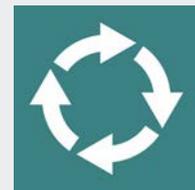


TRANSPORT SOLIDE ET RECHARGE SÉDIMENTAIRE



*Journée technique d'information et d'échanges
Mardi 8 novembre 2022 à Pinay (42)*



ACTES DE LA JOURNÉE



Organisée avec le soutien technique et financier de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne



ASSOCIATION
RIVIÈRE RHÔNE ALPES AUVERGNE

ASSOCIATION RIVIÈRE RHÔNE ALPES AUVERGNE
7 RUE ALPHONSE TERRAY > 38000 GRENOBLE
04 76 48 98 08 > ARRAA@ARRAA.ORG
WWW.ARRAA.ORG



Contexte

Le transit sédimentaire est un élément majeur nécessaire au bon fonctionnement des hydrosystèmes.

Dans les pays occidentaux, où les rivières ont été largement aménagées, la majorité des cours d'eau présente un important déficit en transport solide. Les conséquences sont nombreuses, que ce soit sur la perte d'habitats, la diminution de la biodiversité, l'incision et des risques accrus pour les ouvrages (affaissement de ponts...).

La journée sera l'occasion de faire un **état des connaissances** actuelles sur le transit sédimentaire, ses principales **altérations** et la **mesure** du transport solide.

Différentes approches peuvent être entreprises pour améliorer le transit sédimentaire d'un cours d'eau et **nous focaliserons la nôtre sur la recharge sédimentaire, principalement sur les moyennes et petites rivières.**

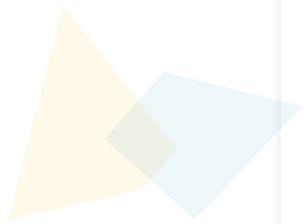
En effet, les gestionnaires sont souvent démunis pour déterminer si cette méthode est adaptée aux enjeux qu'ils rencontrent et, si tel est le cas, sur la façon dont on peut s'y prendre pour trouver le bon équilibre entre combler l'incision du lit, favoriser le développement de nouveaux milieux et éviter les ruptures d'écoulement.

Objectifs

- **Mieux connaître le phénomène, le caractériser** et bénéficier d'une remise à niveau de ses connaissances sur ce sujet complexe.
- **Questionner la pertinence de la recharge sédimentaire comme solution.** La bonne solution étant parfois la non action.
- Donner à voir des **retours d'expériences éprouvés pour mieux cerner comment s'y prendre** et calibrer la restauration en fonction des objectifs et des moyens.
- Accéder à des expériences **reproductibles**.
- **Appréhender les contraintes** techniques, administratives et socio-économiques de la recharge sédimentaire.

Public

Chargés de missions des procédures de gestion de milieux aquatiques, techniciens de rivières, techniciens et ingénieurs des collectivités territoriales et des services déconcentrés de l'État, bureaux d'études, associations, chercheurs, élus.



PROGRAMME

9H30 ÉTAT DE L'ART DES CONNAISSANCES SUR LE TRANSIT SÉDIMENTAIRE

Qu'est-ce que le transit sédimentaire, comment s'opère-t-il, quel est son fonctionnement ? Les causes et conséquences de son interruption. Comment le rétablir et dans quels objectifs. Ces questions seront abordées au travers de la présentation du futur Guide SDAGE RMC d'élaboration et de mise en oeuvre de Plan de gestion sédimentaire qui paraîtra en 2023.

> Jean-René MALAVOI - AERMC

11H00 MÉTHODE DE CARACTÉRISATION, MESURE ET MODÉLISATION DU TRANSPORT SOLIDE

Présentation des méthodes de mesure de la charge de fond adaptées en fonction du cours d'eau, des objectifs du projet et du budget à disposition.

> Benoit CAMENEN - INRAE

ZOOM SUR LA RECHARGE SÉDIMENTAIRE PRINCIPALEMENT SUR LES MOYENNES ET PETITES RIVIÈRES

13H30 APPRÉHENDER LA RECHARGE SÉDIMENTAIRE AU TRAVERS DE DIVERS EXEMPLES

Comment faire la recharge sédimentaire ? dans quel cas ? quelle mise en œuvre ? quels suivis et quels types de résultats ? Ces questions se posent de plus en plus sur les bassins versants français et les interrogations concernant la réalisation des projets sont encore nombreuses.

Ces questions seront abordées au travers de divers exemples allant d'une réinjection chirurgicale consistant à recréer des zones de frayères pour les saumons jusqu'à des réinjections de masse visant à maintenir le transport solide dans une rivière.

> Rémi LOIRE - EDF - Centre d'Ingénierie Hydraulique

14H45 DEUX APPROCHES POUR FAIRE DE LA RECHARGE : CAS DE L'ARTIÈRE À CLERMONT-FERRAND (63) ET DU FURAN À SAINT-ÉTIENNE (42)

Ces études de cas seront l'occasion de voir deux façons complémentaires d'aborder la recharge, en se basant sur des études et modélisations préalables ou en se basant sur de l'observation et des retours d'expériences.

L'étude de la Tiretaine (63) sera évoquée pour montrer que la recharge, c'est pas automatique !

> Stéphane PETIT - Véodis 3D

> Stéphane MANEVAL - Clermont Auvergne Métropole

15H45 RESTAURATION HYDROMORPHOLOGIQUE DE L'HERBASSE (26)

Porté par le SIABH, le projet de restauration initié à Valherbasse (Montrigaud) avait pour première ambition le rétablissement de la continuité écologique à l'endroit de deux seuils. Le programme d'aménagement s'est concentré sur un travail de réhausse des fonds/reconstitution d'un matelas alluvial via la réinjection de matériaux puis la réactivation d'anciens méandres. La négociation foncière et l'étroite concertation entre les agriculteurs/propriétaires riverains et les représentants de la maîtrise d'ouvrage ont été des facteurs clés de l'acceptation du projet.

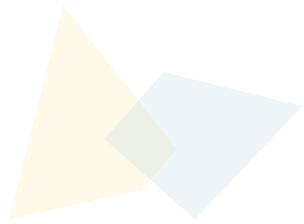
> Adrien GUIONNET - Syndicat Intercommunal d'Aménagement du Bassin de l'Herbasse (SIABH)

> Adrien HAMM - BIOTEC



LE TRANSPORT SOLIDE EN RIVIÈRE :
CONCEPTS DE BASE
ET ÉLABORATION DE PLANS DE
GESTION SÉDIMENTAIRE

JEAN-RENÉ MALAVOI
AGENCE DE L'EAU RMC



De très nombreux cours d'eau ont subi ou subissent encore des pressions anthropiques à l'origine de graves dysfonctionnements hydromorphologiques qui induisent des altérations importantes de leur fonctionnement et de leur état écologique. L'enjeu de restauration de cet état écologique et des compartiments qui le soutiennent est donc primordial pour espérer atteindre le bon état général des cours d'eau demandé par la DCE. Ce sera l'objectif majeur d'un Plan de Gestion Sédimentaire (PGS) élaboré au titre du SDAGE RMC.

De nombreux autres enjeux sont souvent présents dans ou le long des cours d'eau et sont potentiellement concernés par les processus hydrosédimentaires qui sont à l'origine de contraintes, voire de risques importants.

PRINCIPAUX ENJEUX SOCIO-ECONOMIQUES POUVANT NÉCESSITER UNE GESTION SÉDIMENTAIRE

On peut lister au moins 4 grands types d'enjeux potentiellement concernés par les processus hydrosédimentaires :

- **La protection des biens (foncier et infrastructures) et des personnes (sûreté/sécurité)** en lien avec : les dépôts sédimentaires qui réduisent les sections d'écoulement et peuvent aggraver les inondations en zones urbanisées par exemple, ou menacent l'alimentation en eau des centrales nucléaires ; les incisions du lit qui mettent en péril les infrastructures longitudinales (digues, protections de berges, routes, réseaux divers) ou transversales (ponts) ; des érosions latérales qui peuvent menacer certains enjeux forts : infrastructures de transport (routes, voies ferrées, canaux, réseaux divers), zones urbanisées, zones de loisirs, équipements divers. Ces érosions latérales peuvent aussi engendrer directement des pertes foncières ainsi qu'une perte de l'outil de production (zones agricoles notamment).
- **La navigation fluviale ou en canal** : qui peut être perturbée par les dépôts sédimentaires réduisant la profondeur du chenal navigable ou des ports et haltes fluviales
- **Les retenues d'eau à usage hydroélectrique, AEP, loisirs** : dont le volume utile peut être fortement réduit par la sédimentation et dont l'exploitation peut être rendue difficile par ces mêmes processus (comblement des prises d'eau notamment)
- **Les captages en nappe**, qui perdent en productivité du fait de l'incision du lit généralement accompagné d'un affaissement du niveau de la nappe d'accompagnement. Certains puits peuvent même ne plus être alimentés (exemple des captages de la ville de Vichy au bord de l'Allier).

