



HAL
open science

Retour d'expérience des suivis de la restauration des habitats et recommandations opérationnelles

Alexandre Peeters, O. Navratil, Salomé Berthier-Laumond, Robinson Nedelec, Delphine Sirven, Daniel Vazquez-tarrio, Mathieu Cassel, Hervé Piégay

► To cite this version:

Alexandre Peeters, O. Navratil, Salomé Berthier-Laumond, Robinson Nedelec, Delphine Sirven, et al.. Retour d'expérience des suivis de la restauration des habitats et recommandations opérationnelles. [Rapport de recherche] CNRS. 2024. hal-04653097

HAL Id: hal-04653097

<https://hal.science/hal-04653097v1>

Submitted on 26 Aug 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Observatoire
des Sédiments
du Rhône

Retour d'expérience des suivis de la restauration des habitats et recommandations opérationnelles

Retour d'expérience des suivis de la restauration des habitats et recommandations opérationnelles

Rapport scientifique final

Version du 19 juin 2024

Observatoire des Sédiments du Rhône – 6^{ème} programme d'action

Axe C – Développer des méthodes pour restaurer la qualité physique et chimique et évaluer les effets des actions

Action C4 – Retour d'expérience des suivis de la restauration des habitats et recommandations opérationnelles

Personnes impliquées

Alexandre Peeters (CNRS, UMR5600, EVS) ; Oldrich Navratil (CNRS, UMR5600, EVS) ; Salomé Berthier-Laumond (CNRS, UMR5600, EVS) ; Robinson Nedelec (CNRS, UMR5600, EVS) ; Delphine Sirven (CNRS, UMR5600, EVS) ; Daniel Vázquez-Tarrío (CNRS, UMR5600, EVS) ; Mathieu Cassel (CNRS, UMR5600, EVS) ; Hervé Piégay (CNRS, UMR5600, EVS)

Pour citer ce rapport

Peeters A. *et al.* (2023). *Retour d'expérience des suivis de la restauration des habitats et recommandations opérationnelles*. Rapport scientifique final. Observatoire des Sédiments du Rhône – 6^{ème} programme d'action. Action C4. 28 p.

L'OSR est un dispositif animé par le Graie. Pour toute information vous pouvez contacter Bertrand Morandi (bertrand.morandi@graie.org)



Résumé

En s'appuyant sur les résultats des actions C.1 à C.3 du programme OSR6, ce rapport a permis (i) de mettre en lumière les retours d'expérience des opérations de réinjection sédimentaire menées sur le Rhône, et (ii) de formuler des recommandations opérationnelles pour la mise en œuvre des futures opérations de restauration. Les éléments abordés concernent : (a) la mobilité des sédiments réinjectés, (b) les volumes et la granulométrie des matériaux à réinjecter (ainsi que la fréquence des éventuelles répétitions des réinjections), (c) la localisation des sites de réinjections et leur répartition longitudinale, et (d) les indicateurs de succès en termes de réponse écologique potentielle (diversification des habitats) et de pérennité (vitesses de transfert, temps de résidence de la charge introduite dans le RCC, colmatage des substrats).

Les résultats acquis indiquent que les réinjections sédimentaires devraient être bénéfiques pendant plusieurs décennies dans les Vieux-Rhône qui ont été concernés par ces opérations. Outre la bonne mobilité des sédiments réinjectés, le panache initial de galets/graviers a tendance à se fragmenter en plusieurs zones de plus fortes concentrations, favorisant une diversification des habitats aquatiques et terrestres. Toutefois, de nouvelles réinjections s'avèrent être localement nécessaires. Pour pouvoir atteindre les objectifs de restauration de la dynamique sédimentaire et de diversification des habitats aquatiques, il est recommandé d'augmenter la fréquence des réinjections ou le volume de la première réinjection (2-5 fois la capacité annuelle de charriage), sous réserve des contraintes réglementaires, des risques d'inondation (augmentation inhérente de la ligne d'eau) et de la faisabilité opérationnelle (coût, bilan carbone des travaux).

Les retours d'expérience en termes de localisation des sites de réinjections montrent qu'il est nécessaire de bien définir les objectifs des opérations de réinjection au préalable des travaux. Dans le cas où l'objectif est d'augmenter les capacités d'accueil de la faune et de la flore benthique, il faut alors sélectionner des sites de réinjection caractérisés par des contraintes hydrauliques élevées, ce qui permet de ré-engraisser des radiers existants en aval ou de créer de nouveaux radiers. En revanche, dans le cas où l'objectif est de restaurer la dynamique des bancs en les ré-engraisant et d'y favoriser la diversité spécifique, il est alors préférable de sélectionner des sites situés en amont immédiat des bancs à redynamiser.

Il ressort également de cette analyse qu'il est nécessaire de favoriser la complémentarité des actions de restauration. C'est notamment le cas lorsqu'une action de réinjection sédimentaire est couplée avec un démantèlement de casiers (ou simplement un élargissement du lit), comme sur le Vieux-Rhône de Péage-de-Roussillon. Dans ce cas, l'élargissement et la diminution inhérente des contraintes de cisaillement favorisent l'alluvionnement et, par conséquent, la création d'habitats biogènes (*e.g.*, bancs, radiers).

Au final, ces résultats permettent de fournir des premiers éléments de recommandation en vue d'optimiser la réussite des opérations de réinjection sédimentaire et de redynamisation.

Mots-clés

Observatoire ; Sédiments ; Rhône ; OSR ; Charriage ; Réinjection sédimentaire ; Géophone ; RFID

Table des matières

1. Introduction.....	5
2. Retour d'expérience des suivis de la restauration des habitats et recommandations opérationnelles.....	6
2.1 Synthèse relative à la mobilité des traceurs	6
2.2 Volume et granulométrie à réinjecter (et fréquences des réinjections).....	10
2.2.1 <i>Volume à réinjecter</i>	10
2.2.2 <i>Granulométrie à réinjecter</i>	11
2.2.3 <i>Éléments de synthèse sur le volume et granulométrie des sédiments à réinjecter</i>	13
2.3 Localisation des sites de réinjection et répartition longitudinale des sédiments injectés ...	14
2.3.1 <i>En fonction des contraintes hydrauliques locales : cas du Vieux-Rhône de CHA)</i>	14
2.3.2 <i>En fonction des formes fluviales situées directement en aval du site de réinjection : cas des Vieux-Rhône de DZM et de PDR</i>	15
2.3.3 <i>Éléments de synthèse sur la localisation des sites de réinjection</i>	19
3. Indicateurs de succès en termes de réponse écologique potentielle et de durabilité.....	20
3.1.1 <i>Evaluation de la restauration de la dynamique sédimentaire</i>	20
3.1.2 <i>Evaluation de la qualité des habitats benthiques et hyporhéiques</i>	22
4. Conclusions et recommandations générales	24
5. Bibliographie	26

1. Introduction

Des opérations de restauration ont été mises en œuvre dans plusieurs Vieux-Rhône à partir de 2017 afin de réactiver leur dynamique hydro-sédimentaire :

- (i) le démantèlement des casiers Girardon, qui rétablit les processus d'érosion de berge et les apports potentiels de graviers/galets, *i.e.*, réinjection sédimentaire indirecte ;
- (ii) l'introduction artificielle de larges volumes de graviers/galets dans le chenal pour compenser le déficit en sédiments des secteurs pavés, *i.e.*, réinjection sédimentaire directe.

L'évaluation de l'efficacité et de la pérennité de ces actions de restauration repose, d'une part, sur des indicateurs biotiques (*e.g.*, poissons, invertébrés, végétation aquatique et rivulaire), qui seront abordés dans le cadre du programme RhônEco (programmation 2024-2028), et d'autre part, sur des indicateurs abiotiques, qui font l'objet de ce rapport.

Ces indicateurs abiotiques concernent le suivi du transport sédimentaire (par charriage), qui permet de déterminer dans quelle mesure et pour quelle durée la dynamique sédimentaire peut être restaurée (aspects traités dans le rapport C.3 du programme OSR6 ; Peeters *et al.*, 2024). Ils concernent également l'évaluation de la qualité des habitats benthiques et hyporhéiques, ainsi que l'effet des actions de restauration sur l'état de ces habitats (ces aspects sont traités dans le rapport C.1 du programme OSR6 ; Berthier-Laumond *et al.*, 2024). Ces habitats jouent un rôle majeur pour la préservation de la biodiversité du cours d'eau car ils servent de substrat et de support de vie à de nombreuses espèces aquatiques animales et végétales.

Ce rapport fait la synthèse des deux types d'opérations de restauration susmentionnées, *i.e.* les réinjections sédimentaires directe et indirecte. En s'appuyant sur les résultats des actions C.1 à C.3, il a pour objectifs (i) de mettre en lumière les retours d'expérience des réinjections réalisées sur plusieurs Vieux-Rhône, et (ii) de formuler des recommandations opérationnelles pour la mise en œuvre des futures opérations de restauration.

Pour ce faire, un bilan général y est dressé sur la base des retours d'expérience des opérations de réinjection sédimentaire et de redynamisation menées sur le Rhône, ainsi que sur les retours d'expérience issus de la littérature scientifique internationale. Ce bilan vise à apporter des éléments de réponses aux questions opérationnelles suivantes :

- a) Quelle est la mobilité des sédiments réinjectés ?
- b) Quels sont les volumes et la granulométrie des matériaux à réinjecter ? Et à quelle fréquence ?
- c) Quelle est la localisation optimale d'une réinjection sédimentaire ? Doit-elle être répétée sur le continuum longitudinal (*i.e.*, en plusieurs points de réinjection) ?
- d) Quels sont les indicateurs de succès en matière de réponse écologique potentielle (diversification des formes et des habitats) et de pérennité (vitesses de transfert des particules et des formes, temps de résidence de la charge introduite dans le RCC, colmatage du substrat) ?

