

Centre d'Ingénierie Hydraulique

Rémi LOIRE (remi.loire@edf.fr)

APPRÉHENDER LA RECHARGE SÉDIMENTAIRE AU TRAVERS DE DIVERS EXEMPLES

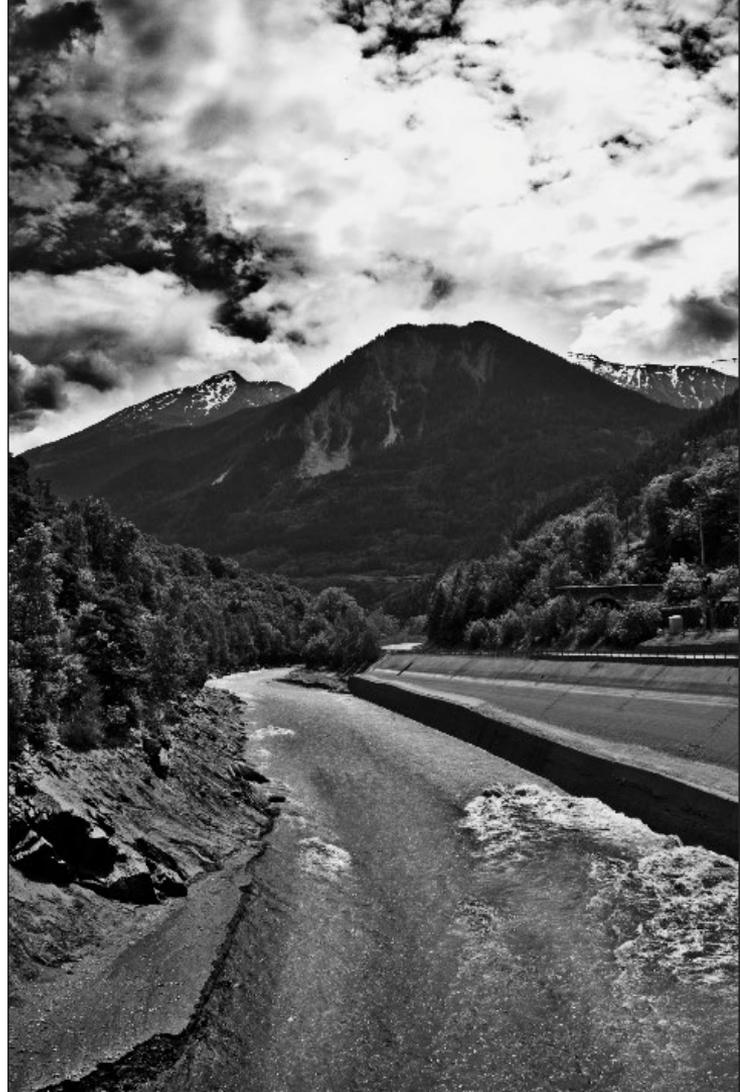
ARRA²

Pinay
8 novembre 2022





CONTEXTE



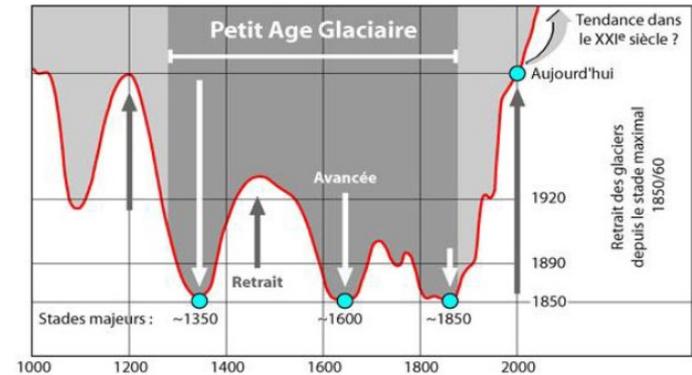
CONTEXTE

RARÉFACTION DE LA CHARGE SÉDIMENTAIRE

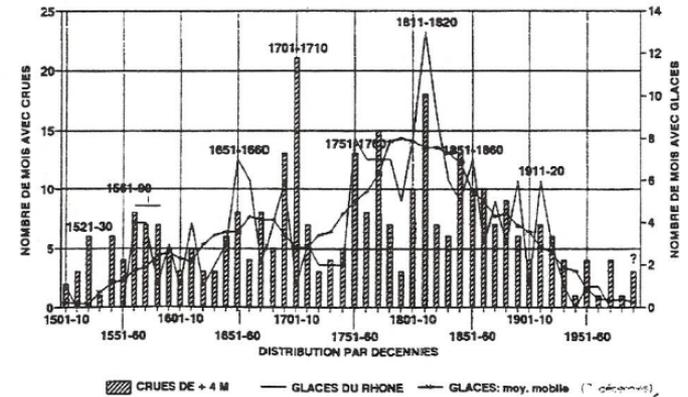
- D'origine naturelle d'origine naturelle, fin du PAG et réchauffement récent :
 - ↗ Températures (Lamb, 1982 ; Ladurie, 1983 ; Grove, 1988)
 - ↘ Fréquence / intensité des crues (Pichard, 1995 ; Miramont & Guilbert, 1997)
 - Revégétalisation naturelle des versants (Vallauriet al., 1997)



Variations glaciaires durant le Petit Age Glaciaire



Maisch, 1993

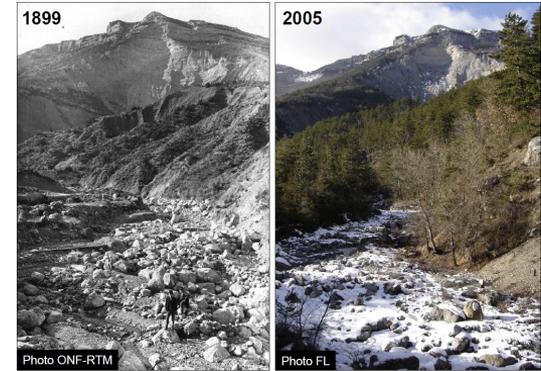


Pichard, 1995

CONTEXTE

RARÉFACTION DE LA CHARGE SÉDIMENTAIRE

- D'origine anthropique, multifactorielle :
 - Endiguements / rectifications (Arnaud-Fassetta, 2003 ; Bravard, 2006 ; Leclair, 2016)
 - Déprise agricole (Sclafert, 1959 ; Baratier, 1961)
 - Travaux RTM (Miramontet al., 1998 ; Bravard, 2002)
 - Extractions (Landonet & Piégay, 1994 ; Bravard & Clemens, 2008)
 - Barrages (Surian, 1999 ; Rollet et al., 2013)



Liébault, 2010 - Drôme

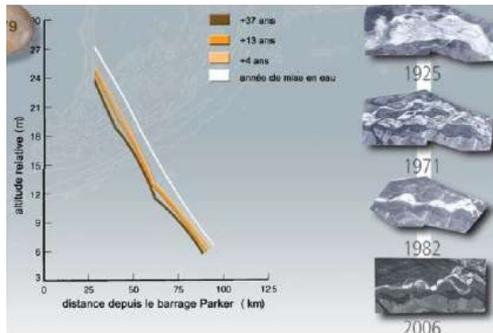


Isère

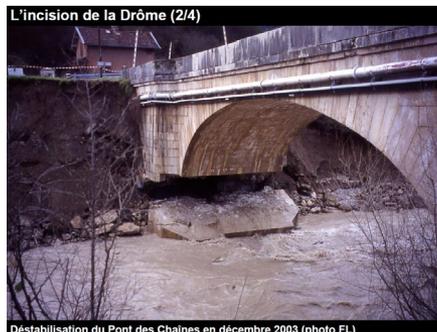
CONTEXTE

AVEC DES CONSÉQUENCES MORPHOLOGIQUES

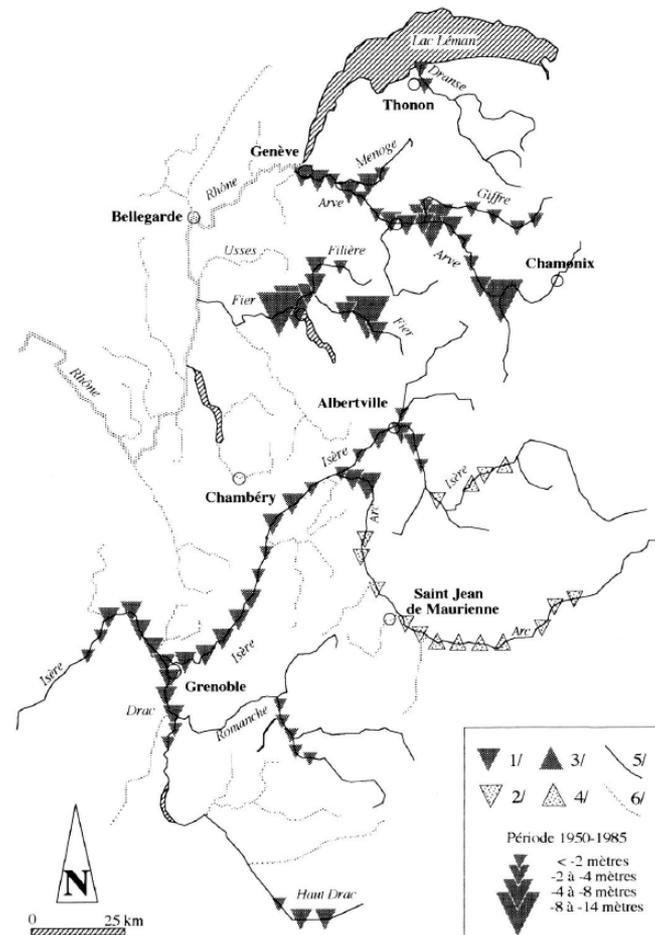
- Forte contraction des bandes actives (Girel & Pautou, 1994, Peiry & Nouguier, 1994, Liébault & Piégay, 2002, Provensal et al., 2014...)
- Incision des cours d'eau (Peiry et al., 1994, Piégay & Peiry, 1997, Malavoi, 2009...)



Malavoi & Bravard, 2010



Liebault, 2003

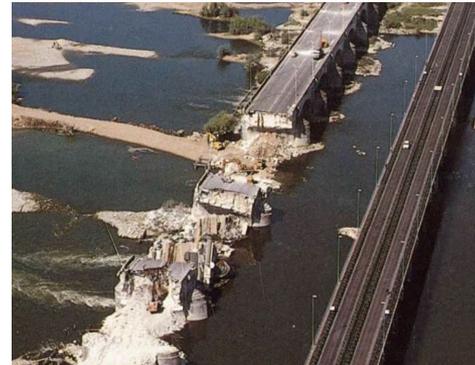


Peiry et al., 1994

CONTEXTE

AVEC DES CONSÉQUENCES MORPHOLOGIQUES ET ANTHROPIQUES

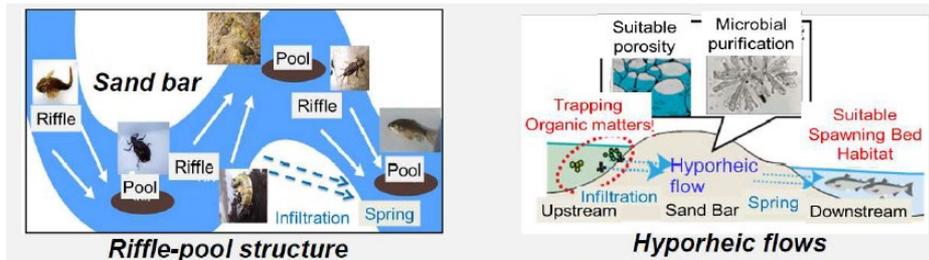
- Uniformisation de la rivière, disparition des habitats, pertes de frayères
- Déconnexion des annexes fluviales (pertes d'habitat et de fonctionnalités)
- Déconnexion des milieux rivulaires (dépérissement ripisylve, etc...)
- Modification des échanges nappes / rivières : difficultés pour les captages AEP
- Risques génie civil (déchaussement d'ouvrages d'art, digues...)
- Accélération des érosions côtières et enfoncement des deltas



CONTEXTE

AVEC DES CONSÉQUENCES BIOLOGIQUES

- Lien fort entre biocénose et substrat
- Pertes en habitats
 - pour espèces benthiques lithophiles: invertébrés (plécoptères, trichoptères, éphéméroptères, ...), périphyton (diatomées en particulier)
 - De ponte pour les espèces piscicoles et rhéophiles
- Pertes en diversité biologique en lien avec la diversité des macroformes, diversité des écoulements
- Dysfonctionnement des processus écologiques notamment dans la zone hyporhéique (matière organique, filtration, épuration, régulation thermique,...)
- ...



Sumi et al., 2021

UNE SOLUTION : LA RÉINJECTION

MAIS ENCORE BEAUCOUP DE QUESTIONS...

- Quels objectifs et quels indicateurs ?

- Quel dimensionnement ?
 - Quel volume réinjecter?
 - Quelle granulométrie ?
 - A quel endroit ?
 - Avec quelle méthode ?
 - A quelle fréquence?
 - A quelle période?
 - Avec quelle réglementation?