PRESSIONS ANTHROPIQUES ENGENDRANT DES DYSFONCTIONNEMENTS HYDROSEDIMENTAIRES

Plusieurs décennies d'études sur le sujet permettent de dresser une liste quasi exhaustive des pressions¹ anthropiques engendrant des dysfonctionnements hydrosédimentaires plus ou moins graves. Elles sont présentées ci-après par grand type d'impact et par ordre décroissant théorique de l'intensité de ces impacts sur les processus hydrosédimentaires et les formes en résultant.

¹ pression : toute intervention d'origine anthropique se traduisant par une modification des formes et des processus hydrosédimentaires naturels.

Impacts potentiels sur les déficits en sédiments grossiers :

- **extractions en lit mineur** : arrêtées à peu près partout en France depuis 1994 (arrêté ministériel), mais forte rémanence sur de nombreux cours d'eau, avec d'anciennes grandes fosses d'extractions encore présentes sur certains et continuant à piéger la charge alluviale provenant de l'amont,
- **barrages** : leurs impacts sont très variables et dépendent beaucoup du volume de l'ouvrage, de sa gestion (aucune gestion sédimentaire, chasses ou transparences, curage/réinjection), de la nature et de l'intensité du transport solide en amont et en aval, de la modification concomitante des débits morphogènes en aval,
- **travaux de correction torrentielle** : stabilisation/végétalisation des versants (NB : joue aussi sur les sédiments fins), ouvrages de stabilisation, plages de dépôt,
- **seuils** : leurs impacts ne sont pas systématiques et dépendent beaucoup de la nature et de l'intensité du transport solide en amont et en aval de l'ouvrage, de son ancienneté, de son influence sur la ligne d'eau de crue morphogène, de la taille du réservoir, de la densité d'ouvrages sur le linéaire.
- **ouvrages de navigation** : épis, dhuits, chevrettes : ouvrages implantés historiquement sur les cours d'eau navigables (Loire, Rhône) pour favoriser la concentration de l'écoulement le long d'un thalweg et permettre son autocurage et la garantie d'une profondeur suffisante pour la navigation.
- **curages** : leurs impacts seront d'autant plus marqués qu'ils seront étendus, intenses, récurrents
- **protections de berges** : la gravité de leurs impacts sera fonction de la longueur touchée, de la mobilité en plan du cours d'eau (plus elle est intense plus l'impact est fort), de la nature des alluvions des terrasses constituant les berges (plus elles sont constituées de matériaux graveleux plus l'impact est fort),
- **tous travaux de chenalisation** : rectification du tracé, endiguement étroit, recalibrage, bétonnage du fond et des berges, etc.
- **extractions en lit majeur** : elles n'ont a priori pas d'impact direct, mais peuvent en avoir si elles capturent le cours d'eau qui les borde ou limitent le lit actif dans un corridor étroit . D'autre part, elles ont un impact indirect assez fort sur l'un des moyens de restauration d'un certain transport sédimentaire en empêchant (ou limitant) la possibilité de donner un espace de mobilité au cours d'eau.



Protection de berge



©Onema SD 06



Extraction de granulats



Impacts potentiels sur les excès de sédiments fins (sables compris) :

- **certaines pratiques agricoles** (types de labours, saisonnalité des semis, etc.)
- **déforestation, création de routes et de chemins forestiers** (beaucoup d'apports massifs sableux constatés de ce fait sur plusieurs cours d'eau du Massif Central)
- **drainage agricole,**
- **urbanisation** (pendant la période de construction puis à cause de l'augmentation du ruissellement),
- **gestion des barrages** (chasses et vidanges mal contrôlées, raréfaction des débits morphogènes de « nettoyage »)

Impacts potentiels sur les excédents (ou les dépôts excessifs) de sédiments grossiers :

- **réduction en intensité/durée/fréquence des débits morphogènes** du fait de la présence de grands barrages écrêteurs. Cet effet peut empêcher la reprise de matériaux apportés par des affluents (torrents notamment) et favoriser des exhaussements et une aggravation des inondations au droit des confluences.
- **remous solides** en amont des retenues de seuils et de barrages

Impacts potentiels sur la végétalisation excessive de la bande active du lit mineur :

- **réduction en intensité/durée/fréquence des débits morphogènes** du fait de la présence de grands barrages écrêteurs. Cet effet peut favoriser une végétalisation excessive des bandes actives ;
- **modification de la saisonnalité des débits** qui peut aussi favoriser une végétalisation excessive des bandes actives.

PRINCIPAUX DYSFONCTIONNEMENTS HYDROMORPHOLOGIQUES ET ECOLOGIQUES EN LIEN AVEC LES SEDIMENTS

Dysfonctionnements hydromorphologiques

Les dysfonctionnements hydromorphologiques résultant de ces pressions sont eux aussi aujourd'hui bien identifiés :

- **liés au déficit en sédiments grossiers** : incision du lit, pavage, déficit de certaines fractions granulométriques, affleurement important du substratum, affaissement de la nappe alluviale d'accompagnement, végétalisation excessive de la bande active du fait de l'incision du lit,
- **liés aux excès de sédiments grossiers** : exhaussement du lit, inondation
- **liés aux excès de sédiments fins** : colmatage, ensablement.

Dysfonctionnements morphoécologiques

Les dysfonctionnements morphoécologiques (voir définition au 2.1.4.2.2) qui découlent des précédents sont eux aussi connus :

- **modification/perte d'habitats aquatiques du (des) lit(s) mouillé(s)** : disparition des frayères pour les espèces de poissons lithophiles, simplification des faciès d'écoulement, colmatage/ensablement des habitats alluviaux grossiers,
- **modification/perte d'habitats de la bande active et semi-active** : réduction de la quantité et de la fonctionnalité des bancs alluviaux mobiles, des chenaux secondaires
- **assèchements d'annexes hydrauliques et de zones humides du lit majeur**
-

Dysfonctionnements écologiques

Les dysfonctionnements écologiques associés sont les suivants. Ils sont principalement dus à une altération profonde des habitats alluviaux :

- **dégradation de l'état des biocénoses aquatiques du (des) lit(s) mouillé(s)** : (composition, abondance, biomasse, structure des peuplements faunistiques et floristiques)
- **dégradation de l'état des biocénoses de la bande active et semi-active** (composition, abondance, biomasse, structure des peuplements faunistiques et floristiques)
- **dégradation de l'état des biocénoses du lit majeur associées au cours d'eau** (celles des annexes hydrauliques et des zones humides notamment), ainsi que de la ripisylve et de la forêt alluviale)

On peut y ajouter le **dysfonctionnement de certains processus physico-chimiques** :

- moindre régulation thermique et baisse des capacités auto-épuration du lit mineur alluvial

Autres dysfonctionnements possibles

D'autres dysfonctionnements en lien avec l'altération de la morphologie des cours d'eau et des processus sédimentaires sont enfin identifiables, en lien avec les enjeux listés précédemment :