2. Retour d'expérience des suivis de la restauration des habitats et recommandations opérationnelles

2.1 Synthèse relative à la mobilité des traceurs

Afin d'optimiser les opérations de réinjection sédimentaire, il est fondamental de bien dimensionner la taille des matériaux à injecter de manière à ce qu'ils puissent être régulièrement mobilisés par des crues dont la récurrence est de l'ordre de 1 à 2 ans. En effet, un surdimensionnement de la taille des particules compte tenu de la compétence du fleuve entrainera une mobilité limitée, voire nulle. Or, il est reconnu qu'un fond caillouteux immobile sera rapidement colmaté par les MES qui s'infiltreront dans les interstices de la matrice caillouteuse (Peeters *et al.*, 2021). Il est donc important que ce fond caillouteux soit régulièrement remobilisé par les crues ($T \sim 1-2$ ans). A l'inverse, des galets/graviers dont la taille est sous dimensionnée pourraient être mobilisés trop fréquemment et sur de grandes distances, ce qui aurait pour effet de les disperser rapidement vers l'aval et de réduire l'épaisseur de la couche de galets/graviers injectés, la rendant par conséquent peu fonctionnelle pour les organismes aquatiques. L'analyse des distances et des vitesses de transport des matériaux issus des réinjections sédimentaires est donc importante pour évaluer la réussite de telles opérations.

Dans le cadre de l'action C.3 du programme OSR6 (Peeters *et al.*, 2024), trois opérations de réinjection sédimentaire directe (CHA, PDR_GA et DZM) et un projet de réinjection indirecte (PDR_SC) ont été suivies à l'aide de traceurs RFID. Le suivi s'est également étendu à un secteur à transport solide actif (LYM), à titre de comparaison. Les distances de transport mises en évidence pour l'ensemble des sites étudiés dans ce travail sont synthétisées au Tableau 1. Les vitesses de transport (moyenne et maximale) y sont calculées selon le temps calendaire (*i.e.*, en tenant compte des périodes d'activité et d'inactivité de transport par charriage). La comparaison des vitesses calendaires entre sites est délicate car (i) les sites suivis ne possèdent pas de durée de suivi identique et (ii) leurs périodes de suivi respectives diffèrent en termes d'occurrence, d'intensité et de durée de crue observées. Néanmoins, comme les durées de suivi portent sur plusieurs années (entre 3 et 6 ans selon les sites) et qu'elles comportent des événements d'intensité similaire, on peut considérer que les vitesses annuelles des différents sites sont potentiellement comparables. Notons qu'une analyse détaillée, basée sur la comparaison des vitesses virtuelles (*i.e.*, tenant compte des seules périodes d'activité de transport par charriage) des différents sites de traçage, est fournie dans le rapport de l'action C.3 du programme OSR6 (Peeters *et al.*, 2024). Bien que l'utilisation des vitesses virtuelles soit plus robuste (du fait de la prise en compte des seules périodes d'activité), il a été choisi de présenter cette synthèse sur la base des vitesses calendaires. En effet, elles fournissent une évaluation plus facile à interpréter (distance rapportée à l'année) que les vitesses virtuelles (distance rapportée à l'heure).

Tableau 1. Synthèse des vitesses de transport calculées selon le temps calendaire

RCC	Durée suivi (année)	Distance moy (m)	Vitesse moy (m/an)	Distance max (m)	Vitesse max (m/an)
CHA	6.0	701	118	2435	409
LYM	3.3	2359	721	5660	1731
PDR_GA	5.1	915	179	3652	716
PDR_SC	3.0	41	14	475	160
DZM	4.2	830	198	2486	593

Il apparait ainsi qu'en comparaison avec le secteur à transport solide actif (LYM ; canal de Miribel ; en vert dans le Tableau 1), les secteurs pavés sujets à des opérations de restauration présentent des vitesses de transport nettement moins élevées. Ainsi, les trois secteurs réinjectés en galets/graviers (CHA, PDR_GA et DZM) possèdent des vitesses moyennes 3,6 à 6,1 fois moins élevées que celle du secteur de référence (LYM). Le secteur de démantèlement des casiers (PDR_SC) possède une valeur 52 fois moins élevée. Cette très faible vitesse s'explique par les conditions hydrauliques locales de la zone de traçage sédimentaire (*i.e.*, chenal secondaire situé entre la berge gauche et le cordon d'îlots issu du démantèlement des casiers).

Grâce à ces estimations de vitesse de transport, il est donc possible de calculer le temps de résidence des sédiments réinjectés dans les RCC (*i.e.*, le temps nécessaire aux sédiments réinjectés pour quitter les RCC et atteindre le Rhône total ; Tableau 2). Il apparait que ce temps de résidence est, selon les sites, compris entre 15 et 43 ans (d'après les calculs établis à partir de la vitesse maximale des traceurs), et entre 61 et 129 ans (d'après les calculs établis à partir de la vitesse moyenne des traceurs). Dans le cas du RCC de PDR, le temps de résidence a également été calculé en considérant la distance entre le site de réinjection et le seuil de Peyraud, qui est susceptible d'entraver la continuité sédimentaire.

Tableau 2. Temps de résidence des sédiments réinjectés dans le RCC (temps calculé sur la base des vitesses calendaires issues des traçages sédimentaires)

	Distance entre site d'injection et fin du RCC (m)	Vitesse moy (m/an)	Temps de résidence dans le RCC selon la vitesse moy (an)	Vitesse max (m/an)	Temps de résidence dans le RCC selon la vitesse max (an)
CHA	9 600	118	82	409	24
PDR_GA	10 940 (8 090 jusqu'au seuil de Peyraud)	179	61 (45 jusqu'au seuil de Peyraud)	716	15 (11 jusqu'au seuil de Peyraud)
DZM	25 500	198	129	593	43

Même si les vitesses observées sont moins importantes que pour le secteur à transport solide actif, ces travaux mettent en évidence une bonne mobilité des traceurs pour l'ensemble des sites qui ont fait l'objet d'une réinjection sédimentaire. En d'autres termes, les RCC vont pouvoir bénéficier des effets bénéfiques des opérations de réinjection pendant plusieurs décennies (sous réserve de conditions hydrologiques similaires aux périodes d'observation). Ces résultats doivent néanmoins être nuancés en raison i) de la précision des estimations de vitesses de transfert qui dépend de la durée des périodes suivies et des crues que l'on a pu observer, et ii) des aspects qualitatifs des habitats que constituent ces sédiments une fois remobilisés. En effet, bien que la mobilité des galets/graviers de la réinjection soit plutôt bonne, il importe également que les sédiments réinjectés remobilisés constituent des habitats aquatiques fonctionnels sur le moyen et sur le long terme. En d'autres termes, lorsque les galets/graviers issus des réinjections se dispersent vers l'aval au fur et à mesure des crues, ils ne sont fonctionnels que s'ils reconstituent des formes alluviales qui représentent des habitats attractifs, tels que des radiers propices à la reproduction des poissons lithophiles ou des bancs servant de support à une diversité végétale spécifique. Une attention particulière doit donc également être portée à la qualité et à la pérennité de ces habitats, notamment au travers de l'épaisseur de la couche de sédiments remobilisés et de l'état du compartiment hyporhéique. Ce dernier point sera discuté plus loin dans ce rapport (cf. §3.2). Quant à l'évolution spatiale et temporelle de la couche de sédiments remobilisés, elle peut être évaluée à l'aide du travail de modélisation hydro-sédimentaire (Vázquez-Tarrío *et al.*, 2021, 2023) réalisé dans le cadre de l'action C.3 (Peeters *et al.*, 2024).

Pour rappel, ce travail de modélisation a initialement été réalisé pour déterminer le temps de transfert des sédiments réinjectés jusqu'à la retenue de barrage localisée à l'aval des points de réinjection. Pour cela, nous avons cherché à combiner l'estimation des volumes de sédiment mobilisés (à partir des calculs de transport par charriage grâce à des équations de transport solide) avec la distribution des distances de propagation des particules sédimentaires (déduites des données de traçage obtenues sur le terrain). Pour déterminer l'épaisseur de la couche de sédiments remobilisés et leur répartition spatiale, les volumes issus du travail de modélisation ont été convertis en épaisseurs, connaissant la largeur du chenal pour chaque profil en travers. De la sorte, il est possible de représenter l'évolution spatiale (avec un maillage de 50 m) et temporelle de l'épaisseur moyenne (par profil en travers) du panache de sédiments issu de la réinjection (Figure 1). Dans le cas de la réinjection sédimentaire du Vieux-Rhône de PDR (PDR_GA ; 6885 m³ réinjectés), il apparaît qu'un an après la réinjection, une partie des sédiments introduits s'est dispersée en aval sur environ 500 m. Les sédiments présentent une épaisseur moyenne relativement importante (~50 cm) qui tend néanmoins à décroître vers l'aval. Cinq ans après la réinjection, l'ensemble des sédiments a quitté la zone de réinjection et les sédiments se sont dispersés sur un peu plus de 2 km en aval. L'épaisseur moyenne ne semble suffisamment attractive (> 10 cm) que sur les 600-700 premiers mètres ; au-delà, elle devient très faible (quelques centimètres). La situation 10 ans après la réinjection montre une dispersion sur près de 5 km, avec une épaisseur moyenne de sédiment de plus en plus faible, à l'exception du secteur situé environ 2 km en aval de l'injection où une accumulation est observée au niveau du secteur de démantèlement des casiers Girardon. Cette accumulation est favorisée par la surlargeur du lit (élargissement dans le cadre des travaux) et la diminution inhérente des contraintes de cisaillement. Enfin, la situation 20 ans après la réinjection montre que les sédiments réinjectés atteignent le réservoir du seuil de Peyraud.