- Quels effets attendus sur la biologie?

- Quels suivis ? Avec quels outils ?



LA RÉINJECTION, OÙ? QUOI? COMMENT?

VERS UN GUIDE CONSACRÉ À LA RÉINJECTION SÉDIMENTAIRE



- Répondre aux questions posées précédemment
- ... en s'appuyant sur les différents retours d'expériences nationaux et internationaux (littérature scientifique, colloques, workshops spécialisés – notamment ISRivers 2022 - , entretiens...)

- Groupe de travail

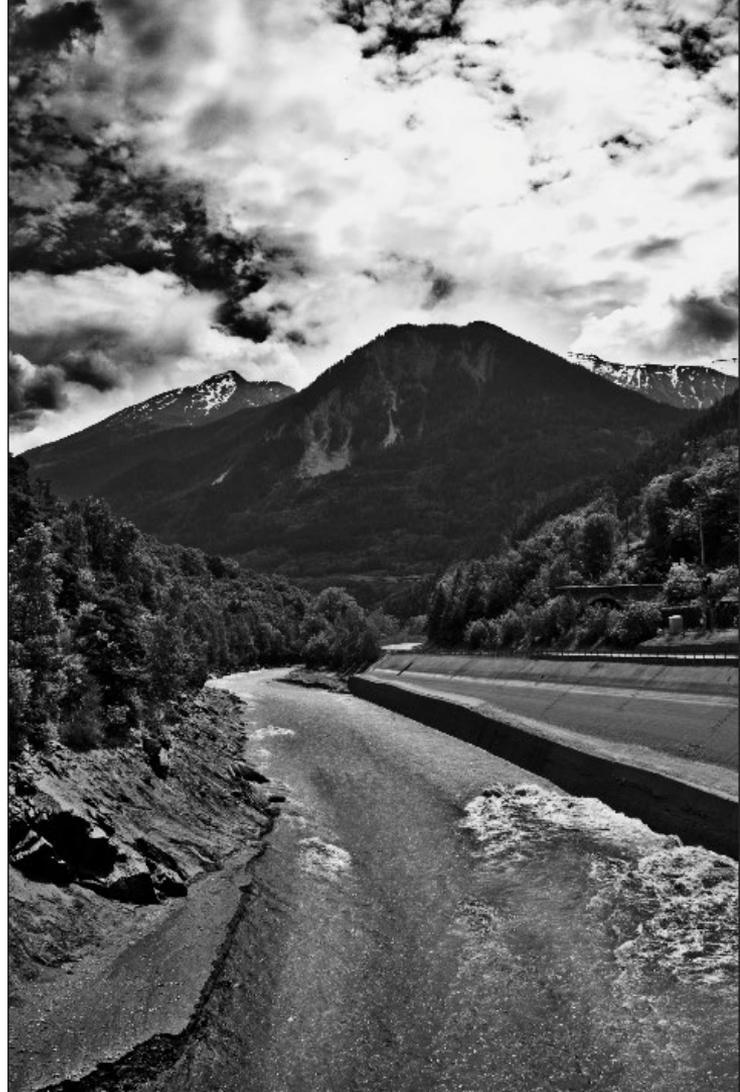


EPFL

- Échéance :
 - Rédaction : T3 2022 – T3 2023
 - Publication : T1 2024

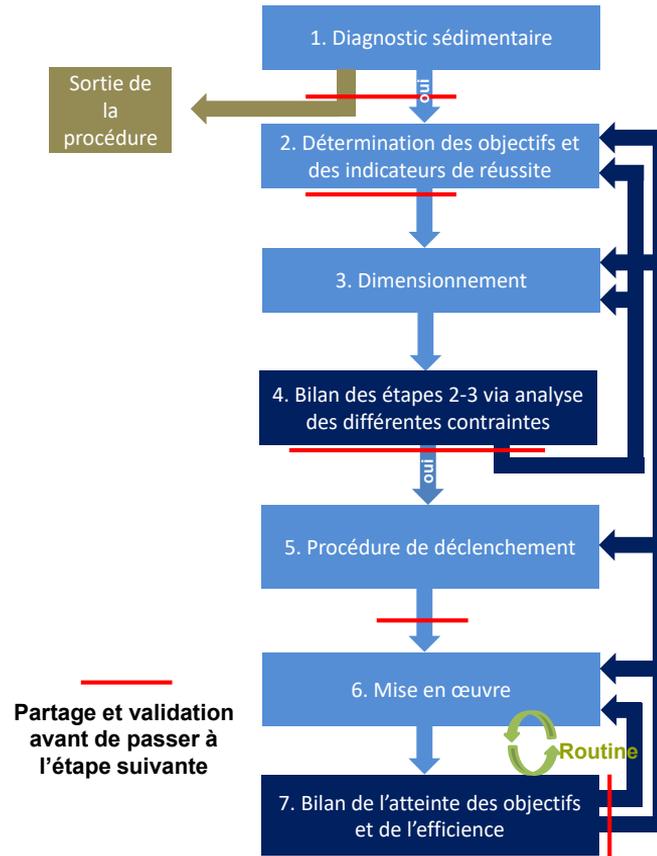


PRINCIPE GÉNÉRAL



PRINCIPES GÉNÉRAUX DE MISE EN ŒUVRE

UN LOGIGRAMME BASÉ SUR LE MANAGEMENT ADAPTATIF





OBJECTIFS



LA RÉINJECTION POUR QUELS OBJECTIFS?

DE MANIÈRE SCHÉMATIQUE



Objectifs morphologiques

Réhabiliter un habitat

Réhabiliter un
plancher alluvial

Restaurer des
macroformes

Restaurer un style
fluvial

Sous-objectifs

Espèces cibles

Rehausser / stabiliser
Espèces cibles

Restaurer la
fonctionnalité

Retrouver un
Fonctionnement
Pseudo-naturel



Garantir la continuité sédimentaire
Alimenter les lâchers morphogènes

Fréquence

RÉHABILITER UN HABITAT

UN OBJECTIF TRÈS CIBLÉ



- On cherche à améliorer une fonctionnalité très spécifique du système
- On constate un état sédimentaire dégradé que l'on souhaite localement corriger
- La réhabilitation d'habitat la plus courante concerne la restauration des frayères

Amont



Aval



Zolezzi et al., 2022 : Stramentizzo Dam, Avisio River

- Exemples d'indicateurs de réussite :
 - Evolution de la répartition granulométrique avec x% de graviers entre 8 mm et 4 cm
 - Atteinte de x% de surfaces favorables à la fraie
 - Evolution de x% du nombre de frayères actives



Jodeau et al., 2022 : Maronne

RÉHABILITER UN PLANCHER ALLUVIAL

PLUSIEURS TYPES D'OBJECTIFS



- Recréer un substrat alluvial diversifié favorable au fonctionnement biologique
- Reconnecter les milieux périphériques (ripsylve, annexes fluviales...)
- Restaurer le fonctionnement hyporhéique et les échanges avec la nappe
- Protéger les ouvrages en génie civil
- ...



SyBTB 2021- Bonnieure (16)



RÉHABILITER UN PLANCHER ALLUVIAL

PLUSIEURS TYPES D'OBJECTIFS



Exemples d'indicateurs de réussite :

- Atteinte de l'exhaussement des fonds ciblé
- Variation positive de x% en moyenne de hauteur de nappe
- Evolution granulométrique vers plus d'hétérogénéité
- ...



Wyzga et al., 2021 - Krzczonowka River



RESTAURER LES MACROFORMES

VERS UNE RESTAURATION PLUS COMPLÈTE



Atteindre les objectifs précédents Zolezzi et al., 2022 : Ova Spin Dam, Spöl River – « natural sediment reinjection »

Favoriser les processus sédimentaires (Ts, érosion des berges...)

Favoriser la diversité des faciès

Favoriser la diversité des habitats aquatiques

Favoriser la diversité des habitats terrestres

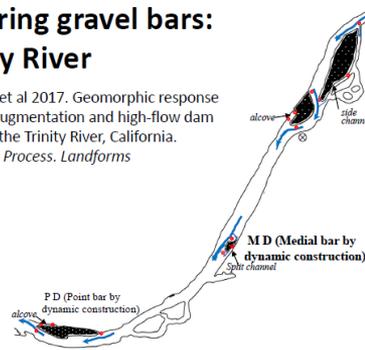
Favoriser le renouvellement des habitats et l'installation de milieux pionniers

...



Ecological benefits of restoring gravel bars: Trinity River

Gaeuman et al 2017. Geomorphic response to gravel augmentation and high-flow dam release in the Trinity River, California. *Earth Surf. Process. Landforms*



Lowden Ranch site in 2011 restored a diverse types of gravel bars features along the 1,450 m reaches



2011.8 (Post-project)

Gaeuman et al., 2014

RESTAURER LES MACROFORMES

VERS UNE RESTAURATION PLUS COMPLÈTE

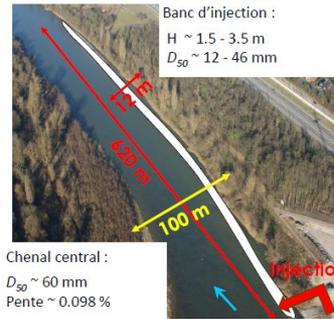


INTERREG – 23 000 m³ en Octobre 2010

Redynamisation du Vieux Rhin
Aachdynamisierung des Restrheins

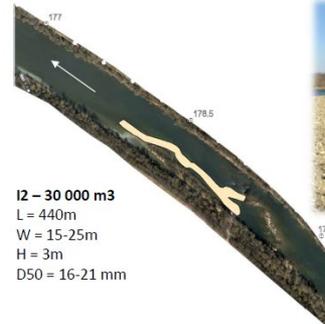
■ Exemples d'indicateurs de réussite :

- Evolution du nombre de bancs de x%
- Evolution du nombre de faciès de x%
- Variation moyenne de hauteur de nappe de x%



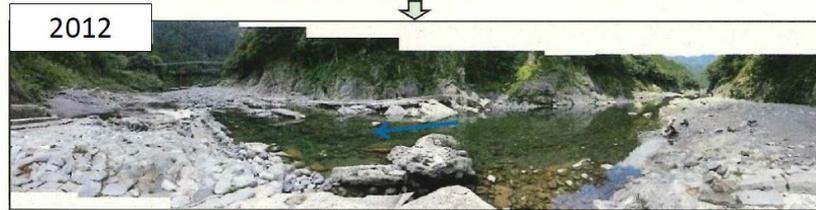
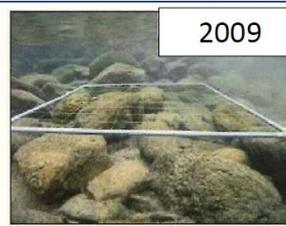
INTERREG IV Rhin Supérieur
F. Arnaud (2015)

KEMBS I1 & I2 – 18 000 m³ (2015) & 30 000 m³ (2016)



RESTAURER LES MACROFORMES

VERS UNE RESTAURATION PLUS COMPLÈTE



2009



2017

MLIT

Sumi et al., 2022 – Naka River

RÉHABILITER LE STYLE FLUVIAL

L'AMBITION MAXIMALE

- Atteindre les objectifs précédents
- Restaurer les processus dans leur ensemble
- Exemples d'indicateurs de réussite :
 - Evolution de l'indice de tressage de x%
 - Evolution de x% de la largeur moyenne
 - ...



Laval et al., 2021



Brousse et al., 2021

CAS PARTICULIERS

LA CONTINUITÉ SÉDIMENTAIRE

- Préserver le transit sédimentaire
- Exemples d'indicateurs de réussite :
 - Transfert de $x\%$ des sédiments stockés en retenu
 - Préservation de $x\%$ du nombre de faciès en aval
 - Préservation de $x\%$ du nombre de bancs en aval
 - Maintien du profil en long en aval
 - Maintien de l'hétérogénéité granulométrique en aval
 - ...