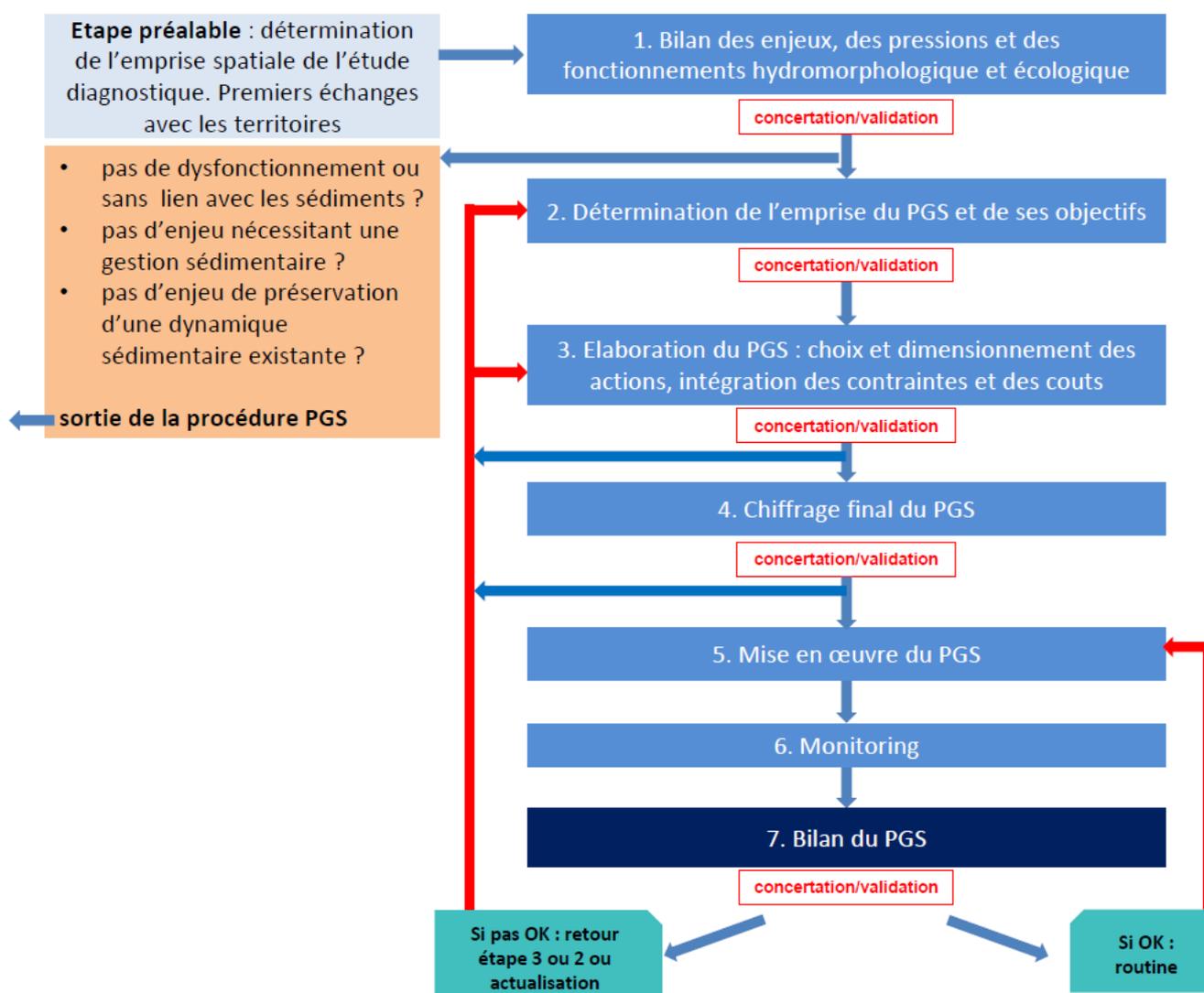
- problèmes d'alimentation en eau potable ou pour l'irrigation du fait de l'incision du lit et de l'affaissement de la nappe
- problèmes d'alimentation des captages gravitaires du fait de l'incision du lit
- déchaussement d'ouvrages d'art du fait de l'incision du lit
- aggravation des inondations

ELABORATION D'UN PLAN DE GESTION SÉDIMENTAIRE

L'élaboration d'un Plans de Gestion Sédimentaire (PGS) permet de proposer des solutions face à ces pressions et ces dysfonctionnements en lien avec les enjeux recensés. Ils visent à atteindre le bon état des eaux tout en réduisant autant que possible les contraintes et les risques sur les autres enjeux.

Cette démarche nécessite plusieurs étapes techniques et au terme de certaines d'entre elles, des **phases de concertation et de validation indispensables** avant de passer aux étapes suivantes.

Un guide technique SDAGE RMC est en cours de finalisation (2023) pour aider les différents acteurs de la gestion des rivières à élaborer et mettre en œuvre ces PGS.



POUR EN SAVOIR PLUS

Jean-René MALAVOI Jean-Rene.MALAVOI@eaurmc.fr

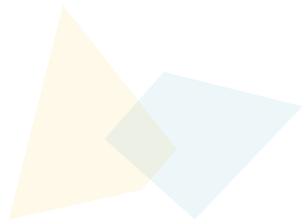
À venir en 2023 : Guide SDAGE RMC d'élaboration et de mise en oeuvre de Plan de gestion sédimentaire

crédit photo : AERMC



MÉTHODE DE CARACTÉRISATION, MESURE ET MODÉLISATION DU TRANSPORT SOLIDE

BENOIT CAMENEN
INRAE





L'objet de cette présentation était d'abord de caractériser, de mesurer et de modéliser le transport solide via le guide technique pour la mesure et la modélisation du transport solide par Camenen et Melun, publié en mars 2021 aux éditions OFB.

Ce guide fait suite aux débats issus de l'article L214-17 du code de l'environnement où une liste de cours d'eau a été établie sur lesquels un « transport suffisant » devait être assuré.

En effet, les questions de la mesure du transport solide et des références pour définir un transport suffisant ont alors été mises en avant. Le guide a ainsi été proposé en complément de guides existants **pour donner des approches quantitatives de la mesure des flux solides ainsi que des éléments de méthodologie et modélisation.**

Le guide propose un grand nombre d'équations et de références afin d'aborder les bases de la théorie et des travaux permettant de mesurer et modéliser la dynamique sédimentaire.

Une description linéaire du guide est donnée dans la présentation.

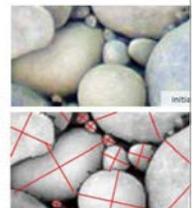
Dans un premier temps, le guide introduit quelques généralités sur le transport solide et la morphologie des rivières ainsi que les intérêts d'étudier le transport solide.

Il décrit ensuite **les caractéristiques morphologiques d'une rivière avec les approches géomorphologiques** (formes des rivières et classifications) tout en introduisant les impacts anthropologiques, ainsi que **la mesure (topographie, bathymétrie et caractérisation des matériaux).**

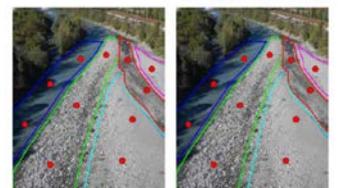
- Mesures de la topographie et bathymétrie
 - Avant : Terrain (tachéo, DGPS), photogrammétrie
 - Maintenant : Lidar (terrestre et aéroporté), sonar



- Caractéristiques des matériaux
 - Granulométrie des grossiers



Mesures ponctuelles
Stratégie de mesure
Analyse spatiale (photos aériennes)



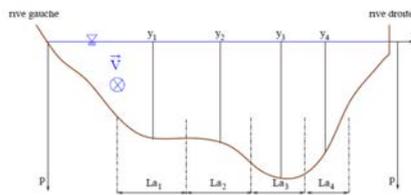
Les bases hydrauliques sont rappelées pour calculer les contraintes sur le fond des rivières, évaluer le début de mise en mouvement des particules avec, entre autres, l'introduction du bien connu paramètre de Shields.