Cette analyse de l'épaisseur doit néanmoins être nuancée car elle porte sur une épaisseur moyenne par profil en travers. Elle ne permet pas de déterminer la composante latérale de l'épaisseur, qui pourrait s'exprimer sous la forme d'accumulations locales (e.g., bancs latéraux ou de convexité, radier).

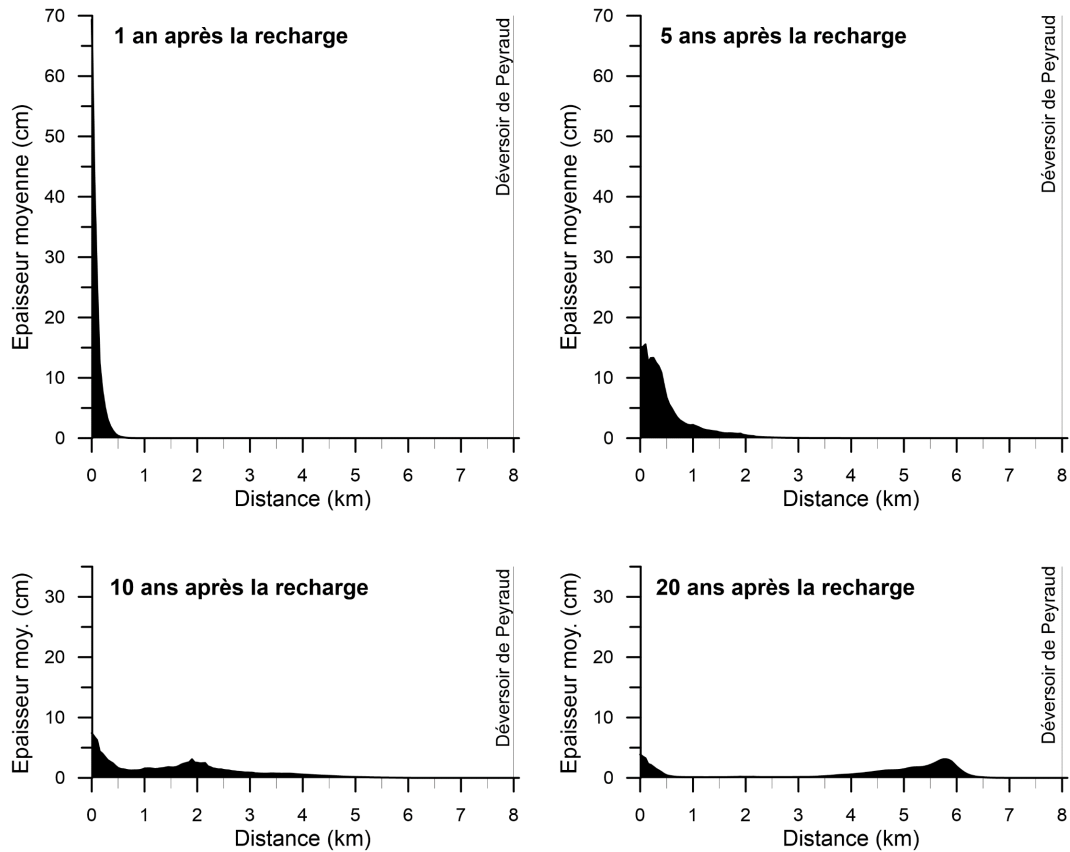


Figure 1. Réinjection sédimentaire de la Platière sur le Vieux-Rhône de PDR : répartition longitudinale de l'épaisseur moyenne de sédiment depuis le site de réinjection sédimentaire (= 0 km) après 1 an, 5 ans, 10 ans et 20 ans.

2.2 Volume et granulométrie à réinjecter (et fréquences des réinjections)

2.2.1 Volume à réinjecter

La question du volume de sédiment à réinjecter est rarement abordée dans les manuels techniques de restauration écologique. D'un point de vue strictement théorique et sur la base d'un état de l'art approfondi, Bunte (2004) formule des recommandations de volumes à réinjecter qui dépendent de la valeur du débit solide annuel moyen du cours d'eau ; ces volumes variant en fonction des altérations du débit liquide et du débit solide en lien avec le type de barrage. D'une manière générale, il ressort que le volume à apporter annuellement au cours d'eau doit être similaire à la capacité annuelle de charriage calculée pour un chenal dans des conditions de post-réinjection. La capacité de charriage est calculée ici à partir de la granulométrie de la charge injectée et non de celle du lit initial qui est bien souvent pavé et pour laquelle la capacité de charriage est donc nulle.

Dans le cas du Rhône, la capacité annuelle de charriage a été calculée à deux reprises pour l'ensemble du fleuve (Tableau 3) :

- Dans le cadre du programme OSR4 (action I.4 ; Tal *et al.*, 2018), à partir du modèle hydraulique MAGE (PamHyr-MAGE 1D ; Dugué *et al.*, 2016) et de données granulométriques (Parrot, 2015) ;
- Dans le cadre de la stratégie de gestion sédimentaire du Rhône (BURGEAP, 2020).

Tableau 3. Volume de sédiments réinjectés et capacité annuelle de charriage de ces matériaux dans le RCC concerné

RCC	Volume réinjecté (m ³)	Capacité de charriage d'après OSR (action I4 ; Tal <i>et al.</i> , 2018) (m ³ /an)	Ratio	Capacité de charriage selon la stratégie de gestion sédi. (Burgeap, 2020) (m ³ /an)	Ratio
CHA	15 000	1 080	13.9	7 000	2.1
PDR	6 850	3 510	2.0	Maximum 6 000	1.1
BLN	~21 000	11 190	1.9	15 000	1.4
DZM	30 000	16 890	1.8	30 000	1.0

Dans l'ensemble, les résultats issus des travaux de l'OSR et de BURGEAP sont relativement convergents, avec un rapport entre le volume réinjecté et la capacité annuelle de charriage compris entre 1 et 2 (à l'exception du Vieux-Rhône de Chautagne).

Les rapports entre le volume réinjecté et la capacité annuelle de charriage pour les réinjections du Rhône sont légèrement supérieurs à ceux associés aux réinjections sédimentaires effectuées sur le Vieux-Rhin en aval du barrage de Kembs, qui sont compris entre 0,6 et 1,3 (Arnaud *et al.*, 2017 ; Chardon *et al.*, 2022). Dans le cas de la basse vallée de l'Ain, les travaux

réalisés par Rollet (2007) ont mis en évidence une capacité de charriage de 15 000 m³/an ; valeur qui a servi de base pour déterminer le volume de sédiments à réinjecter (rapport de ~1). Le bilan des premières opérations de réinjection (2005-2006) a montré que les bénéfices écologiques étaient potentiellement limités dans le cas d'une seule réintroduction du fait de la diffusion de la charge vers l'aval. Celle-ci devrait donc être répétée annuellement afin d'atténuer significativement le déficit sédimentaire (Lejot *et al.*, 2011). Sur la base de ce constat, le Syndicat de la Rivière d'Ain Aval et de ses Affluents a réinjecté un total de 95 000 m³ de galets/graviers entre 2005 et 2021 (Arnaud *et al.*, 2023).

D'autres points de comparaison peuvent être effectués avec des retours d'expérience issus de la littérature scientifique. Mais ils concernent toutefois des contextes hydro-sédimentaires différents, principalement des contextes torrentiels. Ainsi, Heckmann *et al.* (2017) estiment que les réinjections effectuées sur l'Isar (Allemagne) sur une période de 18 ans (49 500 m³) entraînent peu d'effets sur la dynamique sédimentaire du cours d'eau. Ce volume est en effet relativement faible, compte tenu des extractions qui y ont lieu (en moyenne entre 60 000 et 79 000 m³/an, selon les estimations). Quant à la réinjection qui a eu lieu sur le Buëch en 2016 en aval du barrage de Saint-Sauveur (43 500 m³), elle correspond à 2 fois la capacité annuelle de charriage. Le suivi entrepris par Brousse *et al.* (2019) a mis en évidence des effets positifs sur les conditions hydromorphologiques dans le secteur pavé, sans pour autant avoir entraîné de déplacement majeur du chenal principal. De plus, un retour au déficit sédimentaire à court terme semble s'y opérer, ce qui ouvre de nouvelles réflexions sur la stratégie de gestion alluviale. A l'inverse, sur le Drac, la reconstitution du matelas alluvial par l'injection de 355 000 m³ de sédiments grossiers (~ 4 fois la capacité annuelle de charriage) a permis de stopper l'incision et d'initier un retour au tressage (Brousse *et al.*, 2021). Les ajustements morphologiques semblent avoir permis une intensification du tressage et une diversification des habitats, bien que le recul temporel demeure encore limité (notamment en l'absence de suivi associé à des crues de forte intensité). Enfin, dans un contexte de cours d'eau de faible énergie, affluents de la Meuse en Wallonie (Belgique), plusieurs projets de restauration ont montré des résultats positifs à court terme pour des réinjections impliquant des volumes compris entre 2 et 5 fois la capacité annuelle de charriage (Peeters *et al.*, 2021). Toutefois, en raison de la faible mobilité de la charge de fond, voire de son absence dans certains cas, plusieurs de ces actions de réinjection ont été impactées par le colmatage des sédiments fins dans la matrice caillouteuse.

