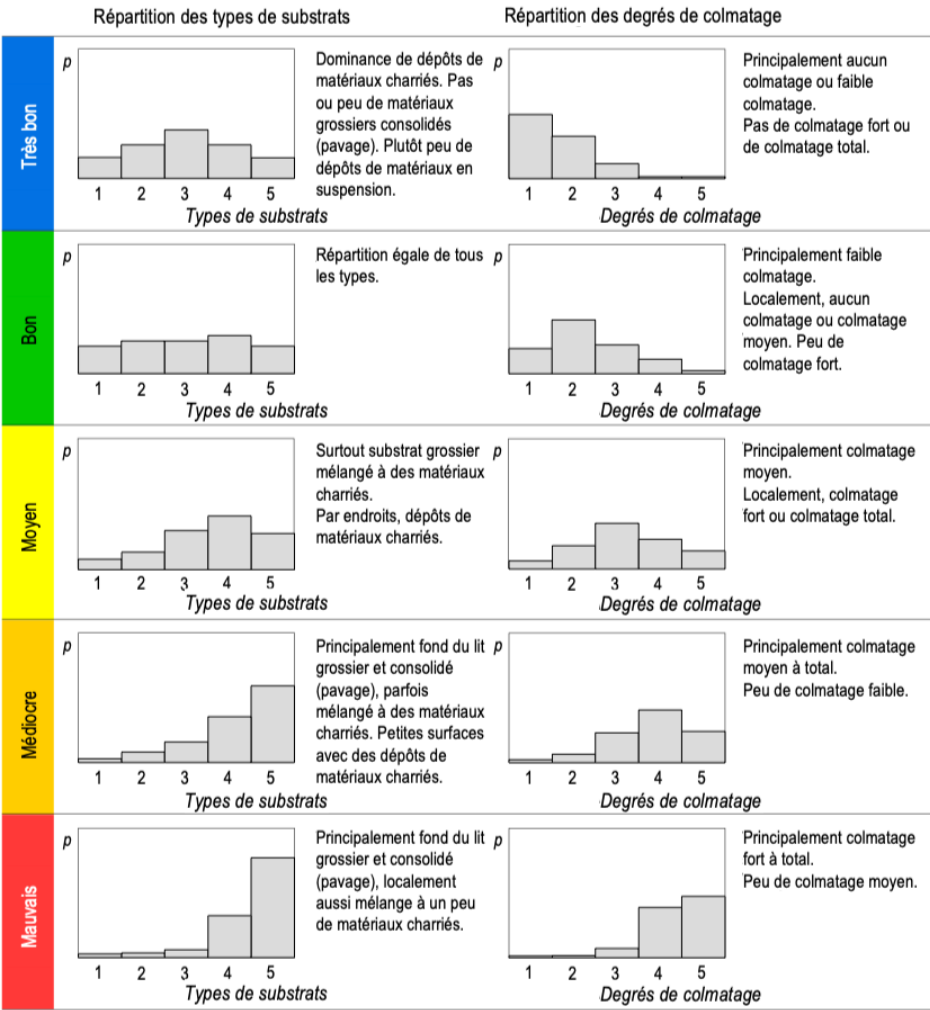


Fig. E-6 : Appréciation de la répartition des types de substrats et du degré de colmatage. Représentation schématique des courbes de répartition. Les répartitions absolues sont naturellement liées aux caractéristiques du bassin versant.



E.4 Méthode Niveau du fond du lit

E.4.1 Remarque

S'il est possible d'atteindre le débit de charriage nécessaire avec la méthode « Style fluvial », on peut partir du principe que le régime des eaux souterraines et la protection contre les crues ne subiront pas d'altérations notables en cas de régime de charriage modifié. L'application de la méthode « Niveau du fond du lit » s'avère alors superflue.

E.4.2 Méthode Niveau du fond du lit pour l'objectif Régime des eaux souterraines

Importance hydrogéologique

Le niveau du cours d'eau et la perméabilité du fond du lit revêtent une grande importance pour les aquifères reliés au cours d'eau. Ces paramètres ont changé avec les corrections et les aménagements, ce qui a également influencé le niveau et le régime des eaux souterraines. Dans la plupart des cas, le niveau des eaux souterraines a baissé, sous l'effet de l'érosion accrue et du colmatage croissant du fond du lit. Par suite, les sources limnocènes et les zones humides se sont asséchées et les sols riches en tourbe se sont abaissés. L'utilisation des eaux souterraines, les constructions et les infrastructures étant basées sur cet état influencé par les activités humaines, le retour à des conditions proches de l'état naturel n'est souvent plus possible que de manière limitée.