Différentes techniques de mesures sont introduites avec une méthodologie associée pour les mettre en pratique :

- la modélisation et la mesure du transport solide sur la charge de fond (ou charriage)

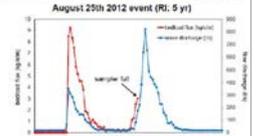
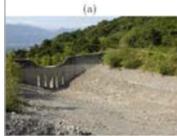
• Mesure des flux charriés

Échantillonnage versus acoustique



• Mesure des flux charriés

Pièges à sédiments → mesure plus ou moins intégrée dans le temps

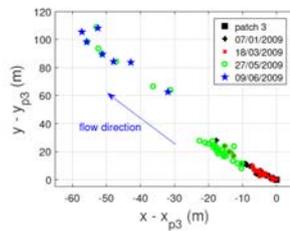
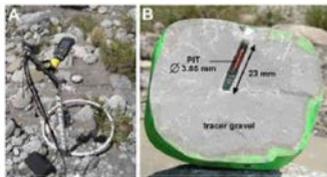


INRAO

• Mesure de la dynamique particulaire

Transpondeur passif et actif

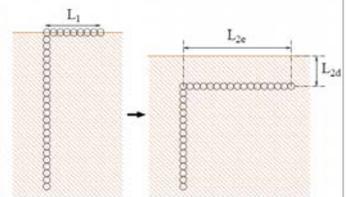
- utile pour suivre le parcours des particules (Lagrangien)
- limite liée au taux de recouvrement



• Mesure de la respiration d'un cours d'eau

Chaines d'érosion

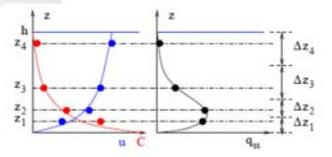
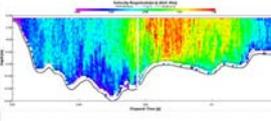
Très utile pour appréhender la dynamique sédimentaire suite à une crue (phase érosion puis phase de dépôt)



- la modélisation et la mesure de la suspension.

• Mesure de la suspension graduée

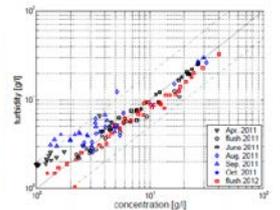
Exploration d'une section de mesure
Développements en acoustique



• Mesure de la suspension de lessivage

Hypothèse d'une homogénéité des concentrations et de la granulométrie sur la section
Attention à la sensibilité de la turbidité à la granulométrie → courbe de tarage

$$Q_{sl}(t) = Q(t)C(t)$$

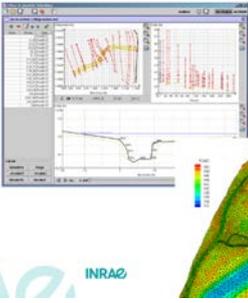


Il est ensuite détaillé la façon d'analyser les données de transport solide et de modéliser la dynamique sédimentaire. En particulier, **comment établir des bilans sédimentaires** sur la base d'une simplification d'un linéaire d'étude en tronçons homogènes et la réalisation de courbes de tarage sédimentaires (soit une relation entre le débit solide et le débit liquide).

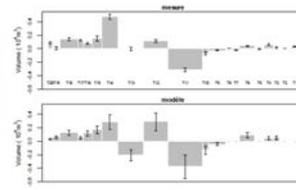
Une brève introduction des modélisations numériques et physiques est aussi proposée afin d'avoir une vision globale des possibilités d'étude.

• Modèles numériques

Bilan de masse $(1-p) \frac{\partial S_s}{\partial t} + \frac{\partial Q_s}{\partial x} = 0$



1D, 2D, 3D selon les besoins
Modèles de plus en plus demandeurs en données et calage de plus en plus complexe
→ outils prédictifs (?)



INRAE

• Modèles physiques

Basé sur la similitude de Froude (ou Reynolds)
Complexe à mettre en œuvre (surtout en sédimentaire) mais permet de reproduire des processus complexes

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}}$$


INRAE

Une synthèse opérationnelle donne des indications sur les mesures, méthodes et modélisations adaptées à différents objectifs d'étude est proposée (cf. illustrations ci-après).

Il ressort de cette présentation que **les imprécisions sur le calcul des flux de transport solide sont encore grandes et les mesures en temps réels compliquées à mettre en œuvre.**

Illustration de la synthèse opérationnelle du guide (chapitre 7)

Quelles mesures réaliser en fonction des objectifs de l'étude

Méthode	Sédiments	Éch.	Vision spatiale	Vision temporelle	Mesure
Préleveur Helley-Smith	sable, galet	oui	locale	instantanée	flux
Préleveur Helley-Smith portable	sable	oui	locale	instantanée	flux
Préleveur Ehrenberger	sable, galet	oui	locale	instantanée	flux
Préleveur BTMA	sable	oui	local	locale	flux
Piège à sédiments	sable, galet	oui	section, global	moyenne/mois	flux
Trappe à sédiments	sable, galet	oui	locale	instantanée + crue	flux
Suivi de dune	sable	non	ligne courant	moyenne/heure	flux
Géophone	galets	non	local	instant. + chronique	flux
Hydrophone	galets	non	10 m	instant. + chronique	flux
Suivi de fond ADCP	sable, galet	non	section	instantanée	flux

Quelle méthode utiliser en fonction des objectifs de l'étude ?

	Approche géomorphologique	Approche terrain	Approche ingénieur	Modélisation numérique 1D	Modélisation numérique 2D/3D	Modélisation physique
Évaluation globale du transport solide échelle bassin	***	*	*			
Évaluation globale du transport solide échelle tronçon	**	*	**	*		
Estimation de l'équilibre d'un tronçon	**	*	***	**		
Impact d'un ouvrage transversal (barrage, seuil)	**	**	**	**		
Impact d'un effacement d'ouvrage transversal	**	**	**	**		
Impact d'un ouvrage localisé (piles de pont)	*	**	*		**	**
Dimensionnement de curages localisés	**	*	**	*	*	
Plan de gestion hydro-sédimentaire	***		***	*		
Recalibrage de géométrie	**	*	***	**	*	*
Restauration hydro-sédimentaire (injection, élargissement, etc.)	**	***	**	**	**	
Expertise d'un événement extrême	***	*	***	*		

*: intéressant, **: utile, ***: indispensable

Quelles modélisations réaliser en fonction des objectifs de l'étude ?

Paramètres	Modèle 1 ω simp	Modèle 2 MS	Modèle 3 modèle 1D
Besoin en données géométriques ¹	+	+/-	-
Besoin en données sédimentaires ¹	-	---	---
Besoin en données hydrauliques ¹	++	+	-
Construction et calibration du modèle ¹	+	+/-	-
Estimation du transport solide ²	+/-	+	+
Estimation du bilan sédimentaire ²	-	-	+
Efficacité du calcul ²	++	+	+/-
Capacité de prédiction ²	-	-	+/-

1 : --- très difficile, - difficile, +/- moyen, + simple, ++ très simple

POUR EN SAVOIR PLUS

Benoit CAMENEN benoit.camenen@inrae.fr

Guide technique pour la mesure et la modélisation du transport solide CAMENEN B., MELUN G., OFB INRAE 2021 : http://oai.afbiodiversite.fr/cindocoai/download/PUBLI/1298/1/33092_OFB_Guide_transport_solide_BD.pdf_23872Ko

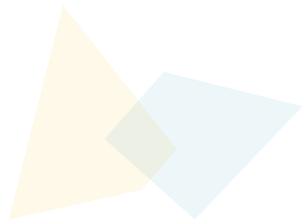
crédit photo : INRAE



APPRÉHENDER LA RECHARGE SÉDIMENTAIRE AU TRAVERS DE DIVERS EXEMPLES

RÉMI LOIRE

EDF - CENTRE D'INGÉNIERIE HYDRAULIQUE

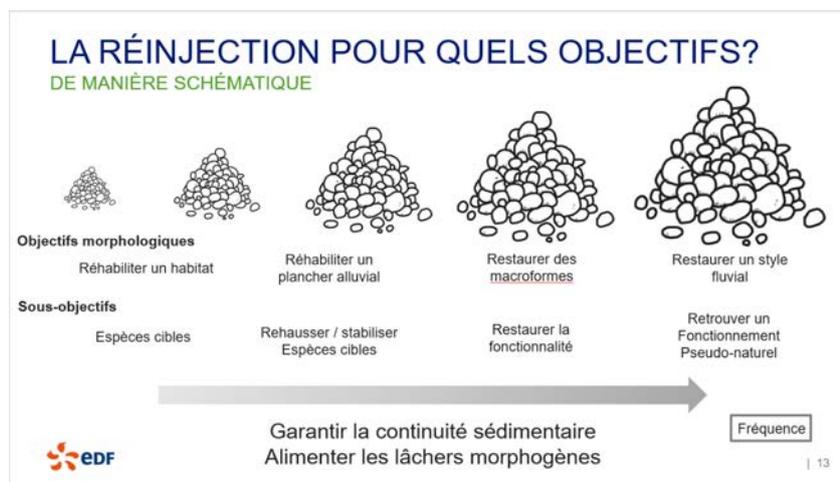


Le fonctionnement actuel des rivières s'opère quasi généralement dans un contexte de déficit sédimentaire. Ce déficit peut être plus ou moins marqué et dépend de facteurs souvent multifactoriels d'origines naturelles (variation des températures, revégétalisation...) et/ou anthropiques (endiguements, rectifications, barrages, extractions...). Le déficit peut par exemple avoir des conséquences morphologiques (contraction des bandes actives, processus d'incision, déconnexion des milieux rivulaires...), anthropiques (déstabilisation d'ouvrages d'art, baisse des rendements dans les captages...) ou biologiques (pertes en habitats, dysfonctionnements processus écologiques notamment dans la zone hyporhéique).