Saint Sauveur - Buëch



CAS PARTICULIERS

ALIMENTER LES LÂCHERS MORPHOGÈNES

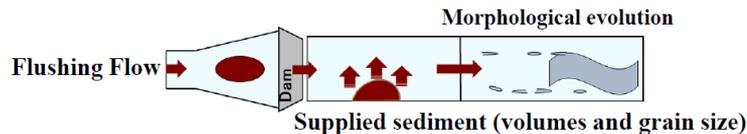
- En aval des barrages capacitifs avec interruption de la continuité sédimentaire
- La réinjection les potentiels effets négatifs du lâcher sur l'état et la dynamique fluviale



Crue artificielle de la Sarine

14-15 septembre 2016

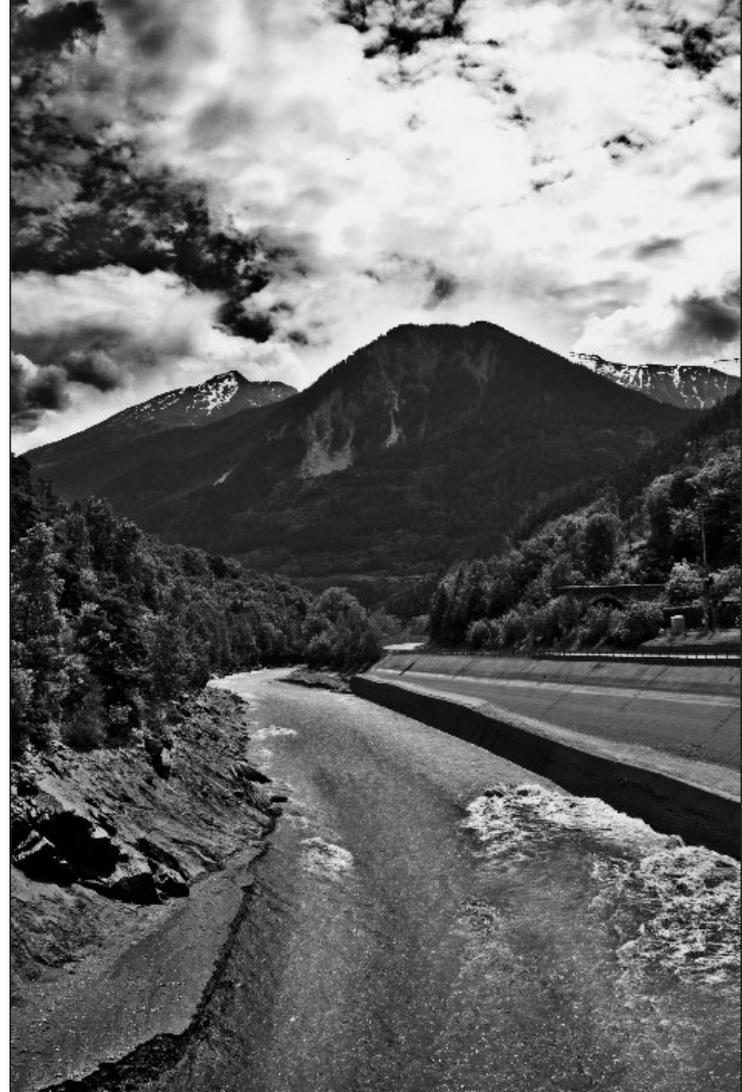
Etat de Fribourg, 2016



Sumi et al., 2022



DIMENSIONNEMENT



QUEL DIMENSIONNEMENT ?

QUEL VOLUME INJECTER ?

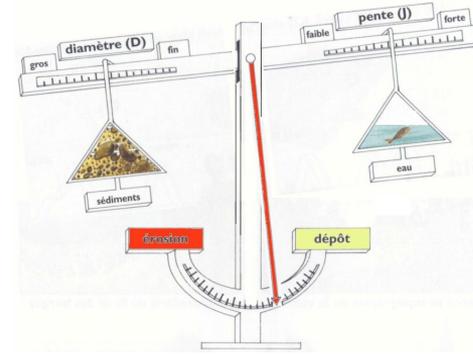
- Des questions fondamentales à se poser au démarrage du projet car les volumes à réinjecter sont souvent limités
- La réinjection est-elle durable?
 - Le one shot est-il utile ?
 - Un volume trop faible est-il utile?
 - Est-il pertinent de vouloir à tout pris mettre un tronçon de rivière sous perfusion?
 - Est-il pertinent d'accompagner un tronçon de rivière dans sa métamorphose fluviale?
 - Faut-il accepter la métamorphose et investir l'argent et l'énergie dans d'autres types / secteurs de restauration?



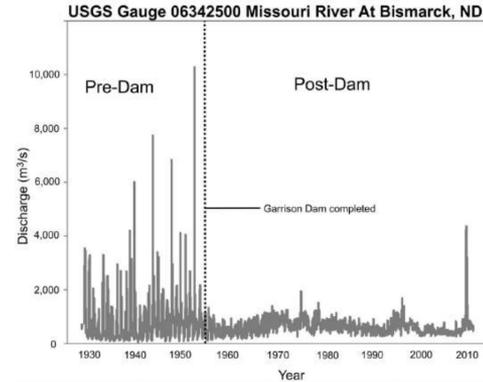
QUEL DIMENSIONNEMENT ?

QUEL VOLUME INJECTER ?

- Approche pragmatique 1 : on remet ce qu'on a à disposition
- Approche pragmatique 2 : on remet ce qu'on peu remettre (surface disponible)
- Approche empirique
 - Elle se base sur la connaissance du terrain et des conditions d'écoulement
 - Repose sur le bon sens
 - Appropriation du retour d'expérience pour améliorer les conditions de réinjection pour les prochains essais
 - Dimensionnement plus facile pour les frayères
- Approche géomorphologique
 - Détermination des conditions hydrologiques dans la zone de réinjection
 - Calcul du budget sédimentaire
 - Calcul des volumes à mettre en œuvre pour restaurer les formes
 - Estimation de la vitesse de propagation des formes



Lane, 1955



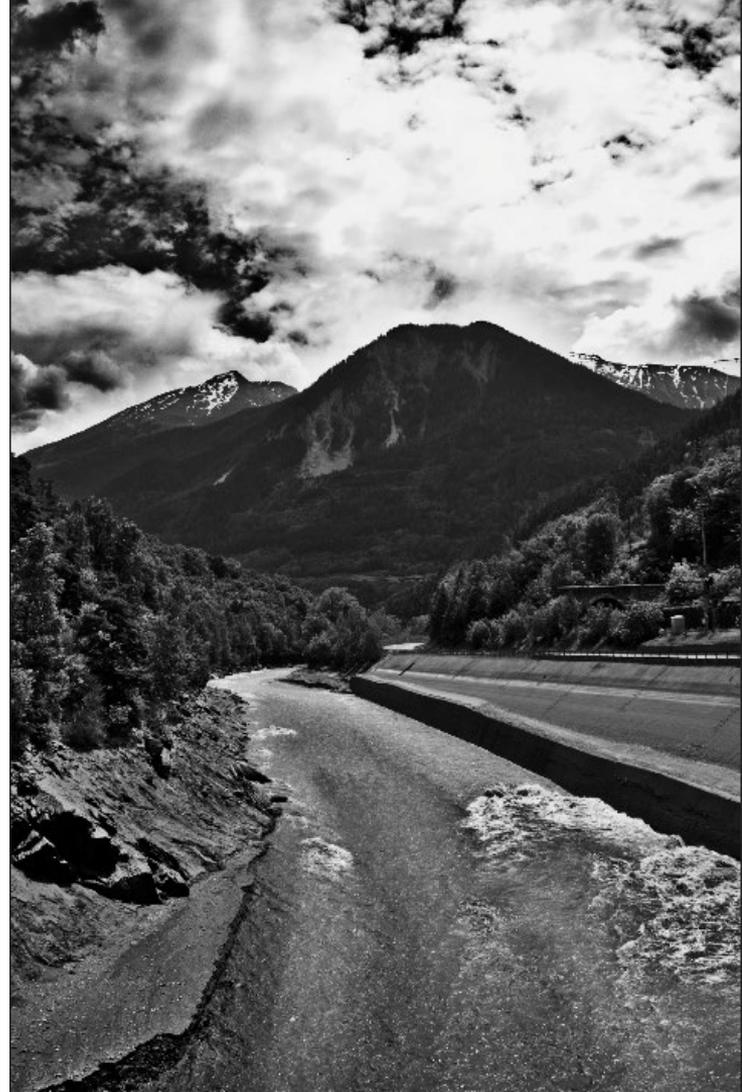
Shalak et al., 2013

Boutault, 2020

		Q _{br}	Q ₂	Q ₅	Q ₁₀	Q ₂₀	Q ₅₀	Total	
1952 – 2018 (H2)	Natural	Days	80	39	5	4	1	0	129
		Days.y ⁻¹	1.23	0.60	0.08	0.06	0.02	0	1.98
	Dams	Days	27	18	1	0	0	0	46
		Days.y ⁻¹	0.49	0.33	0.02	0	0	0	0.82
Regulation (in %)		-80	-46	-81	-100	-100	0	-59	



GRANULOMÉTRIE

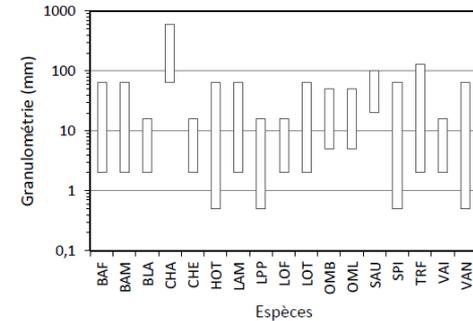


QUEL DIMENSIONNEMENT ?

QUELLE GRANULOMÉTRIE ?

- Pour schématiser, la définition de la granulométrie à réinjecter varie principalement entre l'objectif de restauration des habitats et la gamme des autres types de réinjection
- Restauration des habitats :
 - Dans l'idéal la réinjection doit satisfaire la majorité des espèces
 - Dans la pratique on s'attache à favoriser une espèce « cible »
 - La définition de la référence granulométrique nécessite d'acquérir une connaissance des peuplements piscicoles
 - Dans la pratique, la prise en compte des invertébrés est plus rare...
- Dans le cas des réinjections plus massives la question de la granulométrie ne pose problème que lorsque :
 - la présence de fines est véritablement trop importante
 - les sédiments sont trop grossiers (cas par exemple de certaines terrasses alluviale) et dépassent la compétence du cours d'eau
 - Le contexte hydrologique du bassin versant est perturbé par un ouvrage hydraulique

BAF	Barbeau fluviatile (<i>Barbus barbus</i>)
BAM	Barbeau meridionale (<i>Barbus merionalis</i>)
BLA	Blageon (<i>Testes souffia</i>)
CHA	Chabot fluviatil (<i>Cottus perifretum</i>)
CHE	Chevaine (<i>Squalius cephalus</i>)
HOT	Hotu (<i>Chonchostome nassus</i>)
LAM	Lamproie fluviatile (<i>Lampetra fluviatilis</i>)
LPP	Lamproie de planer (<i>Lampetra planeri</i>)
LOF	Loche Franche (<i>Barbatula barbatula</i>)
LOT	Lote (<i>Lota lota</i>)
OMB	Ombre commun (<i>Thymallus thymallus</i>)
OML	Omble fontaine (<i>Salvelinus fontinalis</i>)
SAU	Saumon atlantique (<i>Salmo salar</i>)
SPI	Spirin (<i>Alburnoids bipunctatus</i>)
TRF	Truite commune (<i>Salmo trutta</i>)
VAI	Vairon (<i>Phoxinus phoxinus</i>)
VAN	Vandoise (<i>Leuciscus leuciscus</i>)



Préférences granulométriques pour différentes espèces rhéophiles lors de la reproduction (à partir des données de Kondolf & Wolman, 1993 ; Keith & al., 2011 et Charrais, 2013)

QUEL DIMENSIONNEMENT ?

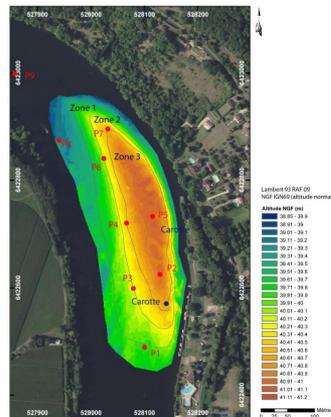
QUELLE GRANULOMÉTRIE ?

- Où trouver les sédiments ?
 - Etude concrète des gisements / plan de gestion si de gros volumes sont nécessaires dans la durée
 - En amont ou dans les retenues des ouvrages hydrauliques
 - Dans les stocks existants (bancs perchés, reliquats de travaux...)
 - Dans des zones de dépôts préférentiels où le transit sédimentaire excède la capacité de transport et peut être la source de désordres (inondations par exemple)
 - En lit majeur (anciennes terrasses alluviales, abaissement de plaines alluviales, matériaux issus de la restauration d'anciens bras...)
 - Dans des carrières...



Epaisseur des alluvions grossières (m)

Thicoipé et al., 2022 – Ain



Guerru, 2022 – Retenue de Mauzac



Guerru, 2022 – Dordogne

QUEL DIMENSIONNEMENT ?

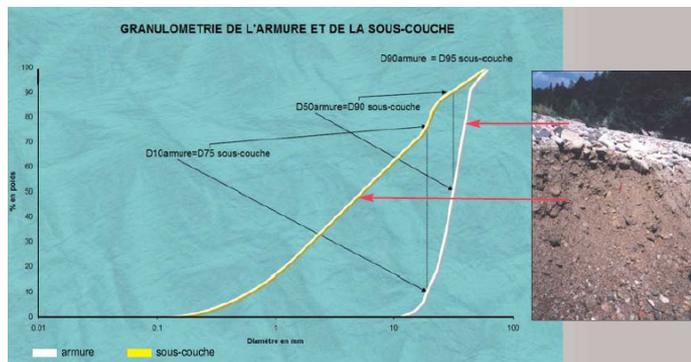
QUELLE GRANULOMÉTRIE ?