Marche à suivre

L'évaluation nécessite les bases suivantes :

- cartes des eaux souterraines ;
- cartes de l'inventaire des zones alluviales ;
- observations sur le terrain des modifications de fond du lit (traces d'érosion ou d'atterrissement) ;
- profil longitudinal du talweg du fond du lit avant et après la réalisation des installations qui ont pu causer une modification importante du régime de charriage ;
- observation des niveaux des eaux souterraines avant et après la réalisation des installations qui ont pu causer une modification importante du régime de charriage.

Étape 1 : présence d'eaux souterraines

La présence d'eaux souterraines importantes dans le tronçon du cours d'eau ou de zones alluviales inventoriées est vérifiée. S'il n'y en a pas, le critère n'est pas appliqué.

Étape 2 : atteinte au régime de charriage

Il est évalué si, dans les tronçons sans limitation de la largeur du lit, le niveau du talweg a beaucoup changé après une modification du régime de charriage. Si la vérification sur le terrain et l'analyse d'éventuelles mesures du fond du lit indiquent pareils changements, il convient d'examiner les aspects hydrogéologiques suivants.

- Le niveau des eaux souterraines s'est-il notablement modifié suite au changement du niveau du fond du lit ?
- Une atteinte grave a-t-elle été portée au régime des eaux souterraines suite au changement intervenu² ?

Une réponse affirmative aux deux questions implique un assainissement du régime de charriage.

² Sans modélisations complètes, on ne peut évaluer si le régime des eaux souterraines est gravement atteint par régime de charriage modifié que dans les tronçons où la largeur du lit n'est pas canalisée.

Étape 3 : déterminer le débit de charriage nécessaire

Si un changement du régime de charriage a causé une atteinte grave au régime des eaux souterraines, il faut alors procéder à des modélisations morphologiques avec différents débits de charriage sur des tronçons d'une certaine longueur. Les résultats des calculs permettent de déterminer quel débit de charriage est nécessaire pour stabiliser le fond du lit. Le débit de charriage nécessaire est limité (vers le haut) par le débit de charriage proche de l'état naturel.

E.4.3 Méthode Niveau du fond du lit pour l'objectif Protection contre les crues

Importance

Un fond de lit stable avec une marge de variation tolérable, mais sans tendance à l'érosion ni à l'atterrissement, constitue un facteur important de protection contre les crues. Cela permet d'empêcher l'érosion du fond du lit qui peut mettre en danger les installations, telles que les ouvrages de stabilisation des berges et les ponts. Cela permet aussi d'éviter les atterrissements, qui réduisent trop fortement la capacité d'écoulement.

Marche à suivre

Étape 1 : représenter les profils longitudinaux

Le profil longitudinal du fond du lit dans l'état actuel et l'état proche de l'état naturel ainsi que le profil longitudinal de la zone de plaine de la vallée sont représentés.

Étape 2 : comparer les profils longitudinaux

On évalue s'il est nécessaire d'augmenter le débit de charriage en déduisant des profils longitudinaux, les pentes longitudinales dans l'état actuel et dans l'état proche de l'état naturel ainsi que la pente de la vallée, avant de comparer ces données. Si la pente du fond du lit dans l'état actuel est très inférieure à celle de l'état proche de l'état naturel et également inférieure à la pente de la vallée, il y a atteinte grave à la protection contre les crues du fait de la réduction du débit de charriage. Comme le transport de matériaux réagit très fortement aux modifications de pente, tout écart même faible peut avoir des effets importants.

Étape 3 : déterminer le débit de charriage nécessaire

Si une atteinte grave est portée à la protection contre les crues du fait d'un changement de régime de charriage, il convient de procéder à des modélisations morphologiques avec différents débits de charriage sur des tronçons aussi longs que possible. Les résultats des calculs permettent de déterminer quel débit de charriage est nécessaire pour stabiliser le fond du lit. Le débit de charriage nécessaire est limité (vers le haut) par le débit de charriage proche de l'état naturel.

Annexe F – Précisions pour la planification, l'étude de projet et la mise en œuvre des différents types de mesures

Voici les précisions pour la planification et l'étude de projet concernant les mesures constructives (M 1.1 à M 1.12) et les mesures d'exploitation (M 2.1 à M 2.6).