Pour faire face à ce déficit, les gestionnaires envisagent de plus en plus à recourir à des réinjections de sédiments en rivière. Quelques cas opérationnels ont vu le jour ces dernières années en France cependant, le **retour d'expérience est encore assez faible** et n'a pas fait l'objet d'une compilation. Plusieurs partenaires (Agence de l'Eau, OFB, CNRS et EDF) se sont rassemblés afin de construire un guide consacré à la réinjection sédimentaire. Ce dernier sera publié en 2024. La présentation effectuée lors de cette journée technique en constitue une première synthèse.

Les premiers éléments qui ressortent montrent qu'il **est nécessaire de définir des objectifs associés à une opération de réinjection.**

Ces objectifs vont de la création de frayères à la restauration d'un style fluvial en passant par la réhabilitation d'un substrat alluvial ou par la restauration des macroformes sédimentaires.



RÉHABILITER UN PLANCHER ALLUVIAL PLUSIEURS TYPES D'OBJECTIFS



SyBTB 2021- Bonnieure (16)

RÉHABILITER LE STYLE FLUVIAL L'AMBITION MAXIMALE



Brousse et al., 2021

Dès ce stade, la question de la durabilité de l'opération dans le temps et en fonction des volumes disponibles doit également être posée.

Le dimensionnement peut être fait selon plusieurs approches. La démarche peut être empirique ou s'appuyer sur un diagnostic géomorphologique et être complétée par une modélisation hydrosédimentaire.

Comme pour la granulométrie, les volumes à mettre en œuvre ne peuvent en effet pas être prédéfinis, car ils dépendent directement des objectifs et du type de rivière à restaurer.

On recherchera à réinjecter le plus proche possible de la zone d'emprunt des matériaux, mais cela est dépendant des zones d'accès, de la disponibilité foncière et du contexte environnemental. Réinjecter sur un site éloigné pose de nombreux problèmes (distance et coût du transport, prise en charge de la dégradation des routes, gêne occasionnée aux riverains, empreinte carbone...).

Au final, la gestion de la réinjection doit être adaptative et faire l'objet de nombreux compromis.

Il existe de nombreuses méthodes pour procéder à une réinjection : patch ou nappes (reconstitution de frayères), injection en remblai / cordon dans le lit mineur de la rivière, injection en remblai / cordon à niveau de crue, injection en cône / talus ou encore injection directe dans la rivière.

La méthodologie à mettre en œuvre est dépendante des sites et des objectifs visés. Chaque méthode possède en effet des avantages et des inconvénients. Il est assez régulièrement observé des méthodes hybrides notamment entre les injections dans le lit mineur de la rivière et les injections à niveau de crue.

La fréquence de réinjection varie selon le type d'objectif. Pour les frayères, il s'agira de restaurer les habitats lorsqu'ils ne seront plus fonctionnels. Pour les autres types de réinjection, on cherchera un état d'équilibre (détection des premiers signes de dysfonctionnement) acceptable basé sur un suivi et la définition d'un budget sédimentaire ou l'on cherchera à reconstituer un stock lorsque le volume initial sera épuisé.

La réinjection génère des travaux en rivière et sur ses abords. Il est donc nécessaire de réaliser des dossiers réglementaires qui prennent en compte différents éléments comme la période de réalisation des travaux, leur incidence sur les milieux aquatiques et terrestres ainsi que les usages.

POUR EN SAVOIR PLUS



DEUX APPROCHES POUR FAIRE DE LA RECHARGE : CAS DE L'ARTIÈRE À CLERMONT- FERRAND (63) ET DU FURAN À SAINT-ÉTIENNE (42)

STÉPHANE PETIT - VÉODIS 3D

STÉPHANE MANEVAL - CLERMONT AUVERGNE MÉTROPOLÉ



Deux petits cours d'eau en contexte urbain, l'Artière (Clermont-Ferrand) et le Furan (Saint-Étienne), ont fait l'objet de projets de recharge sédimentaire. La présentation propose de découvrir les deux approches différentes qui ont été mises en oeuvre pour calibrer la réinjection sédimentaire.

CAS DE L'ARTIÈRE

De 30,4 km de long, l'Artière longe par l'est l'agglomération de Clermont-Ferrand et se jette dans l'Allier aux Martres-d'Artière. Elle est couverte dans la plus grande partie de l'agglomération de Clermont-Ferrand. Dans la plaine de Limagne, elle est recalibrée en trapèze, incisée et en déficit sédimentaire.

Plusieurs ouvrages jalonnent son cours, dont le bassin d'orage de Crouël qui a été réalisé il y a une trentaine d'années, creusé dans le lit mineur (12 ha, jusqu'à 240 000 m³). Un piège à caillou a été réalisé à l'entrée du bassin, de façon à protéger l'organe de vidange. Chaque année, le piège doit être curé (environ 100 m³) et les produits du curage étaient envoyés en décharge jusqu'en 2006. À l'aval, on constate une forte incision du lit accentuée par des recalibrages en trapèze. Sur certains secteurs, on arrive à l'affleurement du substratum marneux avec sillon central.

Un site favorable à des réinjections appartenant à l'État et à APRR a été trouvé à 1 km en aval du bassin d'orage.

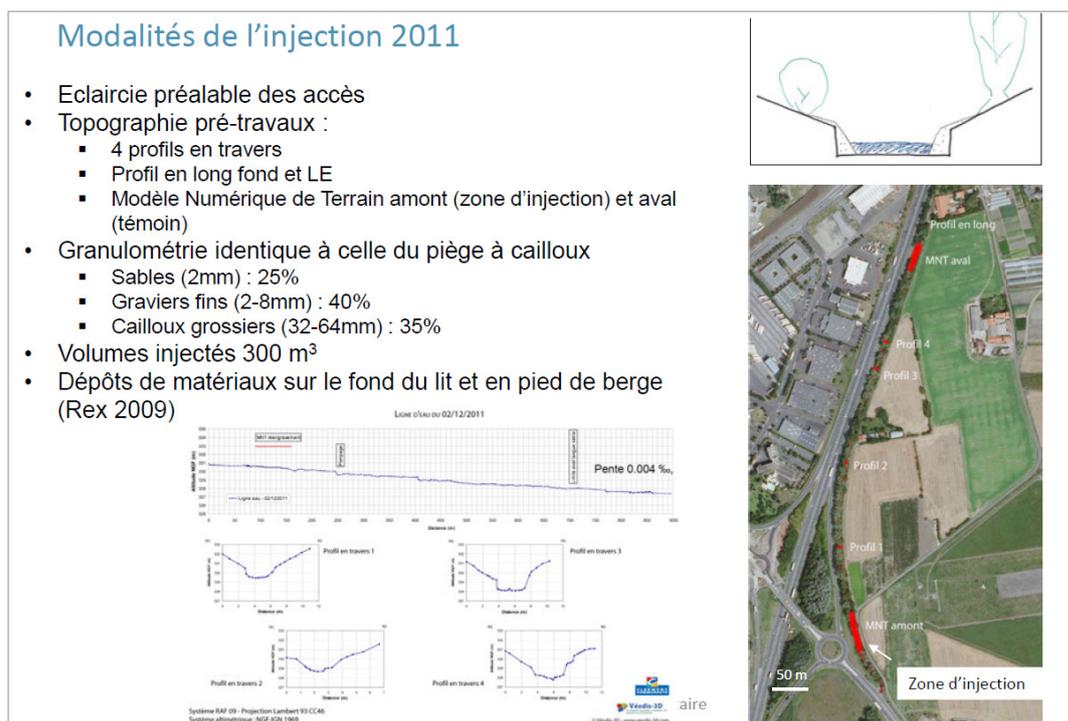
Après un premier essai en 2009 avec l'injection de 80 m³, la collectivité a fait appel au bureau d'étude VEODIS 3D pour les accompagner. La métropole souhaitait mieux comprendre le comportement du bassin d'orage : quels volumes, quelles granulométries et suivre les réinjections (morphologique et topographique) pour connaître leurs impacts (enjeu inondation).