2.2.2 Granulométrie à réinjecter

La granulométrie des matériaux à injecter dépend des objectifs de l'opération de restauration (Tableau 4). A ce titre, il faut distinguer i) la réinjection sédimentaire qui vise à redynamiser un tronçon de cours d'eau, de ii) la recharge sédimentaire dont l'objectif est de reconstituer un matelas alluvial stable dans le temps. Dans le cas d'une réinjection sédimentaire, la taille des matériaux doit correspondre à la compétence du cours d'eau en aval du barrage (Bunte, 2004). Un surdimensionnement des particules entraînera une absence de mobilité, ce qui favorise le colmatage du compartiment interstitiel (*e.g.*, Pulg *et al.*, 2013 ; Peeters *et al.*, 2021). Un sous dimensionnement aura pour effet que les matériaux injectés soient rapidement dispersés vers l'aval (*e.g.*, Barlaup *et al.*, 2008 ; Hauer *et al.*, 2013). Dans l'idéal, les particules

grossières (~D84) des sédiments réinjectés doivent pouvoir être remobilisées annuellement ou pour la crue bisannuelle (Trush *et al.*, 2000).

Tableau 4. Recommandations sur la granulométrie à utiliser en fonction des objectifs de restauration

	Recharge sédimentaire	Réinjection sédimentaire
Objectif	Reconstitution d'un matelas alluvial stable	Redynamisation hydro-sédimentaire d'un tronçon
Fréquence de mobilisation des matériaux	Faible	Selon la fréquence des crues (tous les 1 à 3 ans)
Taille préconisée	Légèrement plus grossier par rapport à la compétence du cours d'eau $D_{50 \text{ injecté}} = D_{60 \text{ surf}} ?$ $D_{84 \text{ injecté}} = D_{90 \text{ surf}} ?$	Similaire à la compétence du cours d'eau $D_{50 \text{ injecté}} = D_{50 \text{ surf}}$ $D_{84 \text{ injecté}} = D_{84 \text{ surf}}$

Dans le cas des réinjections sédimentaires effectuées sur le Rhône, le suivi par traçage sédimentaire RFID de l'OSR a montré que toutes les classes granulométriques marquées étaient mobiles (Peeters *et al.*, 2024). Il faut toutefois préciser que, dans certains cas, les classes granulométriques des particules marquées ne couvrent pas l'ensemble du cortège granulométrique des sédiments réinjectés. D'un côté, la technologie RFID ne permet pas d'équiper des particules de faible diamètre (limite variable en fonction du type et de la taille de traceurs utilisés ; Liébault *et al.*, 2023) et, de l'autre, il est difficile d'équiper les plus grosses particules pour des raisons pratiques. Quoi qu'il en soit, cette analyse approfondie a montré un effet de la taille des particules sur les distances de transport pour deux sites (Jons et PDR_SC) et une absence d'un effet de la taille pour trois sites (CHA, PDR_GA et DZM). Ici aussi, l'absence de traceurs de grande taille (> 80 mm) pour certains sites (notamment PDR_GA) ne permet probablement pas de déterminer un éventuel effet de taille sur les distances de transport.

Dans le cas des réinjections du Rhône, la granulométrie des matériaux utilisés est généralement inférieure à la granulométrie du lit pavé où ils sont disposés ; ces matériaux provenant généralement de sites restaurés (*i.e.*, déblai de lône réhabilitée, de casiers démantelés) ou de secteurs marqués par une accumulation de sédiments (*i.e.*, sédiments curés dans les retenues de barrage ou dans des secteurs limitrophes du Rhône et de ses affluents). Par exemple, dans le cas du Vieux-Rhône de Chautagne, dont le lit est en cours de pavage, les matériaux réinjectés proviennent en partie de la retenue de Seyssel et en partie d'opérations de dragage de la rivière des Ussets. Ils possèdent des indices granulométriques inférieurs à ceux du fond du Vieux-Rhône, en particulier pour les percentiles D16 et D50 (Tableau 5), bien que cette comparaison doive être faite avec précaution en raison des différences de techniques de prélèvement. Toujours est-il que l'utilisation de sédiments réinjectés de plus petites tailles que préconisés pourrait entraîner une réduction de la durée

efficace de la réinjection (en raison du vannage plus rapide vers l'aval). Lorsque c'est le cas (*i.e.*, les matériaux à injecter sont sous-dimensionnés par rapport à la compétence du cours d'eau), la solution serait alors de sélectionner un site de réinjection caractérisé localement par des conditions hydrauliques moins importantes (cf. §2.3.1).

Tableau 5. Le Vieux-Rhône de Chautagne : indices granulométriques du fond du lit et des matériaux réinjectés en 2016

Indices granulométriques	Fond du lit (mm) (éch. CHA-18-2012-08-22 prélevé à la drague ; Parrot, 2015)	Matériaux réinjectés (mm) (GeoPeka, 2018)
D16	22,2	0,9
D50	45,8	10,9
D84	71,1	49,5
D90	77,8	72,5

2.2.3 *Éléments de synthèse sur le volume et granulométrie des sédiments à réinjecter*

Compte tenu de l'hydraulicité du Rhône actuelle, la granulométrie des matériaux injectés semble appropriée car ils transitent à des vitesses de l'ordre de 200 m/an en moyenne. Même si ces vitesses sont inférieures à celle du secteur dynamique (700 m/an dans le canal de Miribel), elles ne sont pas trop rapides et les sédiments réinjectés ne devraient pas atteindre les retenues des barrages aval avant plusieurs décennies. L'enjeu est aussi de déterminer dans quelle mesure les habitats reconstitués vont être soumis au processus de colmatage sur le moyen et le long terme. A ce stade, le suivi du remplissage du compartiment interstitiel sur le radier reconstitué dans le Vieux-Rhône de PDR montre une part de sédiments fins relativement stable dans le temps (entre 3 et 13 % durant une période de 2,5 ans ; d'après Berthier-Laumond *et al.*, 2024).

Par contre, le niveau actuel de réinjection est assez en deçà des niveaux attendus pour modifier les conditions d'habitats. En effet, en se basant sur les volumes théoriques à réinjecter annuellement (*i.e.*, en fonction de la capacité annuelle de charriage), il serait souhaitable de répéter les opérations de réinjection sur les Vieux-Rhône étudiés pour avoir potentiellement un effet bénéfique sur le fond du lit et palier aux exports progressifs.

2.3 Localisation des sites de réinjection et répartition longitudinale des sédiments injectés

Comme pour les critères granulométriques, le choix des sites de réinjection dépend des objectifs du projet de restauration : dans le cas d'une recharge sédimentaire, les sites susceptibles d'entraîner une faible mobilité, tels que des radiers déjà présents, seront privilégiés, l'objectif étant que les habitats recréés soient immédiatement fonctionnels (Bunte, 2024). En revanche, dans le cas d'une réinjection sédimentaire, comme les sédiments doivent être remobilisés à court terme pour former des habitats en aval, il convient de privilégier des sites soumis à des contraintes hydrauliques locales importantes. A ce titre, les trois réinjections sédimentaires opérées sur le Rhône et étudiées dans le cadre de l'action C3 de l'OSR6 sont détaillée ci-dessous.

2.3.1 En fonction des contraintes hydrauliques locales : cas du Vieux-Rhône de CHA

Dans le cas du Vieux-Rhône de Chautagne, la réinjection a eu lieu 350 m en aval du barrage de Motz, soit sur un secteur où la pente et les contraintes de cisaillement sont localement faibles ($\sim 0,3 \text{ ‰}$ et $\sim 10 \text{ N/m}^2$, respectivement, pour le débit correspondant au P99.5 du modèle MAGE ; Dugué *et al.*, 2016 ; Figure 2). Il en résulte que la propagation en aval des sédiments réinjectés est relativement limitée, et ce malgré un sous-dimensionnement des matériaux injectés (cf. §2.2.1). Grâce au suivi de traceurs sédimentaires RFID sur une période de 6 ans (Figure 2) et au modèle MAGE, la propagation du panache sédimentaire de la réinjection a pu être modélisée (Figure 3). Il apparaît que, 50 ans après la réinjection, $5\,500 \text{ m}^3$ devraient toujours être présents sur le site d'injection et que les $9\,500 \text{ m}^3$ restants devraient être dispersés, principalement dans le premier kilomètre en aval de la réinjection.

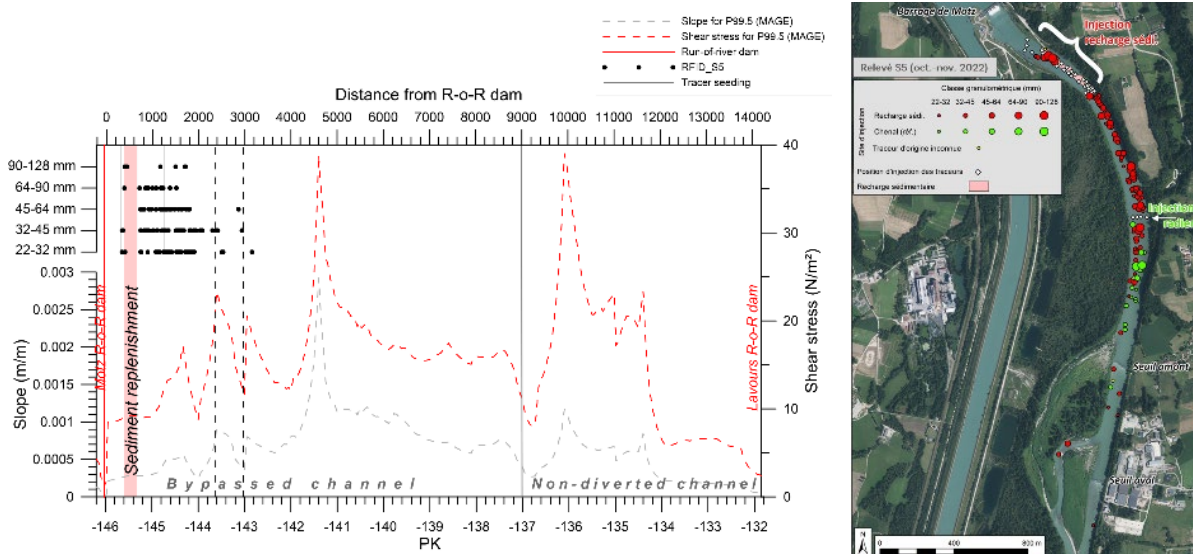


Figure 2. Réinjection sédimentaire de CHA : évolution longitudinale des contraintes de cisaillement et localisation des traceurs RFID en fonction de leur taille pour le relevé S5 (octobre-novembre 2022).