- M 1.1 **Transformer le barrage** de manière à laisser passer les matériaux charriés par-dessus le seuil en cas de crue : le passage des matériaux charriés peut entraîner une abrasion du seuil du barrage. Il faut tenir compte du risque d'embâcle avec les matériaux flottants.
- M 1.2 **Transformer la galerie de la vidange du fond** pour que les matériaux charriés puissent transiter par la vidange du fond pendant les crues lorsque le niveau du réservoir a été abaissé : cette mesure n'est possible et utile qu'avec de faibles hauteurs de retenue. Dans le cas des grandes installations de retenue, le lac devrait être entièrement vidé. Par conséquent, la mesure doit être combinée avec la mesure d'exploitation : vidange et curage. Ce faisant, il faut tenir compte de l'effet d'une forte concentration de matières en suspension (turbidité, colmatage). Le transport des matériaux charriés par la vidange du fond peut entraîner une abrasion de l'installation
- M 1.3 **Aménager une galerie de déviation des matériaux charriés** : le transport de matériaux à travers une galerie peut entraîner l'abrasion de la galerie. Il faut tenir compte du risque d'embâcle.
- M 1.4 **Transformer l'ouvrage de restitution pour que le bassin ne se remplisse que lors de débits de crue rares** : des crues modérées et fréquentes doivent pouvoir s'écouler sans retenue à travers le bassin. L'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) a étudié les dépotoirs à alluvions doseurs et publié des bases de calcul (p. ex. Schwindt *et al.*, 2016).
- M 1.5 **Aménager un chenal pilote pour faire transiter les matériaux charriés en cas de crue modérée** : les matériaux charriés ne doivent se déposer que par fort débit de crue lorsque le chenal pilote déborde. Pendant l'exploitation, il faut veiller à ce que le chenal d'écoulement soit éventuellement vidé des dépôts amenés par une crue moyenne, même si le dépotoir a encore assez de capacité pour les dépôts amenés par une forte crue. Cette mesure peut être combinée avec la mesure M 1.4. L'EPFL a étudié les dépotoirs à alluvions doseurs et publié des bases de calcul (p. ex. Schwindt *et al.*, 2016).
- M 1.6 **Déplacer les barreaux de la grille de rétention** : les barreaux de la grille retenant les matériaux charriés ou le bois flottant ne doivent être positionnés que sur une partie du profil d'écoulement afin que les matériaux puissent être charriés sur la section libre.

- M 1.7 Construire des ouvrages de protection contre les crues le long du cours d'eau :** ces mesures constructives (p. ex. digues) peuvent remplacer les extractions de gravier.
- M 1.8 Démanteler les ouvrages transversaux et laisser l'érosion agir sur le fond du lit :** l'élimination des seuils entraîne un abaissement du fond du lit. On peut tolérer une plus forte pente longitudinale qui permet le transport d'une plus grande quantité de matériaux. Les extractions de gravier pour protéger contre les crues ne sont alors plus nécessaires ou dans une proportion moindre. Cette mesure constructive se prête bien pour l'amont des cours d'eau du Plateau et des Préalpes. Les torrents des Alpes ne permettent souvent pas d'alternative proportionnée à la protection du lit par des ouvrages transversaux. Il faut éventuellement, en complément, adapter les fondations des protections des rives.
- M 1.9 Démanteler les ouvrages de stabilisation des berges et laisser agir l'érosion latérale :** l'érosion latérale n'augmente le débit de charriage dans un cours d'eau que là où l'érosion peut mobiliser le gravier d'une épaisse terrasse alluviale, d'un cône de déjection ou d'une falaise de poudingue. En cas d'érosion d'une berge alluviale peu élevée, des matériaux charriés sont déposés sur la berge opposée si bien que le bilan est équilibré.
- M 1.10**
- M 1.11 Éliminer les rétrécissements du lit :** les rétrécissements qui provoquent des dépôts de matériaux dans la retenue pendant les crues peuvent éventuellement être éliminés.
- M 1.12 Aménager une aire de dépôt de matériaux charriés dans un dépotoir à alluvions latéral :** en laissant les matériaux se déposer de manière ciblée en amont du site d'extraction, par exemple dans une aire de dépôt de matériaux charriés dans un dépotoir à alluvions latéral, la charge de matériaux charriés dans un tronçon peut être réduite en cas de fort débit de crue.
- M 1.13 Démantèlement :** on peut envisager le démantèlement complet pour tous les types d'installations si cette mesure est proportionnée.
- M 2.1 Abaisser le niveau d'eau de la retenue en cas de crue :** la mesure est appropriée pour les barrages où les matériaux charriés peuvent être transportés par-dessus le seuil. L'installation doit éventuellement être transformée (M 1.1). Les matériaux transportés par-dessus le seuil peuvent entraîner une abrasion de ce dernier. Il faut tenir compte du risque d'embâcle.