Estimation de la quantité de matériaux

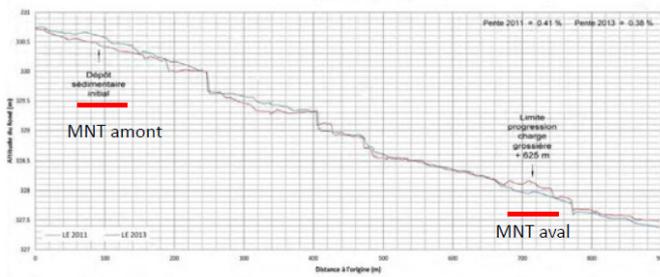
La mise en oeuvre d'un **suivi topographique et de modèles numériques de terrain** a été réalisée à intervalles réguliers. Les suivis se sont étalés de 2011 jusqu'à 2013 et se poursuivent aujourd'hui pour essayer de préciser les volumes entrants dans le piège.

Les résultats montrent que la quantité de matériaux (et la granulométrie) est variable selon l'hydrologie : elle est estimée autour de 100 à 250 m³/an.

Mise en oeuvre des injections



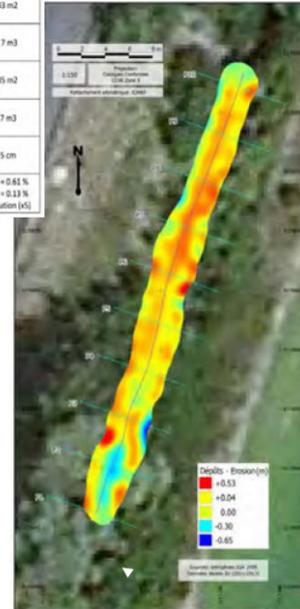
- Suivi visuel et topographique (2011-2013)



Evolutions morphologiques 2011 - 2013

Zone de divagation du lit (lit-berges)	143 m ²
Evolution du volume total	+ 7 m ³
Zone de maintien du lit	135 m ²
Volume de sédiments déposés au fond du lit	+ 7 m ³
Dépôt moyen du lit	+ 5 cm
Pente moyenne du fond	2011 = 0.41 % 2013 = 0.38 % Diminution (x5)

MNT aval



+ 2 mois
→



Un tri granulométrique a été réalisé pour enlever une grosse partie des fines de la part réinjectée.

Le suivi de la réinjection est visuel et selon des relevés topographiques.

Deux ans après l'injection, on observe que la charge sédimentaire injectée en amont prograde vers l'aval.

Le choix de la réinjection se fait une fois qu'on a atteint un profil d'équilibre sur la partie amont et que les matériaux ont été exportés petit à petit.

En 2015, la mise en deux fois deux voies de l'autoroute A75 a entraîné une déviation de l'Artière. La réinjection sédimentaire a été mise en place sur le nouveau tracé.

Modalités de l'injection 2015 et mise en routine

- 200 m³ déversés sur 2 zones
- Suivi visuel et topographique 2015-2016

Comparaisons	Surface (m ²)	Volumes (m ³)	
		Apports	Départs
Novembre 2015 / Mars 2016	224	3.9	31.7

MNT amont : départ

Vue du site vers l'aval



Prise de vue du 20 novembre 2015

Prise de vue du 10 mars 2016



Comparaisons	Surface (m ²)	Volumes (m ³)	
		Apports	Départs
Novembre 2015 / Mars 2016	104	0.8	16.9

MNT aval : départ

Vue du site vers l'aval



Prise de vue du 20 novembre 2015

Prise de vue du 10 mars 2016

Comparaisons	Surface (m ²)	Volumes (m ³)	
		Apports	Départs
Novembre 2015 / Mars 2016	249	9.3	15

MNT nouveau lit : transfert

Vue du site vers l'aval



Prise de vue du 20 novembre 2015

Prise de vue du 10 mars 2016

Les suivis (visuel et topographiques) et retours d'expériences ont permis de calibrer les injections à la fois en termes de fréquences et de volumes. Aujourd'hui, il est acté de réaliser un cubage des matériaux tous les 3/4 ans dans le piège à cailloux, qui permet de déterminer le volume de matériaux dont on a à disposition. Un curage peut être fait tous les 4 ans avec un tri de matériaux (enlèvement des fines) et des volumes d'injection autour de 200 m³ sur deux zones.

Le suivi visuel perdure au niveau des deux sites d'injection et en aval.

Alors que dans le cas précédent, le volume et rythme des injections ont été réalisés et adaptés d'après des retours d'expériences, le cas suivant s'appuie sur une connaissance fine du fonctionnement morfo-sédimentaire et couple une approche terrain et calculatoire.

CAS DU FURAN

L'amont du bassin versant du Furan (42) est encaissé et boisé. Deux barrages (usage AEP et écrêtement de crue) sont présents 10 km en aval de la source. De l'aval des barrages jusqu'à l'entrée de la couverture sous la ville, on observe une augmentation progressive des protections de berges. Le Furan est couvert sur 5 km dans la zone urbaine puis il est rectifié avec des protections latérales sur plusieurs kilomètres dans des zones urbaines.

Concernant le transport sédimentaire, le transport solide est résiduel en aval du barrage du Gouffre d'enfer jusqu'à Saint-Étienne. Sous la couverture, de forts débits liquides avec des temps de concentration très courts (de l'ordre du 1/4 d'heure, ex. crue 07/2009 augmentation du débit de 60 m³/s en 3 minutes). On observe un fort déséquilibre sédimentaire. En aval de la couverture, et jusqu'à la Fouillouse (10 km), la charge sédimentaire semble exclusivement provenir de l'amont. On a une forte incision du lit avec un fort transit vers l'aval à un rythme soutenu du fait des forts débits liquides.

VEODIS 3D avait pour mission de mettre en oeuvre les propositions d'une étude de SEM datant de 2012 :

- réaliser des réinjections de matériaux sous la couverture, dans l'objectif de reconstituer un matelas alluvial pour essayer de limiter l'incision des parties du radier de la couverture.
- En aval, l'objectif des injections est essentiellement de reconstituer un tapis alluvial pour limiter l'incision du lit et essayer de diversifier les faciès d'écoulement.

L'objectif de la mission était de définir les expérimentations, de les mettre en oeuvre et de faire un suivi des protocoles d'évaluation du transport solide pour l'élaboration d'un plan de gestion sur 4 ans.

L'approche globale qui a été mise en oeuvre pour essayer de dimensionner les réinjections s'appuie sur la réponse aux questions suivantes :

Approche globale mise en oeuvre et dimensionnement des réinjections

Quelle granulométrie est charriée par les crues courantes ? <i>1 an de suivi, après crue Q1 à Q5</i>	→	<ul style="list-style-type: none">• Etat des lieux granulométrique (Wolman)• Détermination du débit de mise en mouvement des particules<ul style="list-style-type: none">-> placettes colorimétriques-> galets peints-> galets équipés de traceurs RFID-> calculs théoriques• Carto. bancs, faciès
Où et comment injecter ?	→	<ul style="list-style-type: none">• Contraintes fortes d'accès
Quelle quantité de sédiments à injecter ?	→	<ul style="list-style-type: none">• Etude de l'impact de l'injection par modélisation hydraulique (ligne d'eau, vitesse)
Quels matériaux injecter ?	→	<ul style="list-style-type: none">• Pas de stock de matériaux disponibles• Recherche des « sources »• Choix du criblage pour calibrer et tester les protocoles
Quels impacts, efficacité ?	→	<ul style="list-style-type: none">• Suivi topo, RFID

Au droit de la couverture, des tas de 4 m³ ont été injectés par des trappes. Ce faible volume est en lien avec la difficulté d'accès des camions dans la ville et les réglementations associées. Le suivi s'est fait de façon visuelle et par traceurs RFID dans les matériaux déversés. Les résultats montrent que pour une crue de fréquence de 2 ans (7.5 m³/s en amont de la couverture, 43 m³/s en aval 14/06/2017), il y a remobilisation totale des matériaux injectés. Un blocage des matériaux dans la galerie est observé : ils se déposent sur des bancs d'alluvionnement. Ainsi, pour reconstituer à terme un matelas alluvial, des injections ponctuelles via les trappes pourront être réalisées.