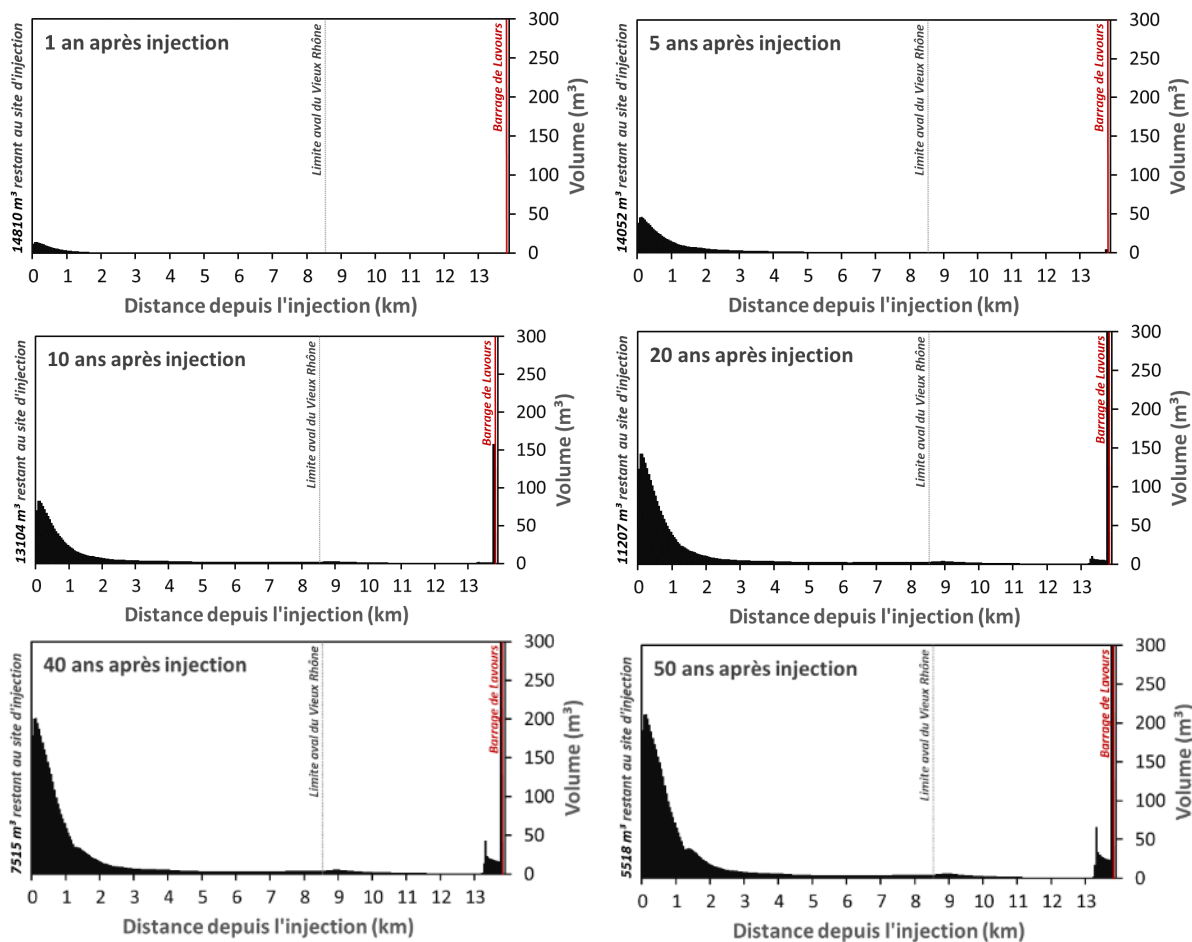


Figure 3. Réinjection sédimentaire de CHA : répartition longitudinale du volume de sédiment depuis le site de réinjection sédimentaire (= 0 km) après 1 an, 5 ans, 10 ans, 20 ans, 40 ans et 50 ans.

2.3.2 En fonction des formes fluviales situées directement en aval du site de réinjection : cas des Vieux-Rhône de DZM et de PDR

Dans le Vieux-Rhône de Donzère-Mondragon, le dernier relevé (S5, en mars-juin 2023) des traceurs RFID montre qu'une grande partie des sédiments réinjectés (62/164 traceurs, soit 38 %) occupe le grand banc latéral de la rive droite, situé entre 550 et 1150 m en aval de la dernière ligne d'injection des RFID. Comme ce banc n'a pas été prospecté lors des précédents relevés, il n'est pas possible de comparer la vitesse des traceurs qui s'y trouvent avec celle des autres traceurs.

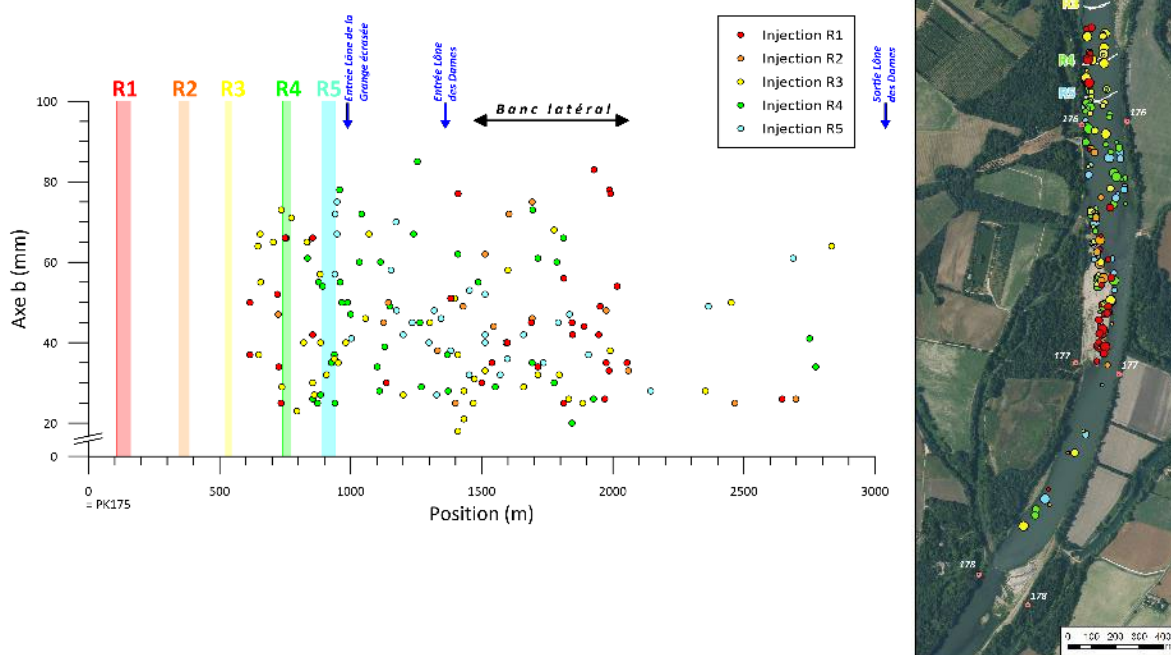


Figure 4. Réinjection sédimentaire de DZM : Position et taille (axe b) des traceurs pour le relevé S5 (avril-juin 2023).

Dans le cas de la réinjection sédimentaire de la Platière sur le Vieux-Rhône de Péage-de-Roussillon, le dernier relevé des traceurs RFID (S3, en mai 2022) indique aussi que 47 % des sédiments réinjectés sont localisés sur le grand banc de convexité de la rive gauche, qui se trouve directement à l'aval de la réinjection (elle-même positionnée sur le premier tiers gauche du chenal). Dans ce cas-ci, le calcul des vitesses virtuelles moyennes par forme a été possible (Tableau 6). Il ressort que la vitesse virtuelle moyenne de transport des traceurs détectés sur le banc (0,06 m/h) est près de quatre fois plus faible que celle des traceurs restés dans le thalweg principal (0,23 m/h).

Ces deux études de cas montrent qu'une grande part des sédiments réinjectés pourraient ne pas contribuer à la redynamisation sédimentaire du chenal en eau, ni à l'amélioration des habitats benthiques, et rester stocker durablement sur les bancs. Ceci semble se confirmer dans le cas de PDR où les vitesses virtuelles sont sensiblement plus faibles. Ça reste par contre à confirmer sur DZM où le banc est plus axial et pourrait ne stocker que plus transitoirement la charge en transit. La charge contribue ainsi à l'engraissement des bancs, ce qui pourrait être favorable à une diversité spécifique des communautés végétales de ces bancs (Janssen *et al.*, 2023).