La planification peut comporter les étapes suivantes :

- 1) vérifier la faisabilité technique ;
- 2) évaluer les conditions-cadres pour abaisser le niveau d'eau de la retenue ;
- 3) évaluer les effets des scénarios d'abaissement du niveau ;
- 4) mener des essais pilotes.

Les conditions-cadres qui peuvent influencer sur l'ampleur des abaissements de niveau sont les suivantes : le règlement en vigueur du barrage, la stabilité des berges, la mobilisation des polluants provenant du réservoir, l'assèchement des eaux peu profondes, la turbidité en aval, les activités de loisirs en place.

- M 2.2 Optimiser les vidanges et les purges du réservoir :** le niveau du réservoir doit être abaissé en cas de crue afin que les matériaux charriés soient transportés de la queue de la retenue jusqu'à la vanne de fond. La purge doit être effectuée en concertation avec les riverains en aval (centrales électriques, installations de loisirs, etc.). Il faut suivre les consignes concernant les purges de réservoir afin de limiter notamment les effets de la concentration de matières en suspension en aval de l'installation (turbidité, colmatage). La mesure peut être combinée avec la transformation de la vanne de fond (M 1.2).

M 2.3 Permettre l'atterrissement du réservoir jusqu'à rétablissement de la continuité : les grandes retenues sont très longues à se remplir. Il faut évaluer les effets potentiels en termes de protection contre les crues. La mesure peut donc être combinée avec des déversements temporaires de gravier en aval (M 2.4).

M 2.4 Déverser du gravier en aval : il ne faudrait déverser du gravier en aval que lorsque les mesures visant à faire passer les matériaux charriés à travers l'installation ne sont ni réalisables ni proportionnées. Le gravier doit se prêter au déversement, c'est-à-dire que sa granulométrie doit correspondre à la répartition naturelle des matériaux charriés du cours d'eau. Il faut privilégier le gravier du cours d'eau même ou d'eaux proches plutôt que celui provenant de gravières. Il faut vérifier s'il y a risque d'introduire des espèces envahissantes.

Le moment du déversement de gravier doit être coordonné avec les périodes de protection des poissons. Il faut optimiser l'intervalle entre les déversements pour qu'il y ait régulièrement des matériaux à transporter et que le déversement cause le moins possible de perturbations. Les années et les quantités de déversement peuvent être fixées de manière flexible en fonction des quantités de matériaux charriés disponibles de manière à arriver à une moyenne du débit de charriage nécessaire.

Selon les circonstances, il faut aménager un accès permanent jusqu'au site d'extraction ou de déversement à titre de mesure constructive complémentaire.

M 2.5 Crues artificielles : dans les tronçons à débit résiduel, il est possible de déclencher des crues artificielles pour mobiliser les matériaux charriés et pour décolmater le fond du lit. Si l'apport de matériaux charriés est insuffisant, il faut déverser du gravier pour éviter le pavage et l'érosion du fond du lit. Il faut si possible exploiter les synergies des purges de réservoir. Des indications sur la planification des crues artificielles se trouvent dans l'analyse des crues artificielles réalisée par Zurwerra *et al.* (2016).

M 2.6 Réduire ou arrêter l'extraction de gravier : les dispositifs d'extraction doivent aussitôt être démantelés (M 1.12).

Annexe G – Liste de contrôle : Étude sur le type et l'ampleur des mesures

La liste ci-après comporte toutes les exigences posées à l'étude sur le type et l'ampleur des mesures.

État actuel et état proche de l'état naturel du cours d'eau (étape 1)

- Description de la morphologie (style fluvial, forme du fond du lit et substrat) du cours d'eau proche de l'état naturel et dans l'état actuel.
- Liste des installations qui influencent le débit de charriage dans l'état actuel par rapport au débit proche de l'état naturel, avec indication du degré de réduction du débit de charriage à atteindre par les installations.
- Profil longitudinal du débit de charriage proche de l'état naturel et dans l'état actuel (diagramme de transport des matériaux charriés).
- Description du déficit dans le régime de charriage dans l'état actuel par rapport au débit de charriage proche de l'état naturel.