En aval de la couverture, les réinjections se sont fait sur deux zones selon deux modalités :

- injection sur l'ensemble de la section avec la création d'un tapis de 30/40cm ; réduction de la section par tapissage du talus : 4 injections, volumes de 100 et 120 m³,
- injection par tapissage de la berge : 2 injections de 50 m³.

4 périodes de réinjections ont eu lieu sur environ 1,5 an avec une reprise quasi totale des matériaux.

Des suivis topographiques et suivis avec modèles numériques de terrain ont été réalisés.

Les résultats de l'expérimentation ont permis de valider les résultats des débits de mise en mouvement des particules sédimentaires. Cela a également permis de valider les différentes approches et leur combinaison : suivi terrain, experte et calculatoire.

La comparaison de ces deux exemples montre qu'il n'y a pas de modèle unique de réinjection, mais des modèles d'injection à adapter au contexte morphologique et sédimentaire. À noter que dans ce genre de projet il est important de communiquer largement et de s'appuyer sur un bilan global morphologique et sédimentaire.

POUR EN SAVOIR PLUS

Stephane Petit stephane.petit@veodis-3d.com

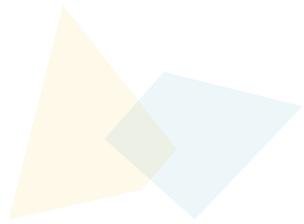
Stephane Maneval smaneval@clermontmetropole.eu - crédit photo : VEODIS3D



RESTAURATION HYDROMORPHO- LOGIQUE DE L'HERBASSE (26)

**ADRIEN GUIONNET - SYNDICAT INTERCOMMUNAL D'AMÉNAGEMENT DU BASSIN
DE L'HERBASSE (SIABH)**

ADRIEN HAMM - BIOTEC



Affluent rive droite de l'Isère, l'Herbasse est un cours d'eau dynamique, au caractère torrentiel, présentant un régime hydrologique de très large amplitude où les crues brutales peuvent spontanément succéder à de longues séquences de faible débit voire d'assecs.

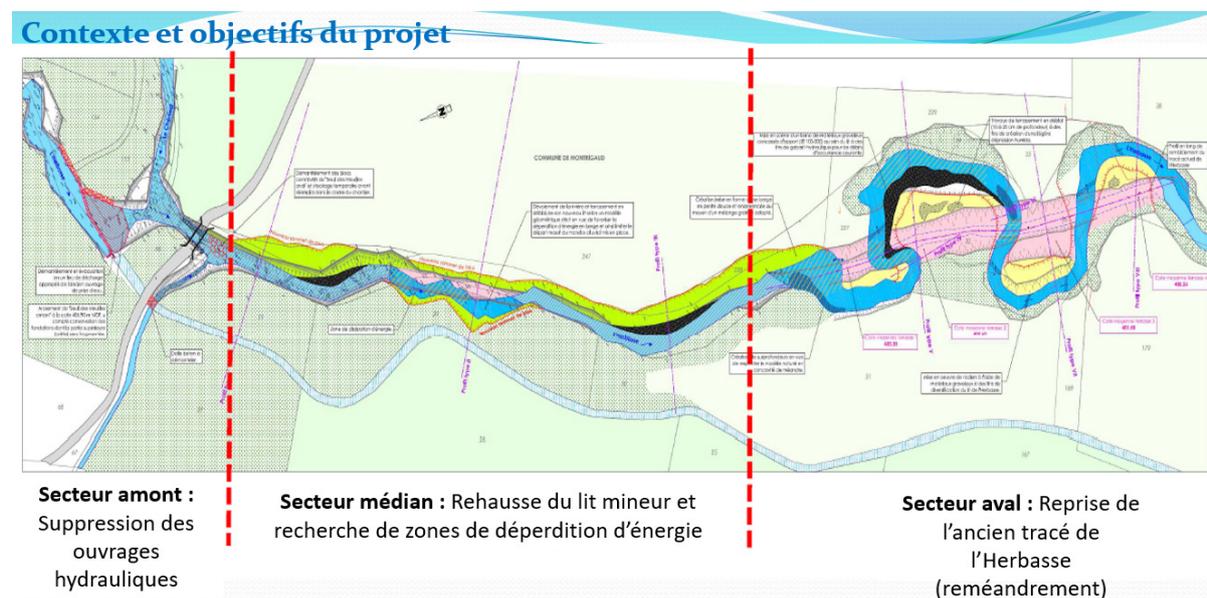
Cette rivière présente aujourd'hui les nombreux symptômes des déséquilibres usuels constatés sur une majorité des cours d'eau du secteur médian du bassin Rhône Méditerranée Corse et, plus particulièrement un enfoncement marqué de son lit et des portions de cours d'eau « figées ».

Or, naturellement, l'eau en mouvement dissipe son énergie, creuse, transporte, dépose des matériaux. De manière autonome, un cours d'eau recherche inlassablement à établir une forme adaptée à son équilibre.

Guidé par le souci d'un retour à des conditions physiques proches des modèles naturels et la volonté de ne pas « artificialiser » le lit, **le SIABH a travaillé à une solution globale à savoir la reconquête du tracé antérieur de l'Herbasse sur près de 600 mètres.**

Les objectifs du projet étaient les suivants :

- le retour à un profil en long d'équilibre en retrouvant un cours d'eau dynamique,
- la recharge sédimentaire du tronçon de cours d'eau,
- la reconstitution de conditions biogènes,
- le rétablissement de la continuité écologique,
- l'atténuation des pressions hydrauliques et de l'incision sur le lit du cours d'eau.

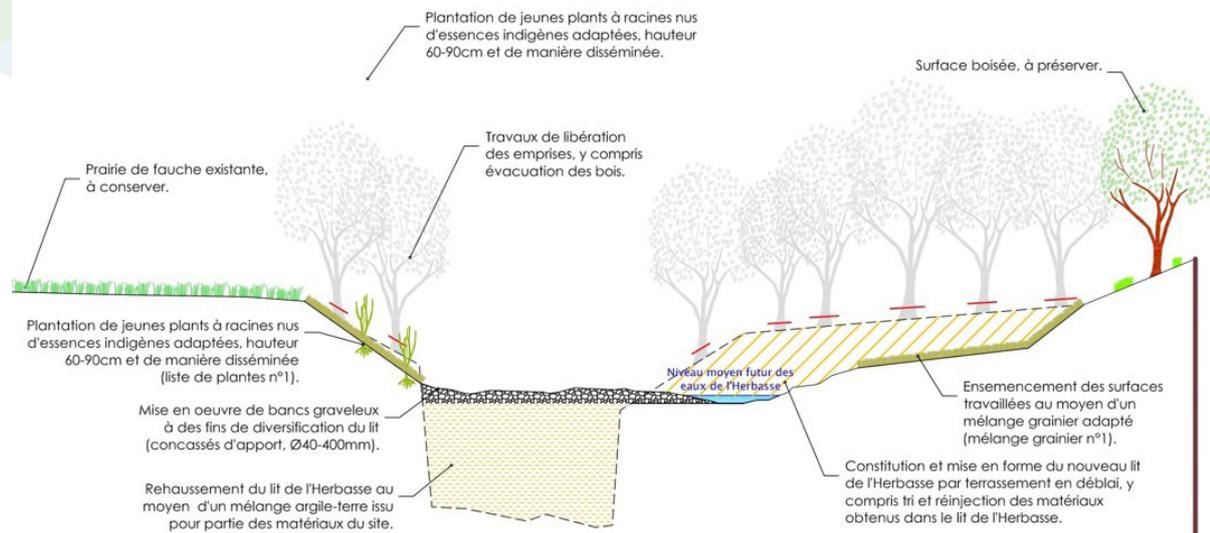


Les travaux ont été réalisés en assec avec dérivation de l'eau dans un ancien canal.