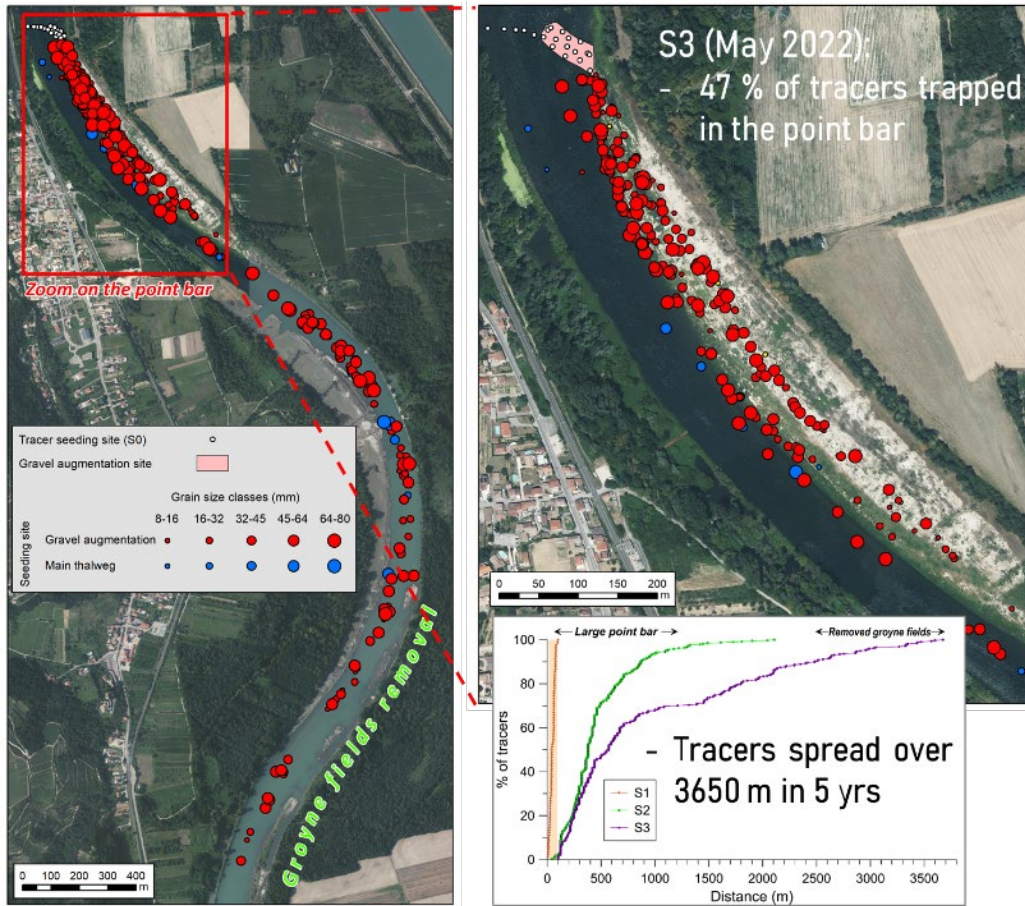


Figure 5. Réinjection sédimentaire de la Platière sur le Vieux-Rhône de PDR : localisation des traceurs pour le relevé S3 (à gauche), zoom sur le banc amont (en haut à droite) et courbe cumulative des traceurs en fonction de leur distance à l'injection (en bas à droite)

Tableau 6. Vieux Rhône de PDR : comparaison des distances et des vitesses virtuelles de transport pour les différentes unités fluviales du chenal

	Total (thalweg principal + banc)	Thalweg principal	Banc	Marge (casiers démantelés)
Durée période suivie (an)	5,1	5,1	5,1	3
Temps $Q > Q_c$ (h)	6012	6012	6012	3603
Q_{max} période suivie (m^3/s)	3021	3021	3021	2828
Nombre de traceurs retrouvés	317	169	148	509
Nombre de traceurs mobilisés	317	169	148	244
% de mobilisation	100	100	100	48
Distance moyenne sur la période suivie (S3 vs. S0) (m)	915	1395	373	41
Vitesse virtuelle moyenne (m/h)	0,15	0,23	0,06	0,01
Distance max. sur la période suivie (m)	3652	3652	966	475
Vitesse max. (m/an)	0,61	0,61	0,16	0,13



Dans le cas du Vieux-Rhône de Péage-de-Roussillon, l'action de réinjection sédimentaire a été couplée avec un démantèlement des casiers Girardon situés 2,2 km en aval. Par ce travail de désartificialisation, un linéaire de 1 200 m de berge est à nouveau exposé aux processus d'érosion, ce qui a pour effet de fournir des galets/graviers au Vieux-Rhône (réinjection sédimentaire indirecte). Les sédiments remobilisés depuis les sites de démantèlement des casiers possèdent des vitesses virtuelles beaucoup plus faibles (0,01 m/h) que celles des sédiments du chenal principal (0,15 m/h) en raison des contraintes hydrauliques locales auxquelles ils sont soumis (chenal secondaire délimité par la berge réhabilitée et le cordon d'îlots issus des anciens casiers).

Ces deux actions de restauration se sont avérées être complémentaires car la partie amont du secteur des casiers a pu bénéficier d'un apport de galets issus de la recharge sédimentaire réalisée 2,2 km en amont. Du fait de la surlargeur associée au démantèlement des casiers, les contraintes de cisaillement sont diminuées tout au long de ce secteur, ce qui favorise les processus d'alluvionnement des sédiments provenant de l'amont. Ainsi, ces galets/graviers se sont déposés dans le chenal secondaire sous la forme d'un banc alluvial (accolé à l'îlot) qui se prolonge par un radier qui fournit un habitat potentiellement attractif pour la faune aquatique (substrat et vitesses potentiellement propices aux invertébrés et aux poissons lithophiles ; Figure 6). Par ailleurs, la restauration de la dynamique sédimentaire a permis de diversifier les habitats aquatiques et de les améliorer localement. Ceci souligne la complémentarité de ces deux actions de restauration.



Figure 6. Réinjection sédimentaire de la Platière sur le Vieux-Rhône de PDR : bras secondaire réhabilité dans la partie amont du secteur de démantèlement des casiers 5 ans après travaux (vue vers l'aval, 1/03/2022)

2.3.3 Éléments de synthèse sur la localisation des sites de réinjection

Les résultats issus de ces études de cas sur le Rhône peuvent être recoupsés avec des retours d'expérience issus de la littérature. Ainsi, le rôle de bancs agissant comme sites de stockage piégeant les particules pour plusieurs décennies a été mis en évidence dans la basse vallée de l'Ain par Rollet (2007) et plus récemment par Arnaud *et al.* (2023). Des traceurs déployés sur un banc de convexité n'ont pas été redistribués dans le chenal lors des événements de crue, mais ont été piégés sur le banc qui s'est végétalisé ; à l'inverse de traceurs déployés sur une berge concave en voie d'érosion (Piégay *et al.*, 2016). Par ailleurs, Chardon *et al.* (2021) ont également démontré l'utilité de caractériser les contraintes hydrauliques locales pour sélectionner les sites d'injection. Dans leur étude sur le Haut-Rhin, ils préconisent également de coupler les opérations de réinjection sédimentaire avec des opérations d'élargissement en aval afin de favoriser la création d'habitats lithophiles et augmenter leur durée de vie.

Ces résultats montrent qu'il est crucial de bien définir les objectifs du projet et de sélectionner les sites de réinjection avant la phase de travaux à proprement parler. Il s'agit notamment de prévoir la formation et la pérennisation de nouveaux habitats benthiques et rivulaires. Il est ainsi important de bien connaître la variété des conditions hydrauliques au sein du chenal afin de pouvoir évaluer la distribution des sédiments injectés. Si le chenal dispose d'une hydraulicité assez uniforme, le sédiment va rapidement se disperser vers l'aval et sans doute contribuer modérément à la diversification des habitats, imposant sans doute un effort d'injection plus important que dans le cas de chenaux aux conditions hydrauliques plus contrastées. Si un banc est localisé à l'aval de la zone d'injection ou une zone de sur-élargissement résultant par exemple d'un démantèlement des casiers, une partie de l'injection va être localement stockée et contribuer à la diversification des habitats. Dans ce cas, peut-être que des injections annuelles en deçà de la capacité annuelle de charriage peuvent déjà contribuer significativement à une diversification des conditions granulométriques des habitats. Dans l'OSR7, la mise en œuvre de l'action C2 sous l'impulsion de la CNR (bourse CIFRE en cours), couplée au travail de suivi engagé ici, devrait sans doute permettre d'avancer sur cette question qui est cruciale pour définir le périmètre optimal des réinjections.

Pour prévoir la formation de ces nouveaux habitats benthiques et rivulaires, plusieurs outils peuvent être mobilisés. Le calcul de contraintes de cisaillement par profil en travers fournit déjà une première information sur l'évolution longitudinale des contraintes hydrauliques (*e.g.*, modèle MAGE 1D ; Dugué *et al.*, 2016). Bien qu'ils nécessitent de longs suivis, les traçages sédimentaires fournissent également une aide à la sélection des sites de réinjection. Le couplage de ces deux données constitue encore un meilleur outil, comme la modélisation hydro-sédimentaire développée dans l'OSR (Vázquez-Tarrío *et al.*, 2023). En complément des traçages sédimentaires, l'utilisation des géophones peut également faciliter l'évaluation de la mobilité à une échelle plus locale. Enfin, une étude fine de la diversification des granulométries et des profondeurs est également nécessaire pour maintenant caractériser les changements morfo-sédimentaires résultant des injections.

3. Indicateurs de succès en termes de réponse écologique potentielle et de durabilité

Pour rappel, l'évaluation de l'efficacité et de la pérennité des opérations de réinjection sédimentaire (directe ou indirecte) repose sur des indicateurs biotiques (*cf.* programme RhônEco) et abiotiques. Ces derniers concernent principalement (i) l'évaluation de la restauration de la dynamique sédimentaire, et (ii) l'évaluation de la qualité des habitats benthiques et hyporhéiques.