Objectifs pour le cours d'eau et débit solide nécessaire (étape 2)

- Description des structures morphologiques visées pour l'état cible (style fluvial, dépôts de gravier et substrat).
- Débit de charriage nécessaire dans les tronçons de cours d'eau pour atteindre ces objectifs (représenté dans le diagramme de transport des matériaux charriés).
- Débit de charriage nécessaire pour ne pas porter atteinte à la protection contre les crues ni au régime des eaux souterraines (représenté dans le diagramme de transport des matériaux charriés).

Objectif d'assainissement pour les installations (étape 3)

- Prescription concrète de débit de charriage en aval d'une installation ; volume de charriage indiqué en m³ par an qui doit être transporté dans le cours d'eau en aval de l'installation ou
- prescription de fréquence des épisodes de charriage : nombre d'événements par an où les matériaux charriés doivent être transportés en aval de l'installation.

Catalogue de mesures (étape 4)

- Liste des mesures constructives et des mesures d'exploitation pour chacune des installations à assainir du système hydrographique.
- Description des effets des mesures en fonction des critères d'évaluation.
- Estimation des coûts pour les mesures.

Appréciation des variantes des mesures (étape 5)

- Liste de variantes avec texte explicatif.

- Explication des critères d'appréciation.
- Matrice d'appréciation complétée.

Meilleure variante (étape 6)

- Raisons du choix de la variante retenue.
- Estimation de la proportionnalité de la variante retenue.

Coordination avec les autres mesures sur le cours d'eau (étape 7)

- Liste des autres mesures dans le bassin versant et des synergies et opportunités possibles avec les mesures d'assainissement du régime de charriage.

Stratégie de suivi de l'efficacité (étape 8)

- Méthode d'évaluation de fonctionnement.
- Liste des indicateurs choisis et motifs du choix.
- Spécification des tronçons étudiés et des tronçons de référence.
- Calendrier des relevés y compris de la mesure initiale.
- Coûts prévisionnels du suivi de l'efficacité.
- Coordination avec le suivi de l'efficacité d'autres mesures.

Annexe H – Indicateurs pour le suivi de l'efficacité

H.1 Indicateurs

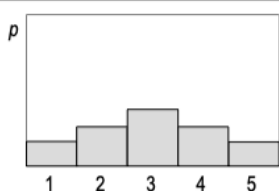
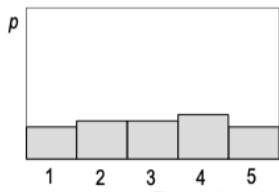
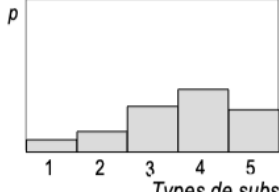
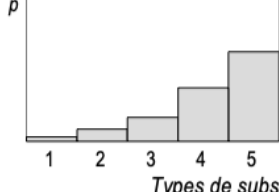
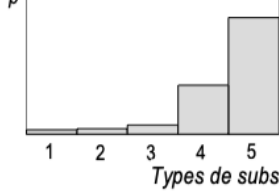
H.1.1 Indicateurs abiotiques

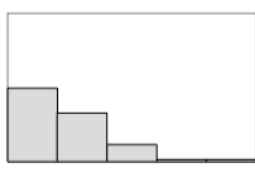
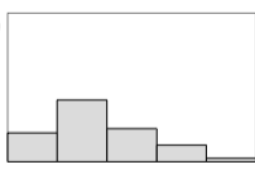
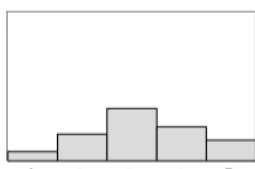
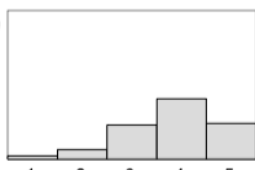
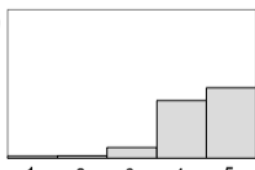
Indicateur	A1 Dépôts de matériaux charriés dans les installations ou au niveau des sites de déversement	
Méthode de relevé	- Mesurer les profils transversaux dans le secteur direct d'influence de la mesure (site de déversement ou autres). - Vérifier que les matériaux ne sont plus retenus ou que les matériaux déversés ont été transportés plus loin.	
Moment du relevé	Étiage	
Particularités	Selon la mesure, la preuve est apportée en différents points du cours d'eau : - Laisser passer les matériaux charriés (M 1.1, M 1.2, M 2.1, M 2.2) : au niveau de la queue de retenue - Aménager une galerie de déviation des matériaux charriés (M 1.3) : au niveau de la queue de retenue - Déverser du gravier en aval (M 2.4) : sur le site de déversement - Transformer le dépotoir à alluvions (M 1.4, M 1.5, M 1.6) : dans le dépotoir à alluvions - Crues artificielles dans les tronçons à débit résiduel (M 2.5) : au fond du lit et sur les berges du tronçon à débit résiduel	
Appréciation	État	Débit de charriage réel [m ³ /a]
	Bon	Il n'y a plus de dépôts ou tous les matériaux charriés ont été transportés plus loin.
	Moyen	Il y a toujours des dépôts, mais en moindre quantité ou une partie des matériaux charriés a été transportée plus loin.
	Mauvais	Les dépôts sont inchangés ou les matériaux charriés n'ont pas été transportés plus loin.