- La question du tri des sédiments
 - Opération très onéreuse (risque de ne pas faire l'opération)
 - Quel pourcentage de fines est admissible ?
 - Dépend des objectifs...
 - Dépend des rivières...



HSM, 2021, Pique

MEP 19, 2021, Eau Verte et Tarentaine



Malavoi & Bravard, 2010



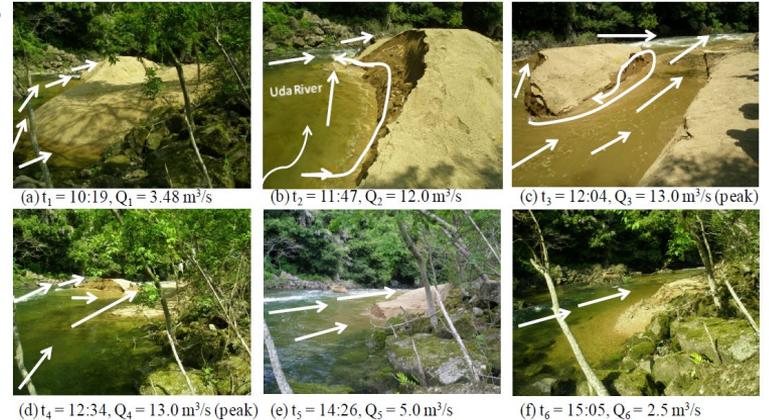
QUEL DIMENSIONNEMENT ?

QUELLE GRANULOMÉTRIE ?

- Vers la réinjection des sédiments fins ?
- S'ils peuvent poser des problèmes dans des quantités importantes (pertes directes pour les biocénoses), on peut constater des besoins aussi en sédiments fins
 - Support biologique (vasière, roselière...) aussi bien en terre qu'en mer
 - Besoins au niveau des estuaires
 - Une littérature scientifique qui commence à s'intéresser à ces questions
 - Quelques cas concrets commencent à être observés



Reynaud et al., 2022 – Rhône



Sumi et al., 2022 – Muru River

Suspended sediment transport and deposition in sediment-replenished artificial floods in Mediterranean rivers

Teresa Serra^{*}, Marianna Soler, Aina Barcelona, Jordi Colomer

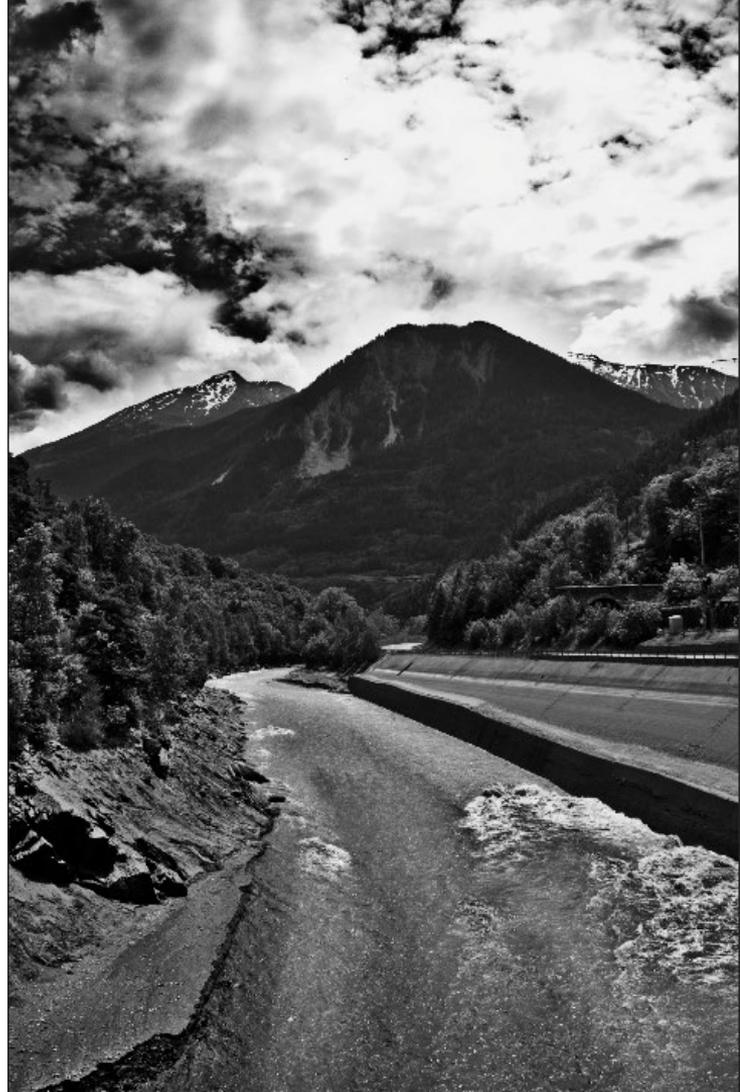
Department of Physics, Universitat de Girona, C/ de la Universitat de Girona, 4, 17003 Girona, Spain

ABSTRACT

Dams and impoundments constructed in rivers produce changes in their hydrological and sediment transport regimes, regulate their flows and reduce the supply of sediments downstream. Artificially inducing floods from reservoirs in conjunction with sediment-replenishment strategies is currently being employed to enhance sediment supply to river catchment areas. In this study, sediment-replenished artificial floods are compared to their non-sediment replenishment counterparts. The hysteretic loops between suspended sediment concentration and water flow present low normalized hysteresis indices (close to zero) in the sediment-replenished artificial flood events. In the current work, sediment-replenishment produced a balanced suspended sediment transport in contrast to the without sediment-replenishment cases. The normalized hysteresis indices varied between the different particle sizes studied and the same water flow, indicating that different types of particles are transported differently despite being in the same water flow. Furthermore, both the suspended sediment transport and the sedimentation rate of particles during the flood events was greater for the sediment replenishment cases than for the non-sediment-replenishment cases. All things considered, sediment-replenished artificial flooding provides a successful management strategy for a more balanced suspended sediment transport that could be used as a river restoration practice.



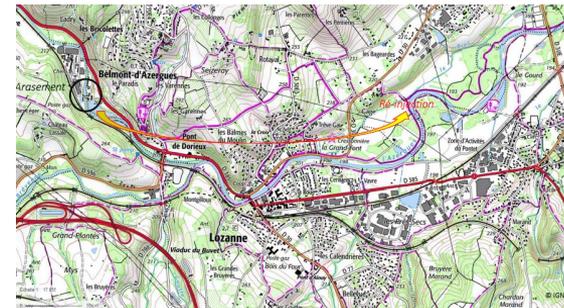
OÙ RÉINJECTER



QUEL DIMENSIONNEMENT ?

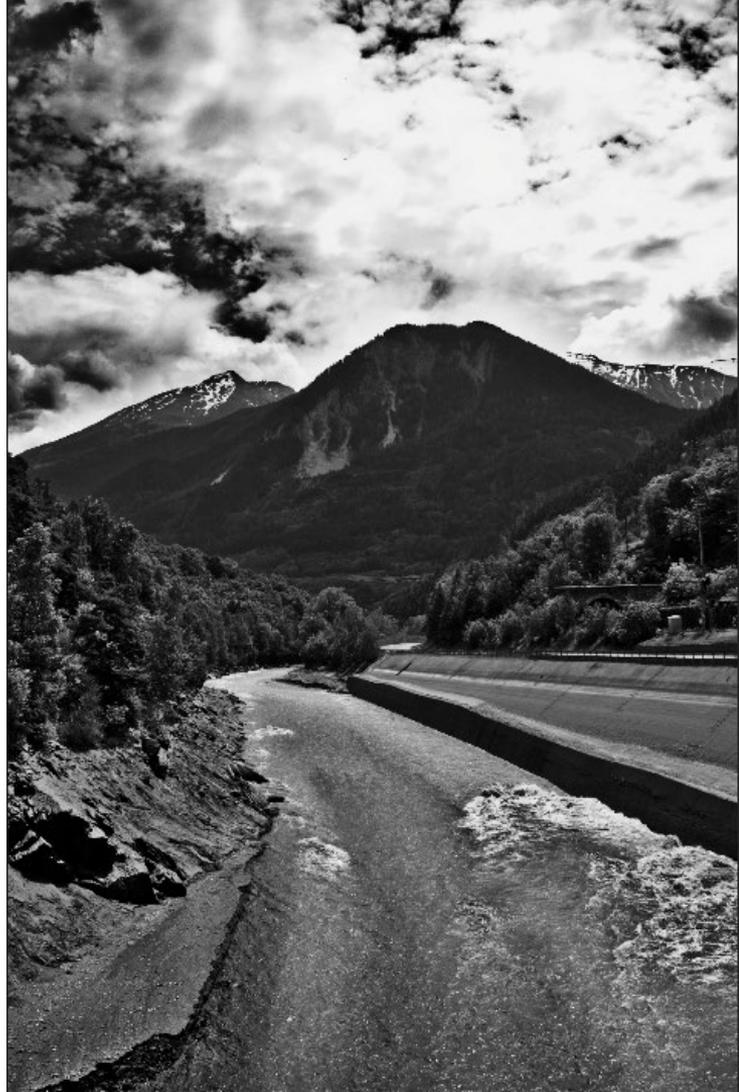
A QUEL ENDROIT ?

- La réponse est parfois simple et d'autres fois extrêmement complexe...
- Pour la restauration des habitats ou la réhabilitation d'un plancher alluvial la réponse est simple : là où c'est nécessaire et possible...
- Dans les autres cas, on cherchera en règle générale à réinjecter au plus près de la zone d'emprunt des sédiments mais cela est dépendant :
 - Des conditions d'accès
 - De la maîtrise foncière (nécessité de trouver des accords)
 - Des conditions environnementales
- Il est possible de ne trouver qu'un site très éloigné. Se pose alors :
 - La question de la distance de transport
 - De la prise en charge du coût de la dégradation des routes
 - De la gêne occasionnée pendant plusieurs mois pour les riverains
 - Et surtout du bilan carbone...





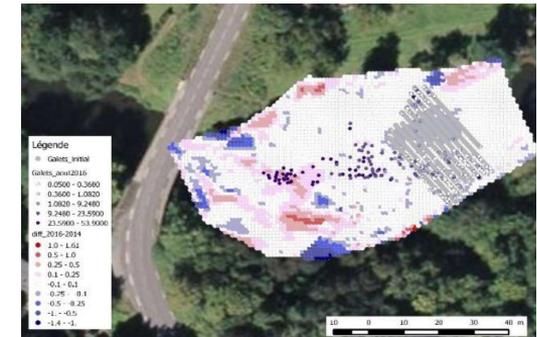
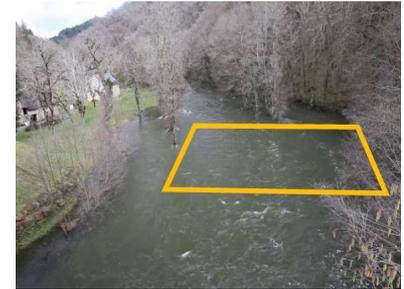
AVEC QUELLE MÉTHODE RÉINJECTER



QUEL DIMENSIONNEMENT ?

AVEC QUELLE MÉTHODE ?

- Réhabiliter un habitat : plutôt chirurgical
- Objectif : reconstituer des patches ou des nappes
- Reconstitution artificielle de la frayère
- Sédiments directement placés sur les faciès de reproduction
- Surface égale aux surfaces que l'on est en droit d'attendre naturellement – estimation selon Delacoste (truite 2-3%)
- Problématique liée à l'instabilité hydraulique
- Nb : les sédiments de la taille granulométrique visés étant souvent peu disponibles à moindre frais, il est rarement observé de faire plusieurs patches de réinjection et de laisser les sédiments former eux-mêmes les frayères



Jodeau et al., 2017 - Maronne

QUEL DIMENSIONNEMENT ?

AVEC QUELLE MÉTHODE ?