3.1.1 *Evaluation de la restauration de la dynamique sédimentaire*

Evaluer la restauration de la dynamique sédimentaire d'opérations de réinjection revient, non seulement à caractériser la mobilité des sédiments réinjectés, mais également à évaluer la réponse écologique de ces opérations en termes de création et de diversification des habitats aquatiques sur le secteur restauré.

Evaluation de la mobilité des sédiments réinjectés

Les indicateurs de succès qui permettent de caractériser la bonne mobilité des sédiments réinjectés, leur propagation vers l'aval et leur disparition progressive sur le site d'injection reposent (i) sur l'utilisation de traceurs sédimentaires et de géophones, et (ii) sur la comparaison diachronique de relevés topo-bathymétriques. Dans le cas du Rhône, les traçages sédimentaires RFID ont permis de quantifier les vitesses de transfert du panache sédimentaire et de les comparer avec des secteurs de référence (afin de vérifier la bonne mobilité des différentes fractions granulométriques). De plus, la dispersion des sédiments réinjectés et leur fragmentation en zones préférentielles de dépôt ont été caractérisées, comme l'illustre l'exemple de la Figure 7 sur le Vieux-Rhône de Péage-de-Roussillon. Les courbes cumulatives des différents relevés permettent d'identifier les zones d'accumulation des traceurs (les modes dans la dispersion), comme sur le grand banc de convexité situé immédiatement en aval du site d'injection. En outre, l'utilisation des traceurs sédimentaires permet de caractériser la pérennité des habitats reconstitués (vitesses de transfert, temps de résidence de la charge introduite dans le RCC).

A ce stade, l'utilisation des géophones fournit un proxy du flux sédimentaire qui rend possible l'identification du charriage pour un débit donné en un point donné, ce qui permet l'identification de la valeur seuil de débit de mise en mouvement des particules. Lorsqu'ils seront calibrés sur la base des résultats des traçages sédimentaires RFID, ils permettront également de quantifier la dynamique de charriage (*i.e.*, estimation des flux charriés et de leur variabilité dans le temps) et de détecter le moment où un nouveau déficit de transport est observé, nécessitant de nouvelles injections.

Bien que cela n'ait pas été réalisé dans le cadre de l'axe C du programme OSR6, il serait intéressant de coupler les relevés RFID/géophone avec une analyse diachronique des relevés topo-bathymétriques et sédimentaires. Ces derniers permettraient d'identifier et de

quantifier les changements morphologiques qui se sont opérés à la suite de la réinjection sédimentaire, comme cela a pu être réalisé dans d'autres études (notamment sur le Haut-Rhin ; Chardon *et al.*, 2021). C'est l'objet de l'action C2 de l'OSR7 qui est en cours de montage dans un cadre contractuel spécifique (bourse CIFRE). Cette action est effectivement aujourd'hui nécessaire.

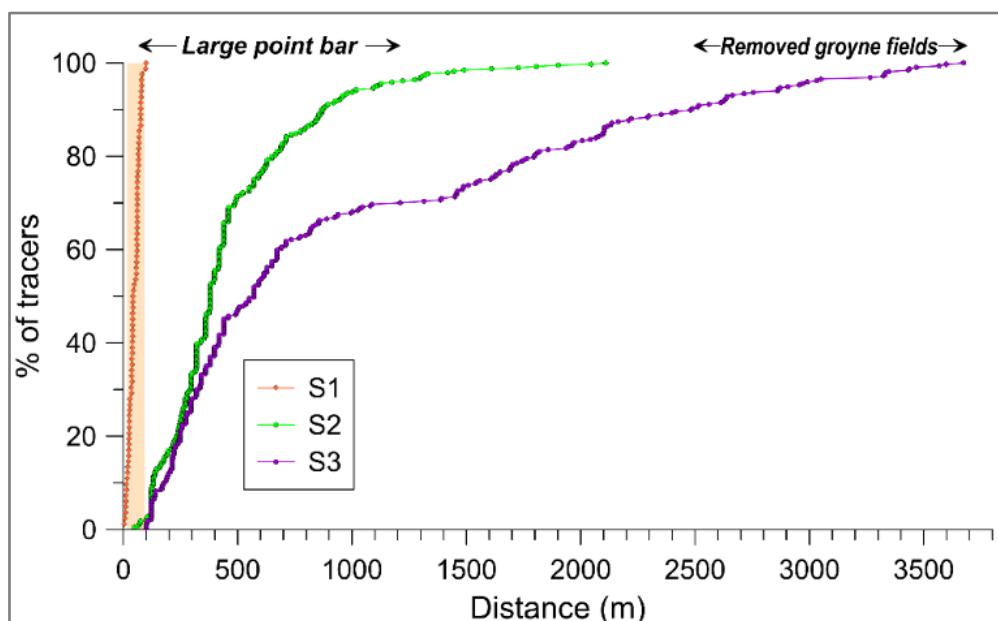


Figure 7. Réinjection sédimentaire de la Platière sur le Vieux-Rhône de PDR : courbes cumulatives des trois relevés RFID permettant d'identifier les secteurs d'accumulation des sédiments réinjectés (composante longitudinale uniquement)

Evaluation de la diversification des habitats aquatiques

L'évaluation de la diversification des habitats aquatiques post-réinjection n'a pas été réalisée dans le cadre du programme OSR6. Il s'agit pourtant d'un volet complémentaire à l'évaluation de la dynamique sédimentaire, qui sert de base objective à l'évaluation de nombreux projets de restauration écologique. Parmi les indicateurs de succès utilisés pour caractériser la diversification des habitats (Bunte, 2004), on retiendra :

- la quantification des changements morphologiques du lit (*e.g.*, incision/aggradation du lit, formation/engraissement de banc, érosion de berge, élargissement) sur la base des relevés topo-bathymétriques (*e.g.*, Chardon *et al.*, 2021) ;
- la qualité de l'eau et la température (*e.g.*, Marteau *et al.*, 2022) ;
- le calcul d'indices de diversité hydro-morphologique pour évaluer l'hétérogénéité des méso-habitats du secteur étudié. Par exemple, Gostner *et al.* (2013) ont développé le HMDI (*hydro-morphological index of diversity*), qui est calculé comme le produit des diversités partielles de deux variables hydrauliques : la vitesse d'écoulement et la profondeur de l'eau. De même, sur la base de ces deux paramètres et du D50 du fond du lit, Staentzel *et al.*, (2019) ont proposé un autre indice (EHMID, *Eco-hydro-morphological index of diversity*) qui a été appliqué avec succès sur le Vieux-Rhin.

3.1.2 Evaluation de la qualité des habitats benthiques et hyporhéiques

L'évaluation de la qualité des habitats benthiques et hyporhéiques se fait à l'échelle de la forme fluviale. L'état du fond caillouteux est généralement apprécié au travers du degré de comblement interstitiel de la matrice caillouteuse.

Les techniques utilisées pour décrire le comblement interstitiel des cours d'eau sont généralement des méthodes directes ou indirectes de mesure ou d'estimation du pourcentage de sédiments fins (Descloux *et al.*, 2010 ; Peeters *et al.*, 2021). Certaines de ces techniques se basent sur l'évaluation de la composition granulométrique de la zone hyporhéique pour caractériser le comblement interstitiel. C'est notamment le cas de la technique qui a été utilisée dans le cadre de l'action C.1 du programme OSR6 (Berthier-Laumond *et al.*, 2024). Elle consiste à prélever un échantillon de la surface et de la subsurface à l'aide d'un échantillonneur cylindrique (McNeil et Ahnell, 1964) qui est enfoncé dans le lit caillouteux du cours d'eau. Après analyses granulométriques, l'état morphologique de la forme échantillonnée peut être caractérisé en termes de colmatage (*e.g.*, part de fines < 2 mm, nature des fines).

Dans ce cadre, le jeu de données acquis sur 10 stations durant 10 campagnes de prélèvement conduites sur 2,5 ans a permis de formuler plusieurs constats. Le premier constat est que la variabilité de la distribution granulométrique intra-stationnelle (au sein d'une même station) est inférieure à la variabilité inter-stationnelle (entre les stations). Ceci est bien illustré par la comparaison des deux stations étudiées sur le Rhône amont (Figure 8) : le Vieux-Rhône de Chautagne (station dynamique en cours de pavage, avec un pourcentage de fine compris entre 7 et 16 %) et le Vieux-Rhône de Belley (station pavée, avec un pourcentage de fine compris entre 15 et 23 %). Le second constat est que la part de fines répond à des caractéristiques locales des radiers (granulométrie et vitesse) et à un gradient longitudinal (probablement en lien avec les apports des affluents du Rhône). Aussi, lorsque le Rhône est découpé en secteurs ("Rhône amont", "Rhône médian" et "Rhône aval"), il apparaît que la part de fine évolue de façon décroissante entre les stations pavées, les stations avec une réinjection sédimentaire, la station dynamique en cours de pavage et les stations de référence. La faible mobilité du fond a ainsi un effet bien réel sur le risque de comblement interstitiel.