Indicateur	A2 Débit de charriage	
Méthode de relevé	- Mesurer les profils transversaux aux points névralgiques. - Déterminer le débit de charriage réel (moyenne sur plusieurs années) en dressant le bilan des modifications du fond du lit et des apports de matériaux charriés. - Effectuer des mesures indirectes du charriage (p. ex. par géophone)	
Moment du relevé	Étiage ; en continu pour les mesures indirectes	
Particularités	Vérifier aussi de visu sur le terrain les modifications du fond du lit.	
Appréciation	État	Débit de charriage réel [m ³ /a]
	Très bon	≥ débit de charriage proche de l'état naturel
	Bon	= débit de charriage nécessaire
	Moyen	< débit de charriage nécessaire
	Médiocre	< 50 % du débit de charriage nécessaire
	Mauvais	≈ 0

Indicateur	A3 Style fluvial	
Méthode de relevé	▪ Déterminer le style fluvial de visu sur le terrain ou à partir de photos aériennes actuelles. ▪ Déterminer la largeur du fond du lit de visu sur le terrain ou à partir de photos aériennes actuelles. ▪ Déterminer la distribution granulométrique ou le diamètre des particules d_m à l'aide d'échantillonnages en ligne. ▪ Calculer la profondeur d'écoulement par $Q.2$ et déterminer la largeur du plan d'eau B_W (première approximation $B_W =$ largeur du fond du lit). ▪ Vérifier le style fluvial déterminé de visu, à l'aide de la paire de valeurs (B_W/h ; h/d_m) dans le diagramme de Ahmari et da Silva et comparer avec le style fluvial proche de l'état naturel.	
Moment du relevé	Relevés sur le terrain et photos aériennes par débit d'étiage.	
Particularités	Dans l'état actuel, la section transversale déterminante pour la largeur du lit et la profondeur d'écoulement peut être déterminée à partir des profils transversaux mesurés.	
Appréciation	État	Style fluvial (styles selon point 3.2.3)
	Très bon	Style clairement identique à l'état proche de l'état naturel ($B_W/h = B_W/h_{pnat}$)
	Bon	Même style fluvial qu'à l'état proche de l'état naturel ou situé dans le champ de transition vers le style suivant ($B_W/h \leq B_W/h_{pnat}$)
	Moyen	–
	Médiocre	Style clairement différent de l'état proche de l'état naturel ($B_W/h << B_W/h_{pnat}$)
	Mauvais	Lit en méandres sans apport de matériaux charriés

Indicateur	A4 Extension des dépôts de matériaux charriés	
Méthode de relevé	- Mesurer l'extension des bancs de gravier en m² à l'aide de profils ou à partir de photos aériennes actuelles et comparer avec l'extension proche de l'état naturel. - Déterminer l'épaisseur des bancs de gravier en comparant avec des mesures des profils transversaux de différentes années.	
Moment du relevé	Étiage	
Particularités	L'appréciation est qualitative et influencée par le degré de précision avec lequel l'extension proche de l'état naturel a pu être déterminée.	
Appréciation	État	Extension des bancs de gravier
	Très bon	Comme dans l'état proche de l'état naturel
	Bon	> 60 % de l'extension proche de l'état naturel
	Moyen	< 60 % de l'extension proche de l'état naturel
	Médiocre	< 30 % de l'extension proche de l'état naturel
	Mauvais	≈ 0