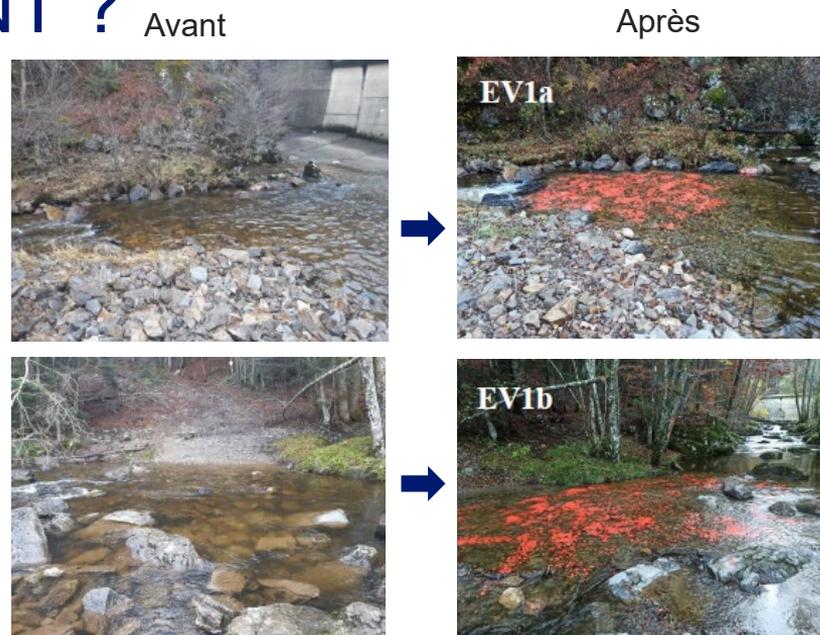
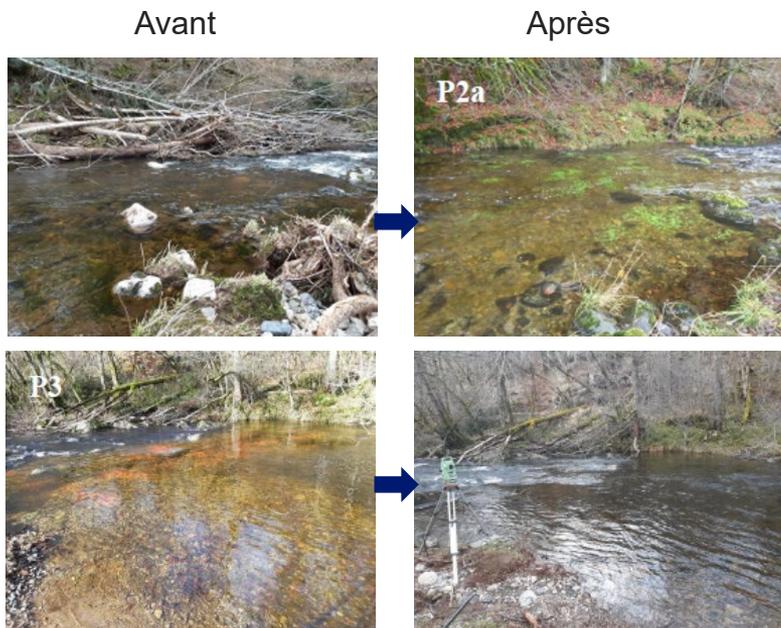
- Réhabiliter un habitat : plutôt chirurgical
- Trouver un compromis stabilité / durabilité



QUEL DIMENSIONNEMENT ?

AVEC QUELLE MÉTHODE ?

- Fonctionne sur de très petits cours d'eau
- Avec les mêmes risques d'exportation des particules



N° Site	Lieu-dit	Longueur projet (m)	Surface projet (m ²)	Longueur réalisée (m)	Surface réalisée (m ²)	Volume projet (m ³)	Volumes réels selon entreprise (m ³)	Volumes réels selon géomètre (m ³)
P1	Brumessanges	16,0	107	20,0	160	28	28	25
P2	La Vassin	13,5	135	0	0	36	0	0
P2'		15,0	89	0	0	15	0	0
P2''		11,0	110	12,0	108	13	14	10
P2'''		13,0	104	17,0	153	13	21	26
P6	Moulin des Anes	8,5	68	7,0	77	15	25	36
P9	Champs/Tarentaine	11,0	115	0	0	29	0	0
P1-EV	Labanut	6,3	26	5,5	25	7	7	7
P2-EV		8,0	40	9,5	62	5	7	13
Totaux		102,3	795	71,0	585	161	102	117



Ecogea, 2021, Eau Verte et Tarentaine

MEP 19, 2021, Eau Verte et Tarentaine

QUEL DIMENSIONNEMENT ?

AVEC QUELLE MÉTHODE ?

- Réhabiliter un matelas alluvial
- 2 modes opératoires sont possibles
 - Réinjecter le volume nécessaire de sédiments sur le linéaire souhaité
 - Réinjecter des gros volumes régulièrement et sur de nombreux sites jusqu'à obtention du niveau de lit souhaité



S. Hervé - CC CPN



F. Goulimy - EPI/PPMA 50

La remise en fond de vallée des petits cours d'eau de plaine doit toujours être suivie d'une recharge en granulats du lit restauré, en particulier lorsqu'il faut creuser un nouveau lit.



S. Hervé - CC CPN

QUEL DIMENSIONNEMENT ?

AVEC QUELLE MÉTHODE ?

- Réhabiliter un matelas alluvial
- Une approche originale sur le Rhin

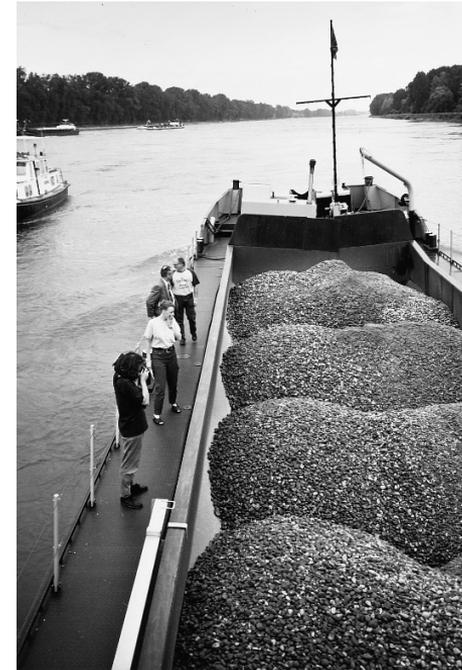
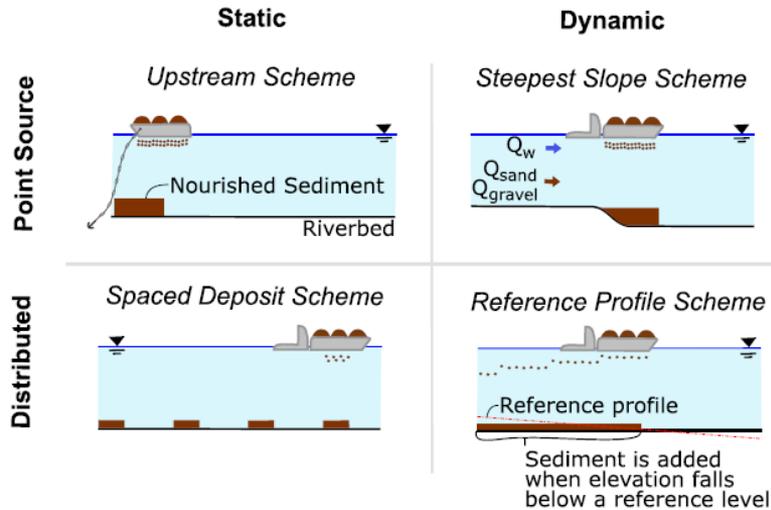


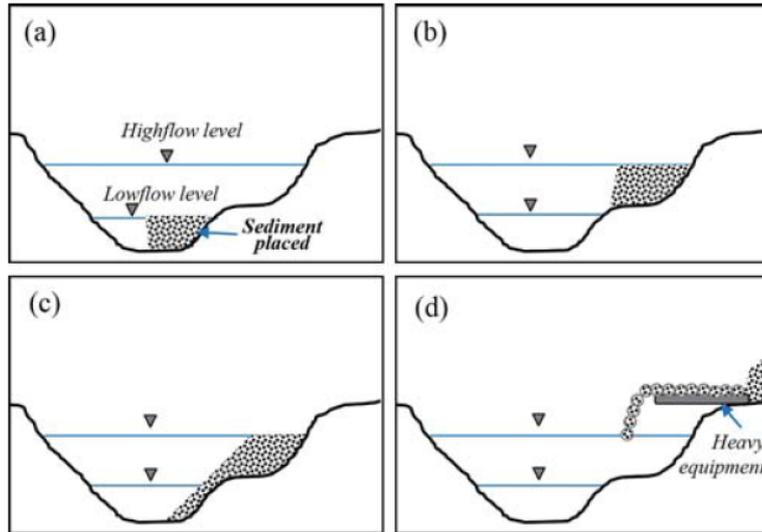
Figure 5. Barge artificially feeding gravel into the River Rhine downstream of the Barrage Iffezheim. (Photograph by author, June 1994.)

Czapiga et al., 2022- Rhin en aval de Bonn

QUEL DIMENSIONNEMENT ?

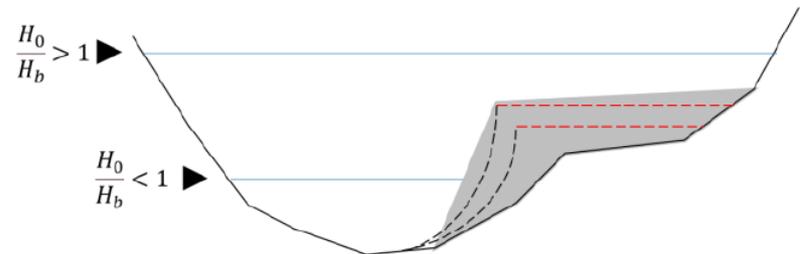
AVEC QUELLE MÉTHODE ?

- Pour les autres objectifs, il existe plusieurs autres méthodes



Ock et al., 2013

- a) Injection dans le lit mineur (remblai / cordon)
- b) Injection à niveau de crue (remblai / cordon)
- c) Injection en cône (talus)
- d) Injection directe

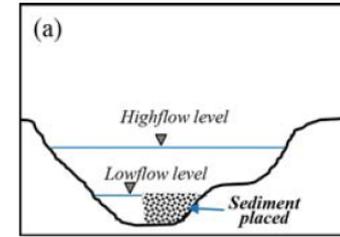


Brousse et al., in prep

QUEL DIMENSIONNEMENT ?

AVEC QUELLE MÉTHODE ?

- Injection dans le lit mineur (remblai / cordon) dans le lit mineur
- Avantages :
 - Transport potentiel pour de petits coups d'eau : efficacité maximale
 - Sédiments directement disponibles pour la création d'habitats si le niveau du toit de sédiment est à hauteur du niveau d'écoulement courant
- Inconvénients :
 - Construction directement dans l'eau (destruction des habitats en place, pêche de sauvetage nécessaire...)
 - Possible mise en suspension de sédiments fins pendant les travaux



Ock et al., 2013



Chardon, 2018



Kantoush et al., 2022 – Mihatu River

QUEL DIMENSIONNEMENT ?

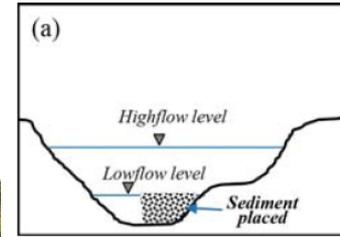
AVEC QUELLE MÉTHODE ?



Schälchli et al., 2010 – Aare River



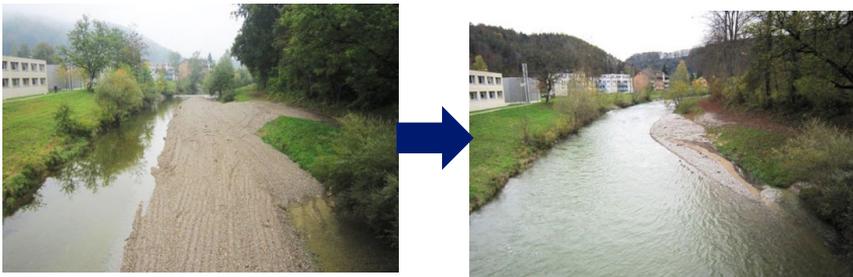
Mörtl et al., 2021 – Sarine River



Ock et al., 2013



Syndicat mixte Asse Bléone 2020



1 mois



Ofev 2017 – Töss à Sennhof

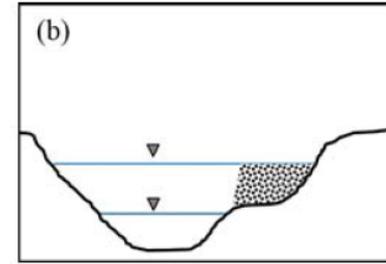


Ariège amont 2022

QUEL DIMENSIONNEMENT ?

AVEC QUELLE MÉTHODE ?