Des matériaux argileux (80 % en provenance des déblais du terrassement des berges) compactés par couche de 40 cm ont été utilisés. La reconstitution du matelas alluvionnaire (épaisseur de 50 cm) a été réalisée avec des matériaux prélevés et criblés (> 40 mm) dans l'Herbasse sur un secteur excédentaire.

Le profil en long a été stabilisé en visant à favoriser des débordements plus précoces et des méandres ont été réouverts à l'aval pour allonger le tracé et diminuer les conditions de pente.

Des atterrissements ont été créés avec le rejet du criblage des matériaux de l'Herbasse pour réduire la largeur du lit et faire de l'apport en matériaux « fins ».



Plusieurs milliers de mètres cubes de matériaux graveleux ont été réinjectés, et près de 6.000 mètres cubes de terrassements en déblai/remblai effectués.

Complémentairement aux travaux de restauration morphologique du lit vif, un travail de végétalisation des surfaces travaillées a été mené au moyen de boutures de saules puis de jeunes arbres en veillant à travailler au maximum au moyen de matériel végétal issu de sites en proximité directe du chantier.

Achevés en 2018, les travaux de renaturation de l'Herbasse ont laissé place à une nécessaire période de « cicatrisation » qui permet de s'assurer de bon développement de la végétation.»



POUR EN SAVOIR PLUS

Adrien GUIONNET a.guionnet@siabh.fr

- Crédit photo : SIABH

Adrien Hamm adrien.hamm@biotec.fr

PARTICIPANTS

Participant		Structure	CP	Ville
MALAVOI	Jean-René	AGENCE DE L'EAU RMC	69000	LYON
SIMEON	Olivier	AGENCE DE L'EAU LOIRE-BRETAGNE	63370	LEMPDES
BERNADOU	Adrien	AQUABIO	63100	CLERMONT FERRAND
THIVOLLE	Laurent	ARCHE AGGLO	07305	TOURNON SUR RHONE
DUMONT	Julien	ARCHE AGGLO	07305	TOURNON SUR RHONE
BIGUE	Julien	ARRA ²	38000	GRENOBLE
VALE	Nicolas	ARRA ²	38000	GRENOBLE
MONTAGNON	Evelyne	ARRA ²	63000	CLERMONT-FERRAND
HAMM	Adrien	BIOTEC	69005	LYON
BARBIEUX	Lucas	CABINET MERLIN	69002	LYON
WOJTKO	Bertrand	CEREMA	63000	CLERMONT FERRAND
MANEVAL	Stéphane	CLERMONT AUVERGNE METROPOLE	63000	CLERMONT-FERRAND
BARTHELEMIE	Léo	COMMUNAUTE D'AGGLOMERATION DU PAYS DE GEX	01170	GEX
GENESTE	Laurent	DDT DE L'ALLIER	03403	YZEURE
JEAY	Bruno	DEPARTEMENT DE LA LOIRE	42000	SAINT-ETIENNE
MONNERET	Charles	DYNAMIQUE HYDRO	69009	LYON
MORET-BAILLY	Clément	DYNAMIQUE HYDRO	69009	LYON
GRUFFAZ	Frédéric	EAU ET TERRITOIRES	38000	GRENOBLE
LOIRE	Rémi	EDF	69003	LYON
REYGROBELLET	Jean-philippe	EPTB GARDONS	30000	NÎMES
BERTRAND	Mélanie	GINGER BURGEAP	69003	LYON
MORANDI	Bertrand	GRAIE	69100	VILLEURBANNE
CAMENEN	Benoit	INRAE	69625	VILLEURBANNE
MARCAGGI	Grégory	IRH	38000	GRENOBLE
DOUARD	Jean-Loïc	ISL INGÉNIERIE	75019	PARIS
TAVAUD	Cédric	LOIRE FOREZ AGGLO	42605	MONTBRISON
VEGARA	Rémi	LOIRE FOREZ AGGLO	42605	MONTBRISON
FIORE	Romain	LOIRE FOREZ AGGLO	42605	MONTBRISON
BARJON	Rodrigue	LOIRE FOREZ AGGLO	42605	MONTBRISON
BERMOND	Pauline	METROPOLE DE LYON	69003	LYON
DE BRITO	Céline	METROPOLE DE LYON	69003	LYON
RAVEL	Violette	METROPOLE DE LYON	69003	LYON
LAMBERET	Romain	MFR ANSE	69480	ANSE
VISI	Geoffrey	PNR HAUT-JURA	39310	LAJOUX
DOREY	Anne-Fleur	PNR HAUT-JURA	39310	LAJOUX
SAXER	Sylvain	PNR LIVRADOIS FOREZ	63880	SAINT-GERVAIS-SOUS-MEYMONT
LALLIAS	Jérôme	PROGEO Environnement	38000	GRENOBLE
WEROCHOWSKI	Antoine	REGION BOURGOGNE FRANCHE COMTE	21000	DIJON
PRAYER	Jordan	RIPARIA	30200	BAGNOLS SUR CÈZE
PALISSE	Mélissa	RIPARIA	30200	BAGNOLS SUR CÈZE
SABATIER	Guillaume	RIPARIA	30200	BAGNOLS SUR CÈZE
KUNG	Flamina	RIPARIA	30200	BAGNOLS SUR CÈZE
GARCIA	Sylvain	ROANNAISE DE L'EAU	42313	ROANNE
GIBERT	Marion	ROANNAISE DE L'EAU	42313	ROANNE
QUENEHERVE	Cléa	SAFEGE	73370	LE BOURGET DU LAC
VIAL	David	SAFEGE	73370	LE BOURGET DU LAC

RIEU	Amélie	SAINT-ETIENNE-METROPOLE	42000	SAINT-ETIENNE
PONCET	Maud	SAINT-ETIENNE-METROPOLE	42000	SAINT-ETIENNE
VENTO	Olivier	SETEC HYDRATEC	13127	VITROLLES
GUIONNET	Adrien	SIABH	26260	SAINT DONAT SUR L'HERBASSE
VILLARD	Aurélien	SIAGA	38480	PONT DE BEAUVOISIN
BALDINO	Stéphane	SINBIO SCOP	69690	L'ARBRESLE
HEBERT	Maxime	SMAAVO	69360	SIMANDRES
SENÉ LACOMBE	Paulin	SMBV2A	12390	RIGNAC
GRAPIN	Jean-Louis	SMBVL	84600	VALREAS
VIGUIER	Pierre-Etienne	SMLD	48500	LA CANOURGUE
MATHEVON	Aurélien	SMVVA	63450	SAINT SATURNIN
BOUTERIN	Mathieu	SOCIETE DU CANAL DE PROVENCE	13182	AIX-EN-PROVENCE
DREVET	Eva	SRDCBS	01400	CHATILLON-SUR-CHALARONNE
PAPIRNYK	Murielle	SYGR	69700	GIVORS
PETIT	Stéphane	VEODIS 3D	63400	CHAMALIERES

L'Association Rivière Rhône Alpes Auvergne est un réseau d'acteurs pour la gestion globale des milieux aquatiques et de l'eau qui rassemble plus de 1 500 professionnels afin de favoriser les échanges et mutualiser les expériences.

Pour répondre aux besoins de ses adhérents, l'ARRA² organise régulièrement des journées techniques d'information et d'échange.

Ces actes proposent une synthèse de la journée « Transport solide et recharge sédimentaire » organisée le mardi 8 novembre 2022 à Pinay (42).



avec le soutien
financier de :



ASSOCIATION RIVIÈRE RHÔNE ALPES AUVERGNE
7 RUE ALPHONSE TERRAY > 38000 GRENOBLE
04 76 48 98 08 > ARRAA@ARRAA.ORG
WWW.ARRAA.ORG