Indicateur	A5 Types de substrats
Méthode de relevé	- Relever la présence des types de substrats sur le terrain soit par cartographie complète soit par relevés de plusieurs transects. Relever aussi les secteurs mouillés visibles du fond du lit. - Déterminer les proportions de surface des types de substrats en pourcentage et les indiquer dans l'histogramme.
Moment du relevé	Étiage
Appréciation	Répartition des types de substrats Très bon  <i>Types de substrats</i> Dominance de dépôts de matériaux charriés. Pas ou peu de matériaux grossiers consolidés (pavage). Plutôt peu de dépôts de matériaux en suspension. Bon  <i>Types de substrats</i> Répartition égale de tous les types. Moyen  <i>Types de substrats</i> Surtout substrat grossier mélangé à des matériaux charriés. Par endroits, dépôts de matériaux charriés. Médiocre  <i>Types de substrats</i> Principalement fond du lit grossier et consolidé (pavage), parfois mélangé à des matériaux charriés. Petites surfaces avec des dépôts de matériaux charriés. Mauvais  <i>Types de substrats</i> Principalement fond du lit grossier et consolidé (pavage), localement aussi mélange à un peu de matériaux charriés.

Indicateur	A6 Colmatage interne
Méthode de relevé	▪ Déterminer le colmatage interne sur le terrain dans plusieurs transects. ▪ Représenter les proportions de surface des cinq classes de colmatage dans l'histogramme.
Moment du relevé	Étiage
Appréciation	Répartition des degrés de colmatage Très bon p  Degrés de colmatage Principalement aucun colmatage ou faible colmatage. Pas de colmatage fort ou de colmatage total. Bon p  Degrés de colmatage Principalement faible colmatage. Localement, aucun colmatage ou colmatage moyen. Peu de colmatage fort. Moyen p  Degrés de colmatage Principalement colmatage moyen. Localement, colmatage fort ou colmatage total. Médiocre p  Degrés de colmatage Principalement colmatage moyen à total. Peu de colmatage faible. Mauvais p  Degrés de colmatage Principalement colmatage fort à total. Peu de colmatage moyen.

Indicateur	A7 Changement du niveau moyen du fond du lit		
Méthode de relevé	- Mesurer les profils transversaux. - Déterminer le niveau moyen du fond de lit et représenter le profil longitudinal du fond du lit moyen. - Comparer le profil longitudinal de l'état initial avec celui de l'état proche de l'état naturel et avec celui de la vallée.		
Moment du relevé	Étiage		
Particularités	Faire la distinction entre l'appréciation dans les tronçons sans rétrécissement du lit et sans déficits de protection potentiels et les tronçons canalisés avec rétrécissement du fond du lit et déficits potentiels de la protection contre les crues.		
Appréciation	État	Pente longitudinale	
		Sans rétrécissement du lit	Avec rétrécissement du lit
	Très bon	–	–
	Bon	≈ pente longitudinale proche de l'état naturel	< pente de la vallée
	Moyen	< pente longitudinale proche de l'état naturel	≈ pente de la vallée
	Médiocre	<< pente longitudinale proche de l'état naturel	> pente de la vallée
	Mauvais		

Indicateur	A8 Changement du niveau du talweg	
Méthode de relevé	- Mesurer les profils transversaux. - Déterminer le niveau du talweg et le représenter dans le profil longitudinal. - Comparer le profil longitudinal avec celui de l'état initial.	
Moment du relevé	Étiage	
Particularités	Le talweg est utilisé comme indicateur indirect pour montrer l'influence du débit de charriage sur le niveau des eaux souterraines. L'indicateur indirect peut être utilisé lorsque le niveau des eaux souterraines est influencé directement par le niveau du cours d'eau. Le talweg est un indicateur intéressant dans les tronçons de cours d'eau libres dont le fond du lit est rétréci par des aménagements de rives.	
Appréciation	État	Niveau du talweg
	Très bon	–
	Bon	Talweg plus haut qu'à l'état initial
	Moyen	Talweg au même niveau qu'à l'état initial.
	Médiocre	Talweg moins haut qu'à l'état initial
	Mauvais	–

H.1.2 Indicateurs biotiques

Le régime de charriage touche directement les espèces de poissons lithophiles qui pondent leurs œufs dans les graviers du fond du lit. Afin que les œufs et les embryons puissent se développer correctement, la couche de gravier au fond du lit doit être meuble et bien irriguée pour permettre une oxygénation permanente. Un recensement direct des populations piscicoles est difficilement possible surtout dans les grandes rivières. En outre, la population totale des espèces de poissons dans un tronçon de cours d'eau dépend de nombreux facteurs différents (évolution des débits, intensité de la pêche, empoisonnement, conditions de température, présence de prédateurs, etc.). C'est pourquoi le suivi de l'efficacité sur ce point se concentre surtout sur la reproduction des espèces lithophiles. Cette dernière est d'ailleurs également directement liée à l'état du fond du lit et au régime de charriage. Selon la région ichtyobiologique, c'est un ou plusieurs des indicateurs ci-après qui sont appropriés pour le suivi de l'efficacité.