- Injection dans le lit mineur (remblai / cordon) à niveau de crue
- Ce sont souvent des hydrides entre injection dans le lit mineur et au niveau de crue
- Avantages :
 - Les sédiments les plus grossiers sont mis en prélevés lorsque la rivière à la capacité de les transporter (pas de transport sélectif)
 - Permet de mettre en place de très gros volumes à prix réduits
 - Pas d'empiètement sur la zone en eau
 - Peut être mobilisé par des coups d'eau intenses même si brefs
- Inconvénients
 - Difficile de multiplier les sites avec cette méthode
 - Ne fonctionne que pendant les gros coups d'eau



Ock et al., 2013



Sumi et al., 2022

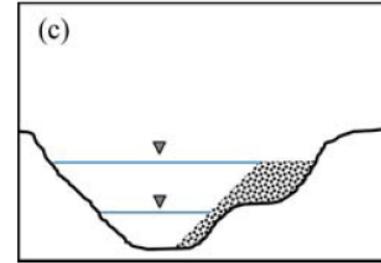


Buech 2016, 2018

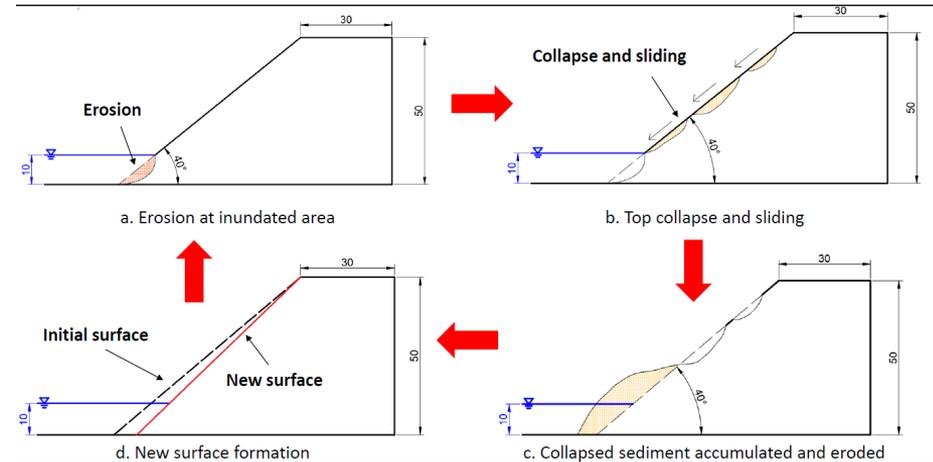
QUEL DIMENSIONNEMENT ?

AVEC QUELLE MÉTHODE ?

- Injection en cône / talus
- Avantages :
 - Rapidement mobilisé
 - Permet la délivrance locale d'un important volume de sédiments (intéressant pour une injection dans les milieux profonds afin de diversifier l'habitat)
 - Facile à mettre en œuvre (déversement camion)
- Inconvénients
 - De gros volumes sont nécessaires pour construire le cône
 - Les sédiments grossiers peuvent s'accumuler au pied du talus pendant les petites crues



Ock et al., 2013



Sumi et al., 2022

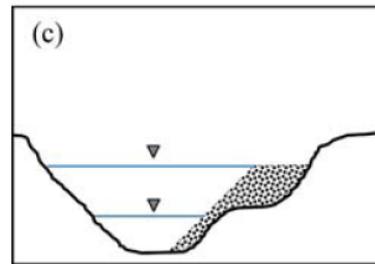
QUEL DIMENSIONNEMENT ?

AVEC QUELLE MÉTHODE ?

- Injection en cône / talus



Frontaulière, EDF 2018



Ock et al., 2013



Kondolf., 1997 – Sacramento river



Novembre 2013 (1300 m³)

Juillet 2015

Thicoipé et al., 2022 – Ain



Sumi et al., 2022

QUEL DIMENSIONNEMENT ?

AVEC QUELLE MÉTHODE ?

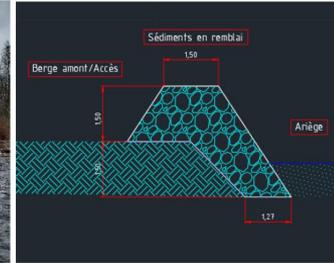


Lin et al., 2022 – Naka River

QUEL DIMENSIONNEMENT ?

AVEC QUELLE MÉTHODE ?

- Un suivi du dimensionnement essentiel



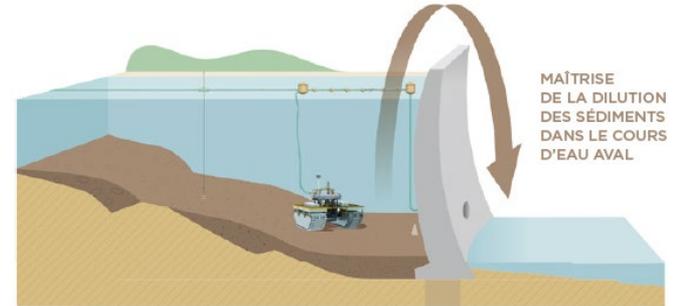
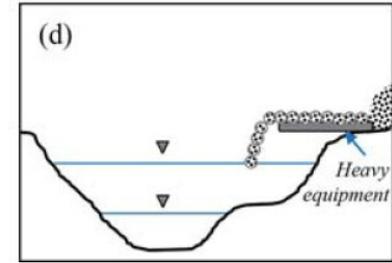
- Tout comme le suivi du chantier...



QUEL DIMENSIONNEMENT ?

AVEC QUELLE MÉTHODE ?

- Injection directement dans le lit
- Avantages :
 - Permet une réinjection dans l'eau sans avoir à y intervenir
- Inconvénients
 - Difficulté de mise en œuvre
 - Le panel granulométrique de la rivière n'est pas nécessairement entièrement mobilisé



QUEL DIMENSIONNEMENT ?

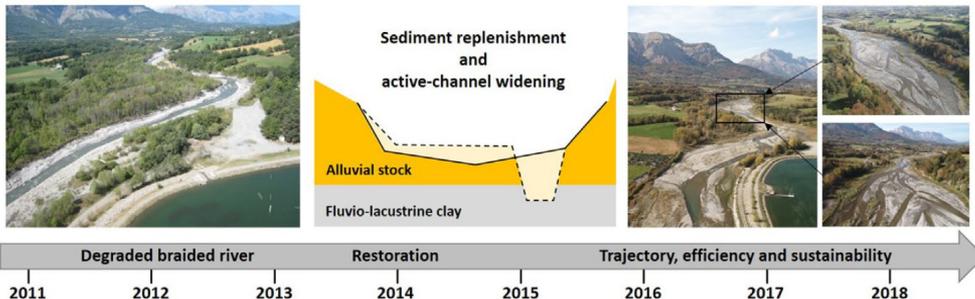
AVEC QUELLE MÉTHODE ?

- Restaurer le style fluvial par réinjection / restauration
- Travaux conséquents !
- Il est souvent nécessaire de créer un seuil à l'aval pour garantir la durabilité...

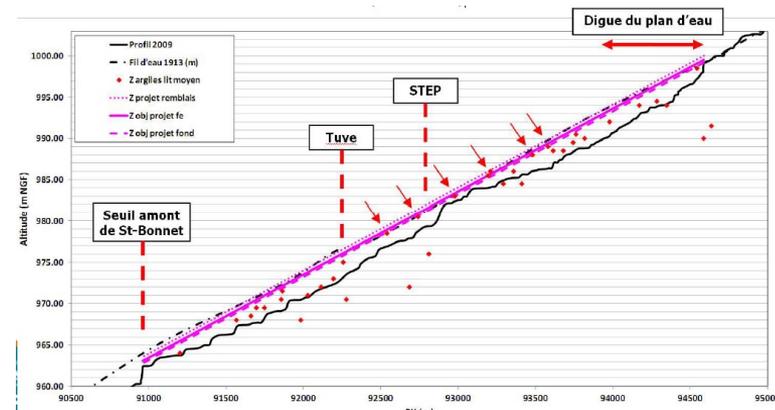


Laval et al., 2022

BRAIDED-RIVER RESTORATION

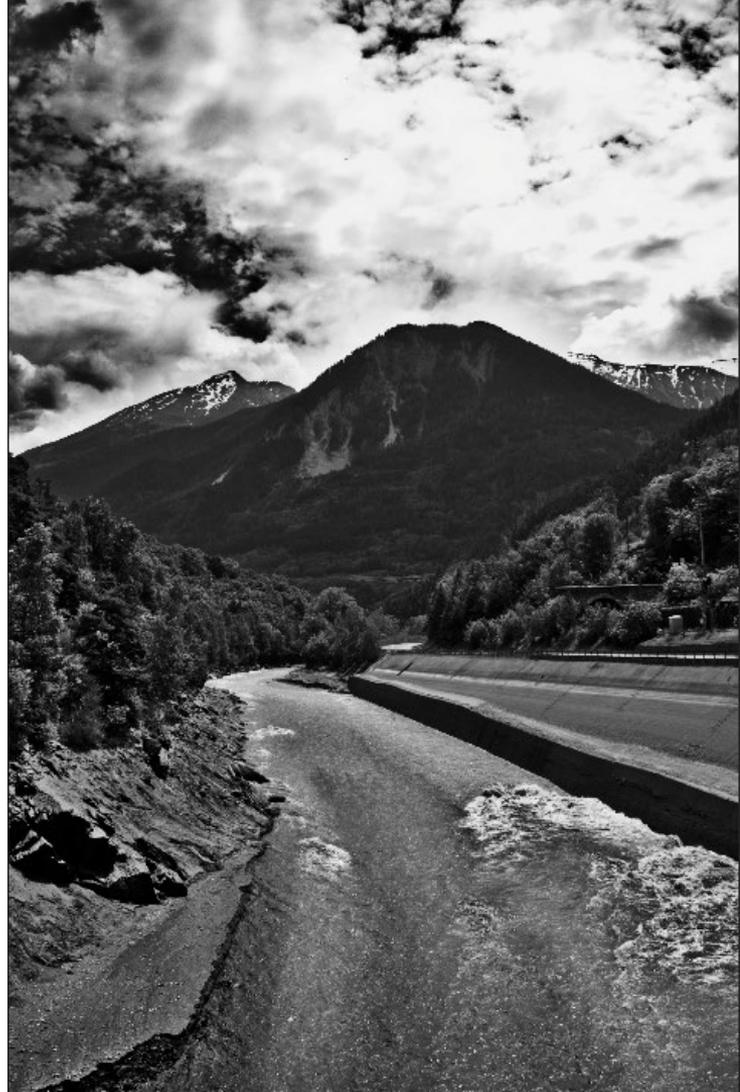


Brousse et al., 2021





A QUELLE FRÉQUENCE ?



QUEL DIMENSIONNEMENT ?

A QUELLE FRÉQUENCE ?

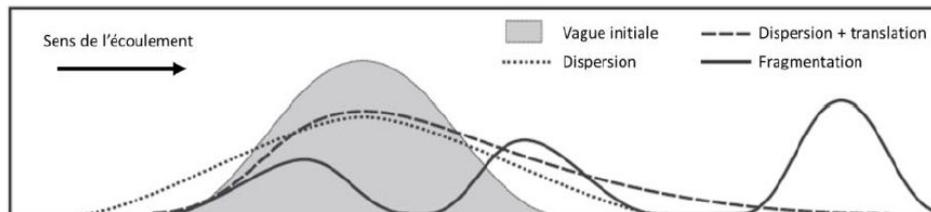
- Habitats : dès qu'ils ne sont plus fonctionnels :
 - Effets du transport sélectif lors des petits coups d'eau
 - Destruction complète lors des crues les plus importantes
 - Colmatage
- Restauration du plancher alluvial, des macroformes et du style fluvial :
 - Chercher un état d'équilibre acceptable
 - En fonction du budget sédimentaire défini
 - Reconstitution du stock s'il est épuisé
 - Suivi : apparition des premiers dysfonctionnements



Laval et al., 2021 - Drac



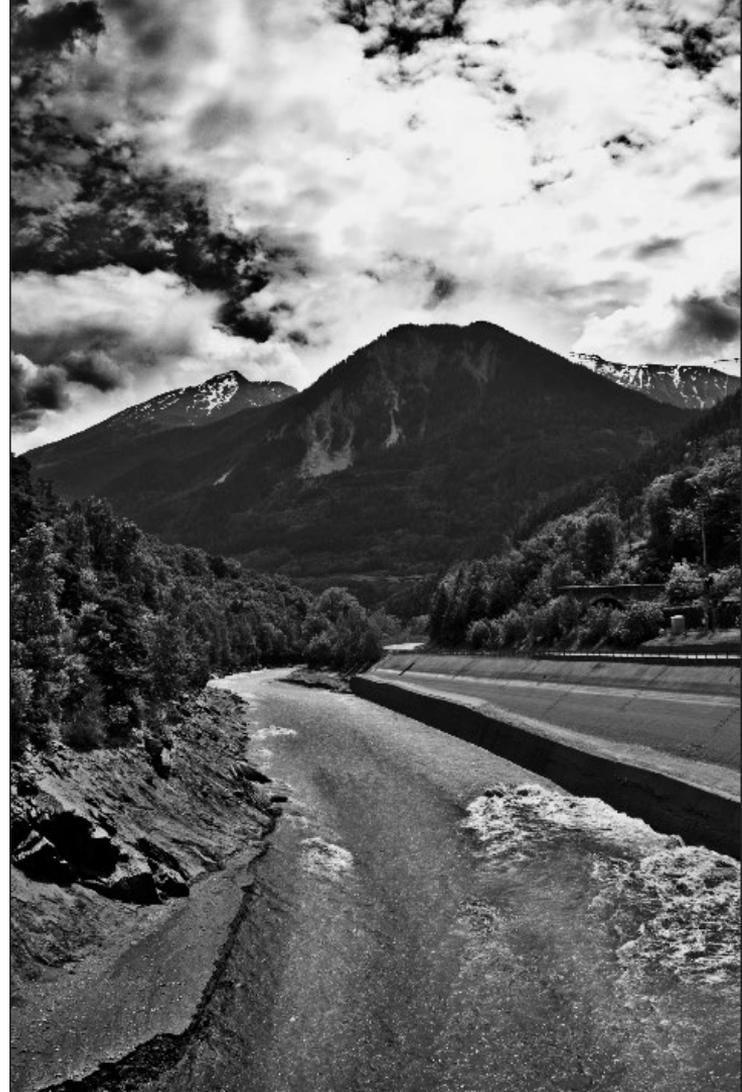
Loire et al., 2018 - Buëch



Gaeuman et al., 2017



A QUELLE PÉRIODE ?