Indicateur	B1 Présence d'alevins de truites	
Région ichtyobiologique	Cours d'eau d'une zone à truites	
Mode de relevé	Pêches ponctuelles	
Moment des relevés	Peu après l'émergence des alevins (lorsqu'ils quittent le gravier du fond du lit), selon l'altitude, entre début avril et début juin.	
Particularités	–	
Appréciation	État	CPUE* alevins
	Très bon	>1
	Bon	0,6 – 1,0
	Moyen	0,4 – 0,6
	Médiocre	0,1 – 0,4
	Mauvais	<0,1

* CPUE = Catch per unit effort = capture par unité d'effort = nombre d'individus capturés par site

Indicateur	B2 Présence de jeunes truites de rivière			
Région ichtyobiologique	Cours d'eau en altitude dans la zone à truites avec forte influence de la fonte des neiges.			
Mode de relevé	Pêche et comptage des juvéniles.			
Moment des relevés	Été et automne avant l'arrivée de l'hiver.			
Particularités	Alternative à la pêche ponctuelle des alevins de truites. Le recensement permet également de constater la réussite de la reproduction que l'on sait d'expérience dépendre fortement du régime de charriage.			
Appréciation	État	Densité d'estivaux n/ha		
		Alpes	Préalpes	Plateau/Jura
	Très bon	> 400	> 2000	> 2500
	Bon	300 – 400	1000 – 2000	1500 – 2500
	Moyen	200 – 300	500 – 1000	1000 – 1500
	Médiocre	100 – 200	250 – 500	250 – 1000
	Mauvais	< 100	< 250	< 250

Indicateur	B3 Nombre de frayères dans les cours d'eau des zones à truites ou à ombres	
Région ichtyobiologique	Eaux de la zone à truites ou à ombres	
Mode de relevé	Cartographie des frayères et lieux potentiels de frai.	
Moment des relevés	Automne et début d'hiver (si possible peu après la saison de frai des truites de rivière et des truites de lac).	
Particularités	Le recensement donne un indice de l'effectif de truites et de leur activité de reproduction ainsi qu'une estimation de la présence d'alevins après l'émergence au printemps. L'indicateur doit être établi en complément des pêches d'alevins. Le cours d'eau doit avoir une largeur maximale de 40 m et le tronçon à cartographier, une longueur minimale de 1000 m.	
Appréciation	État	Nombre de frayères/km
	Très bon	≥ 20
	Bon	12 – 19
	Moyen	6 – 11
	Médiocre	1 – 5
	Mauvais	0

Indicateur	B4 Nombre et densité des alevins et des larves d'ombres	
Région ichtyobiologique	Cours d'eau de la zone à ombres et à barbeaux	
Mode de relevé	Compter (de visu) les larves d'ombres dans des tronçons de 100 à 200 m de long à proximité des rives et déterminer la densité (nombre de larves par 100 m).	
Moment des relevés	Printemps (d'avril à mai).	
Particularités	Le recensement simultané des micro-habitats potentiels pour les larves d'ombres à proximité des rives permet en outre de déduire l'offre d'habitat pour cette phase de vie déterminante pour les effectifs d'ombres.	
Appréciation	État	Larves d'ombres/100m
	Très bon	>250
	Bon	100 – 250
	Moyen	10 – 100
	Médiocre	> 0 – 10
	Mauvais	0

Indicateur	B5 Nombre de juvéniles des espèces rhéolithophiles	
Région ichtyobiologique	Cours d'eau riches en espèces de la zone à ombres et à barbeaux.	
Mode de relevé	Pêches ponctuelles près des rives et comptage des juvéniles de l'année de la guilde des espèces rhéolithophiles (barbeau, nase, spirin, vandoise, truite de rivière, chabot, etc.)	
Moment des relevés	Fin d'été/automne.	
Particularités	–	
Appréciation	État	CPUE espèces rhéolithophiles (longueur : 1-5 cm)
	Très bon	> 2
	Bon	1 – 2
	Moyen	0,5 – 1
	Médiocre	0,25 – 0,5
	Mauvais	< 0,25