QUEL DIMENSIONNEMENT ?

ENVIRONNEMENT ET PÉRIODE DES TRAVAUX

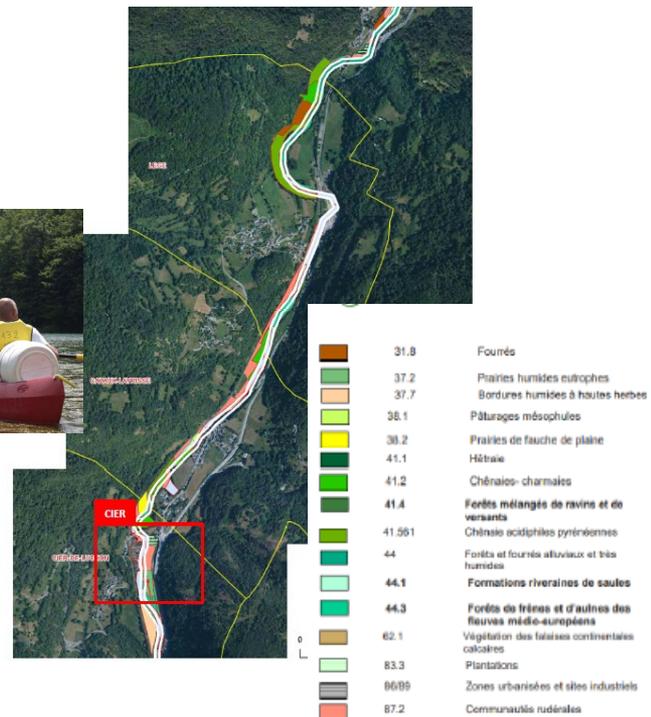
- Les chantiers liés à la réinjection peuvent causer des désordres environnementaux

- Gestion des accès
- Défrichements
- Présence d'espèces invasives
- ...



- Nécessité de s'intéresser aux possibilités de réalisation des chantiers en fonction :

- à la faune aquatique (cycle / pêche de sauvetage...)
- à la faune terrestre



- En complément pour définir la période :

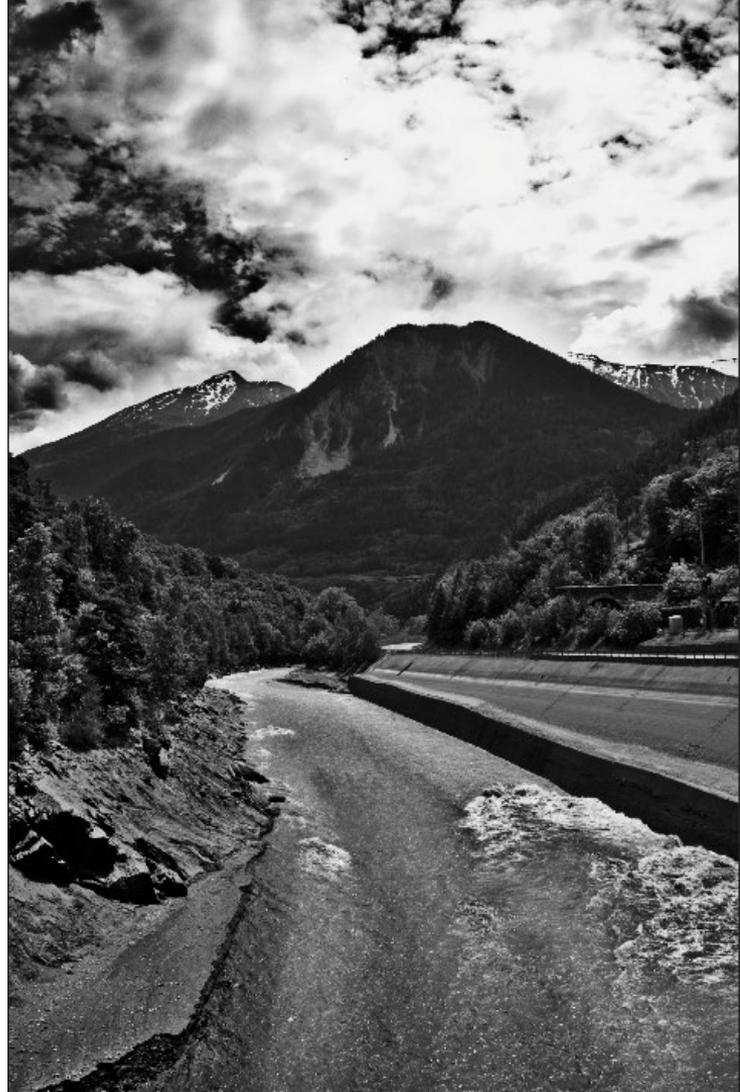
- Contraintes touristiques
- Régime hydrologique

AVIFAUNE REMARQUABLE	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Aigle royal												
Gypaète Barbu												
Milan royal												
Vautour fauve												
Vautour Percnoptère												

ESPÈCES PATRIMONIALES	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Salmonidés		Fraie		Dévalaison								Fraie
Chabot				Fraie								
Lamproie de planer				Fraie								



AVEC QUELLE RÉGLEMENTATION



QUEL DIMENSIONNEMENT ?

QUELLE RÉGLEMENTATION ASSOCIÉE AUX RÉINJECTIONS ?

- La réinjection est encadrée par les articles R214-1 à R214-5 en application des articles L. 214-1 à L. 214-3 du Code de l'Environnement (Installations, Ouvrages, Travaux et Activités ayant une incidence sur l'eau et les milieux aquatiques)
- Auparavant il était nécessaire de déclarer les rubriques suivantes :
 - 3.1.2.0 → Modification du profil en travers et du profil en long
 - 3.1.5.0 → Destruction de frayères
 - 3.2.1.0 → Entretien des cours d'eau par curage (si par ex prélèvements dans le remous solide d'une retenue)
- Désormais il est possible d'utiliser la rubrique 3.3.5.0
 - 3.3.5.0. Travaux, définis par un arrêté du ministre chargé de l'environnement, ayant uniquement pour objet la restauration des fonctionnalités naturelles des milieux aquatiques, y compris les ouvrages nécessaires à cet objectif (D).
 - Cette rubrique est exclusive de l'application des autres rubriques de la présente nomenclature.
 - Ne sont pas soumis à cette rubrique les travaux n'atteignant pas les seuils des autres rubriques de la présente nomenclature.
- Possibilité d'obtenir des autorisations sur 10 ans (avec un plan de gestion sédimentaire par exemple)
- Et tout un tas d'autres dossiers du type N2000, défrichement, acquisition foncière (DUP)...





EFFETS ATTENDUS SUR LA BIOLOGIE



QUELS EFFETS ATTENDUS SUR LA BIOLOGIE?

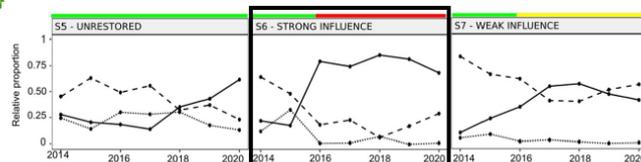
QUELQUES EXEMPLES

- Les effets dépendront principalement
 - De la nature des sédiments (granulométrie, provenance)
 - De la quantité de sédiments par rapport au Ts naturel
 - De l'échelle spatiale et temporelle
 - Du niveau d'intervention : « jardinage » vs restauration des processus naturel
 - De la fréquence de la réinjection
 - Des conditions d'écoulement et de la mobilité des substrats
 - ...
- Effets sur le périphyton / les algues
 - Gravier injectés sont plus mobiles et peuvent « nettoyer » les amas de périphyton et algues filamenteuse
 - Mais ils sont rapidement colonisés
 - Souvent besoin de combiner avec des lâchers morphogènes pour un résultat efficace



QUELS EFFETS ATTENDUS SUR LA BIOLOGIE?

QUELQUES EXEMPLES



Staentzel et al., 2022 : Rhin

■ Effets sur les invertébrés

- Recolonisation rapide
- Effets plus ou moins durables (mobilité des substrats, régime hydrologique)
- Besoin d'adapter l'échelle d'investigation (micro vs macro station), sur le long-terme

■ Effets sur les poissons

- Très bonne réactivité des frayères artificielles mais gros besoin d'entretien (réinjection périodiques)
- Résultats mitigés pour le domaine piscicole
 - Forte dépendance du contexte
 - Réponse très variable selon les sites suivis (stagnation, amélioration, arrivée d'espèces invasives – ex Gobies sur le Rhin...)
 - Protocoles et indicateurs pas nécessairement adaptés au suivi de la restauration

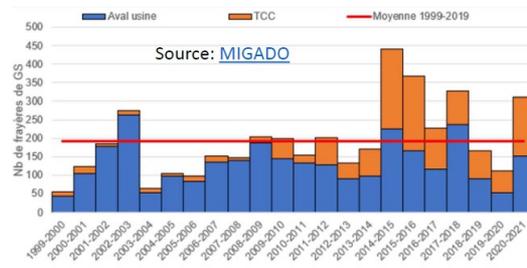
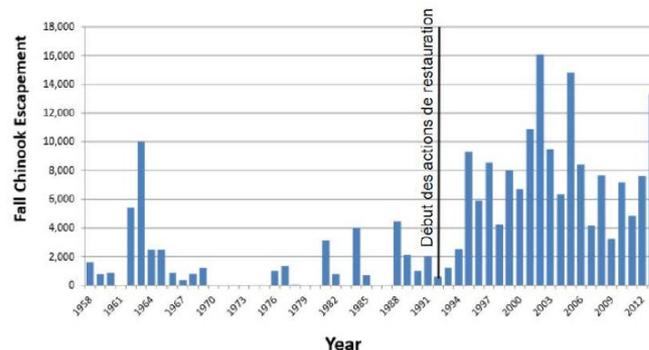


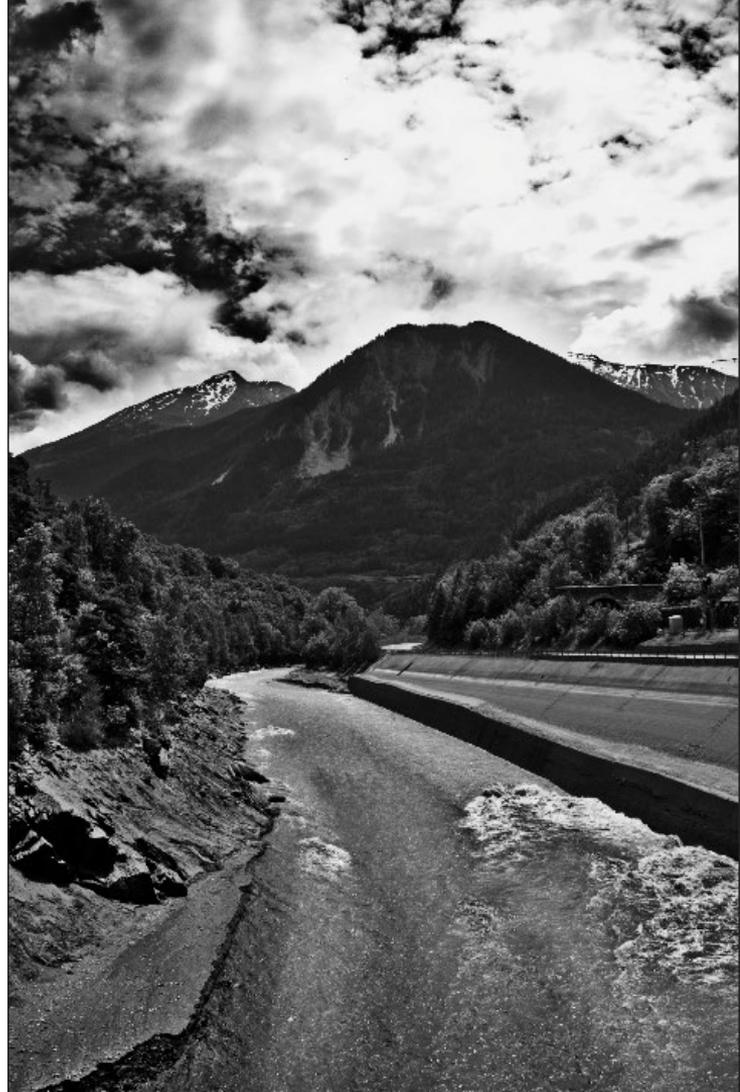
Figure 18 : Evolution du nombre de frayères recensées sur la Maronne entre 1999 et 2020.

Four-fold increase in Fall Chinook Escapement





QUELS SUIVIS



QUEL SUIVI ?

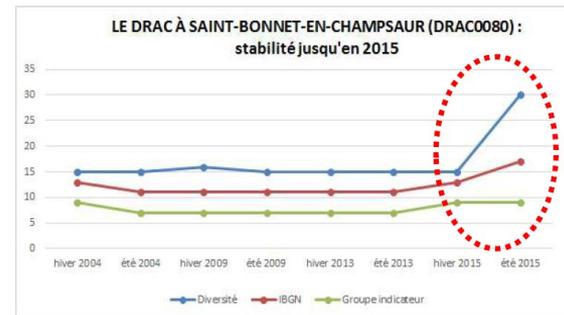
SUIVI BIOLOGIQUE



Ayga – I.D.Eaux, 2021

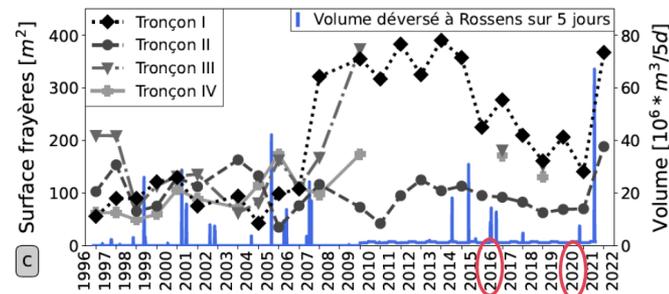


- Pour la restauration des habitats mais aussi pour les autres objectifs
- La biologie doit être suivie mais attention à sa prise en compte comme indicateur d'efficacité
- Réfléchir à la pertinence et à l'adaptation des différents indicateurs
- Macro-invertébrés : IBGN – I2M2 – Caractérisation par espèces cible / groupes fonctionnels
- Faune piscicole :
 - Surface de frayères actives,
 - Recensement des 0+
 - Pêches complètes (IPR, biomasse, densité...)
- Suivis faune / flore : présence / absence / comptage / évolution



Laval et al., 2020

Schroff et al. 2022

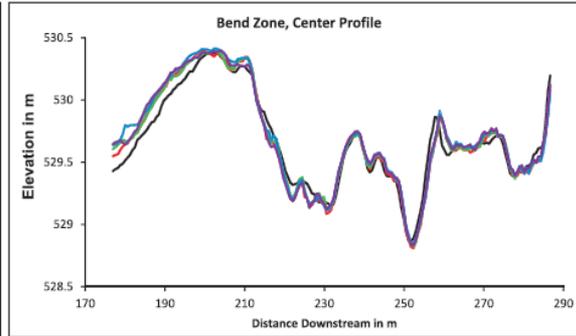
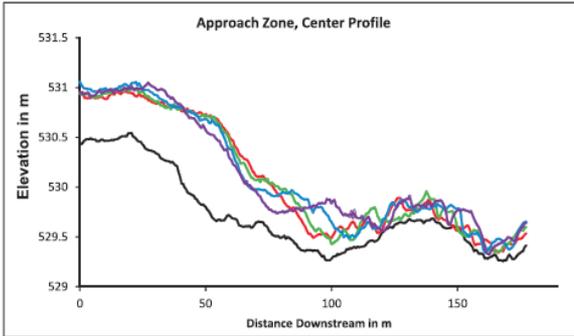


QUELS SUIVIS ?

QUELS OUTILS ?

- Réhabilitation du plancher alluvial

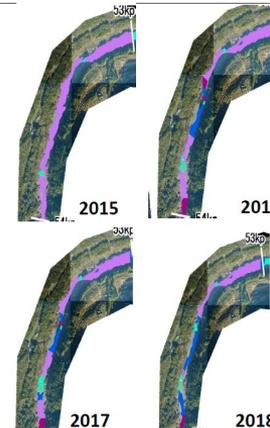
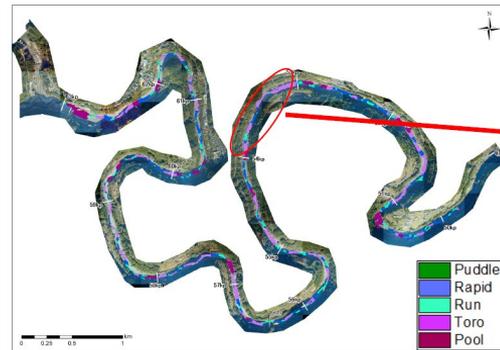
Gaeuman, 2017



Brousse, 2021

- Restauration des macroformes

• Geomorphic Units Survey Indices (GUSI)

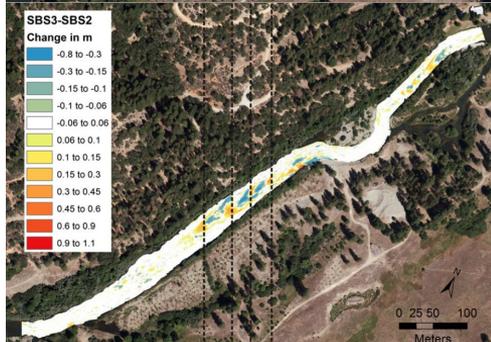
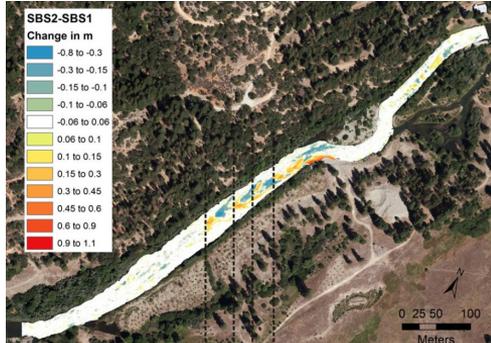
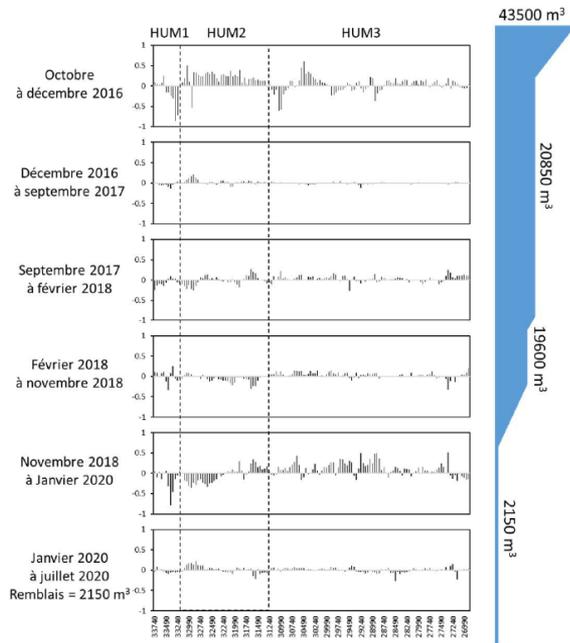
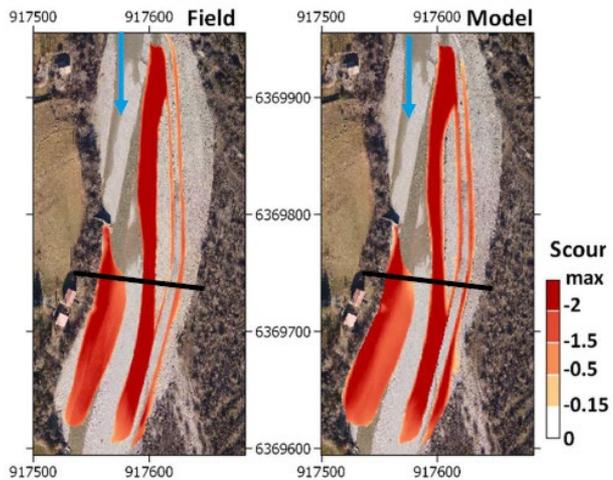


Lin, 2022

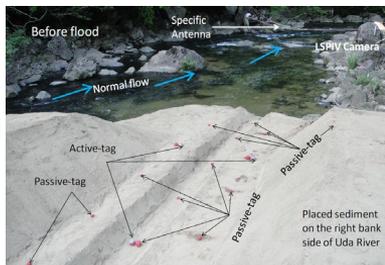
QUELS SUIVIS ?

QUELS OUTILS ?

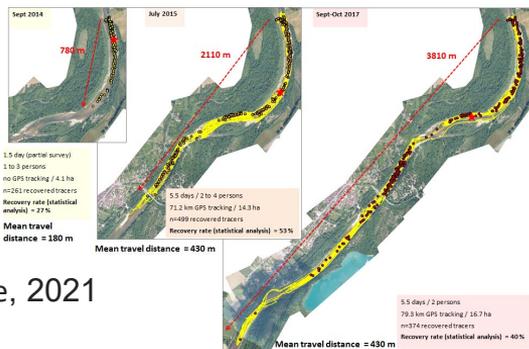
- Restaurer les macroformes Brousse, 2021



Kantoush, 2021



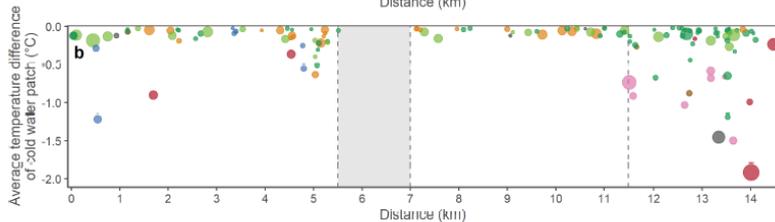
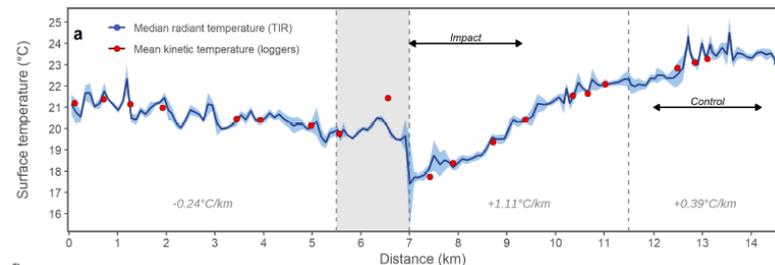
Brousse, 2021



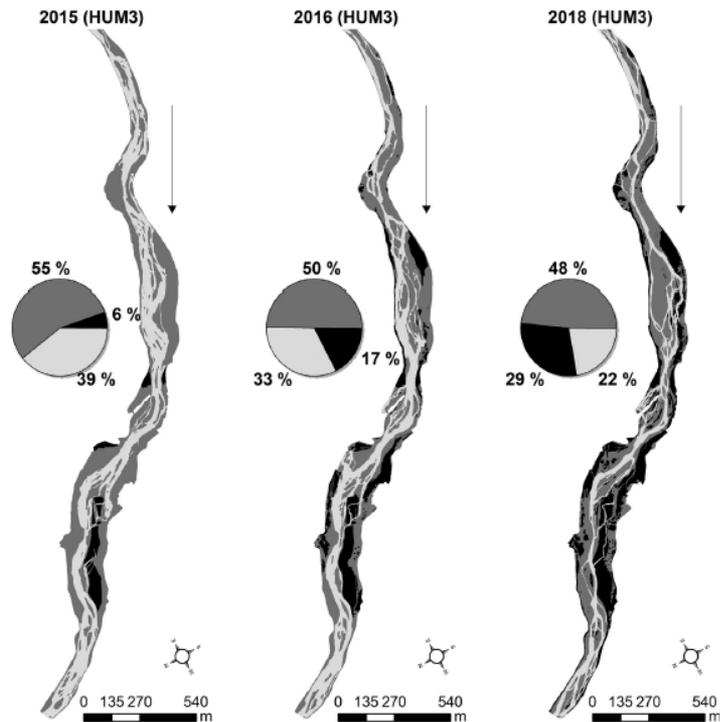
QUELS SUIVIS ?

QUELS OUTILS ?

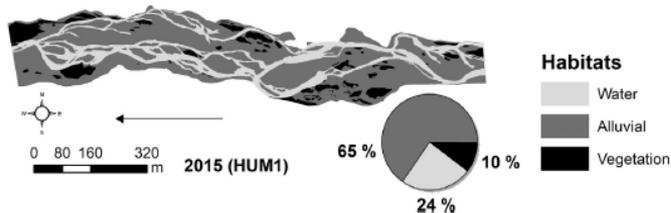
- Restaurer un style fluvial



Marteau et al., 2020



Brousse, 2021



CONCLUSION

ENCORE BEAUCOUP DE TRAVAIL...

- Des retours d'expériences de plus en plus nombreux qui nous permettent de progresser
- Encore beaucoup de lacunes dans les connaissances (processus, réaction des milieux...)
- Des projets en apparence simples mais pas toujours faciles à mettre en œuvre
- Avec des difficultés complémentaires essentielles non abordées dans ces aspects très techniques (une session dédiée devrait être nécessaire)
 - Fort portage des projets nécessaire (techniciens ET élus / décideurs)
 - Difficultés dans l'appropriation sociale de ces projets

MERCI