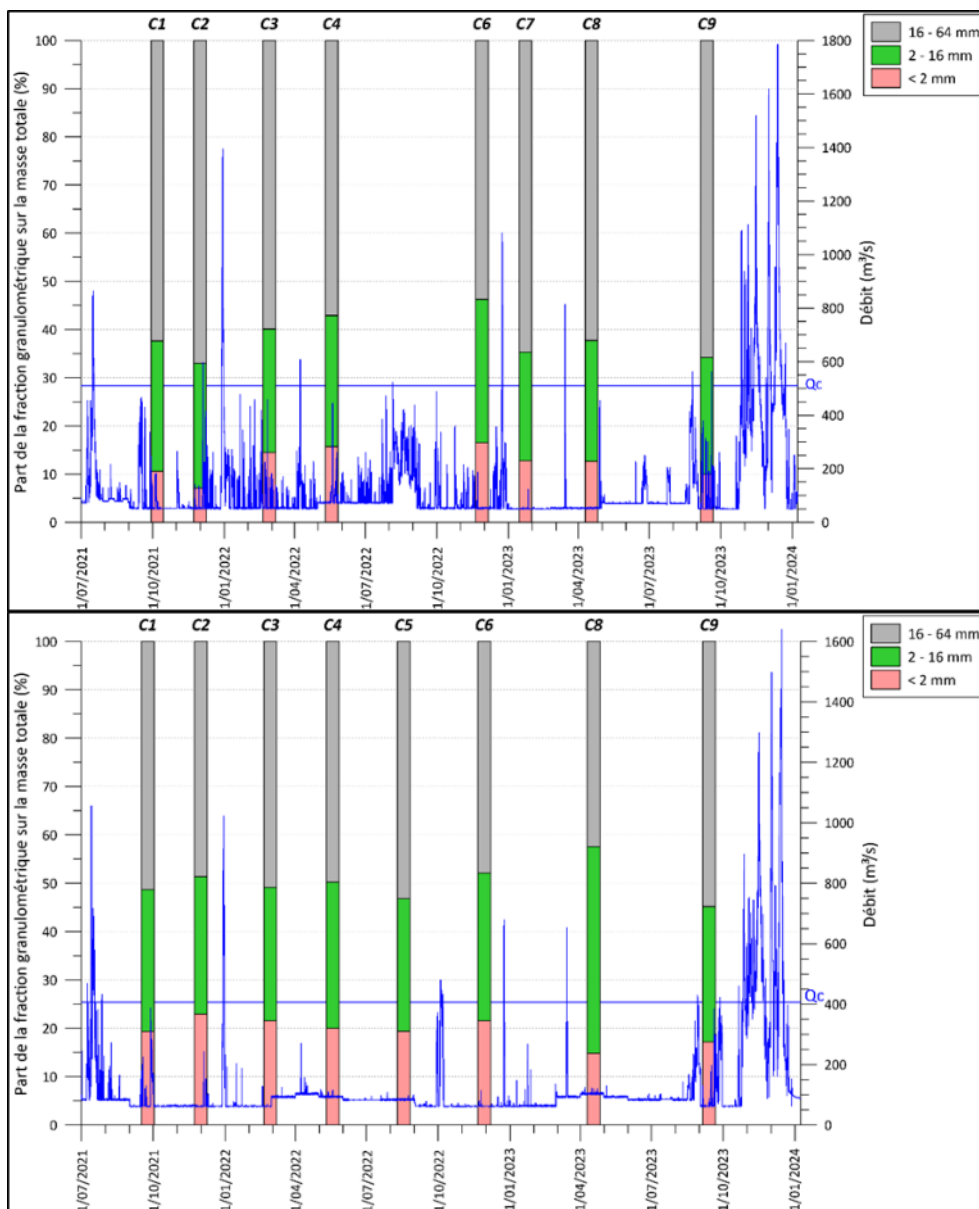


Figure 8. Comparaison du pourcentage de sédiments fins (en rouge sur les histogrammes) des échantillons prélevés sur les Vieux-Rhône de Chautagne (en haut) et de Belley (en bas)

4. Conclusions et recommandations générales

En s'appuyant sur les résultats des actions C.1 à C.3 du programme OSR6, ce rapport a permis (i) de mettre en lumière les retours d'expérience des opérations de réinjection sédimentaire menées sur le Rhône, et (ii) de formuler des recommandations opérationnelles pour la mise en œuvre des futures opérations de restauration.

Il en ressort que les sédiments injectés possèdent une bonne mobilité (du moins pour les fractions granulométriques suivies par traçage sédimentaire) et ce, pour l'ensemble des sites qui ont fait l'objet d'une réinjection sédimentaire. Les RCC vont pouvoir bénéficier des effets bénéfiques des opérations de réinjection pendant plusieurs décennies. Toutefois, le retour d'expérience pour le Vieux-Rhône de Chautagne montre que la mobilisation des galets/graviers n'est pas toujours optimale en raison des conditions hydrauliques sur le site d'injection (*i.e.*, faibles contraintes de cisaillement). Ceci souligne qu'il faut porter une plus grande attention aux conditions hydrauliques d'injection en lien avec les granulométries injectées si l'on envisage une diffusion de la charge injectée. Aussi, l'analyse de la mobilité des sédiments réinjectés a montré, pour chaque site, que le panache sédimentaire initial se disperse de manière complexe, en se fragmentant en plusieurs zones de dépôt préférentiel (*e.g.*, nouveaux radiers, radiers existants, bancs alluviaux), ce qui est favorable à la diversification des habitats terrestres et aquatiques. Les prochains suivis permettront de voir si ces dépôts se pérennisent (sans doute le cas des bancs de convexité) ou s'ils transitent simplement plus lentement.

En ce qui concerne les volumes réinjectés, ils correspondent dans l'ensemble à la capacité annuelle de charriage du Vieux-Rhône concerné, ce qui semble être suffisant dans un premier temps pour restaurer une dynamique sédimentaire. Toutefois, en fonction des vitesses de mobilisation des matériaux injectés (100 à 200 m par an *a priori*), de nouvelles réinjections s'avèrent être localement nécessaires. En effet, les retours d'expérience issus de la littérature indiquent que le volume de sédiments à réinjecter annuellement doit correspondre à la capacité annuelle de charriage pour pouvoir atteindre les objectifs d'amélioration de la dynamique sédimentaire et de diversification des habitats aquatiques sur un continuum fluvial. Or, les réinjections effectuées dans les Vieux-Rhône n'ont jusqu'à présent été réalisées qu'à une seule reprise. En termes de recommandations pour de futurs projets, il apparaît donc nécessaire de questionner la fréquence des réinjections ou le volume de la première réinjection qui pourrait être plus important (2-5 fois la capacité annuelle de charriage), si cela ne pose pas de problème en termes de risque d'inondation (augmentation inhérente de la ligne d'eau) et que les conditions opérationnelles (coût, bilan carbone des travaux) le permettent. Les suivis programmés dans OSR7 devraient nous apporter des informations importantes pour évaluer les temps de résidence et les vitesses de dispersion, et mieux évaluer potentiellement les volumes nécessaires. Peut-être que des injections même inférieures à la capacité de transport pourraient significativement favoriser une diversification durable des conditions d'habitat.

Les retours d'expériences en termes de localisation des sites de réinjections et de quantités injectées montrent qu'il est nécessaire de bien définir les objectifs des opérations de réinjection et de bien connaître les conditions hydrauliques avant d'engager les travaux. Si les conditions hydrauliques sont diversifiées, la charge injectée peut se déposer dans des zones préférentielles et contribuer plus modérément à la recharge du chenal. Dans ce cadre, les

injections devront peut-être être plus fréquentes ou aller au-delà de la capacité de transport annuelle. En revanche elle contribuera à une diversification des conditions d'habitat qu'il convient aujourd'hui de caractériser. Coupler injection (amont) et élargissement (aval) via la redynamisation des marges est ainsi une bonne stratégie pour maximiser la diversification des conditions d'habitat.

Enfin, il ressort de cette analyse que l'opération de réinjection sédimentaire indirecte de Péage-de-Roussillon (*i.e.*, démantèlement des casiers pour favoriser l'érosion de la berge) présente un résultat mitigé en termes de contribution sédimentaire. L'érosion de la berge semble pour le moment assez limitée. Elle contribue donc peu à la recharge du Vieux-Rhône en galets/graviers. De plus, les sédiments qui y transitent enregistrent de faibles vitesses de transport en raison des conditions hydrauliques locales (chenal secondaire délimité par le pied de la berge et le cordon d'îlots). Le suivi par traçage RFID indique que les sédiments issus de l'érosion de la berge n'ont pas encore atteint le chenal principal du Vieux-Rhône, ces sédiments ayant tendance à rester dans le chenal secondaire et à s'accumuler dans sa partie terminale. Quoi qu'il en soit, ce chenal secondaire présente une belle diversité de conditions hydraulique et sédimentaire.

Les deux actions de restauration menées sur le Vieux-Rhône de Péage-de-Roussillon se sont avérées être complémentaires. Du fait de la surlargeur associée au démantèlement des casiers, les contraintes hydrauliques y sont localement plus faibles, ce qui favorise les processus d'alluvionnement des sédiments provenant de l'amont. Ainsi, la partie amont du secteur des casiers peut bénéficier d'un apport de galets issus de la recharge sédimentaire réalisée 2,2 km en amont. Il en résulte la formation d'un banc alluvial (accolé à l'îlot) qui se prolonge par un radier, ce qui fournit un habitat potentiellement attractif pour la faune aquatique. Qui plus est, à l'échelle du secteur, la restauration de la dynamique sédimentaire a permis de diversifier les habitats aquatiques et de les améliorer localement. Ceci souligne la complémentarité de ces deux actions de restauration. Reste maintenant à suivre ces habitats afin d'évaluer leur pérennité. Enfin, coupler ces résultats avec des suivis des communautés aquatiques et riveraines, tels que ceux prévus dans le programme RhônEco (programmation 2024-2028), permettrait d'évaluer la réponse biologique consécutive à l'amélioration des habitats.

5. Bibliographie

Arnaud F., Paquier A., Vázquez-Tarrío D., Camenen B., Le Coz J., Michel K., Naudet G., Pella H., Piégay H. (2023). Comparing field, probabilistic, and 2D numerical approaches to assess gravel mobility in a gravel-bed river. *Water Resources Research*, 59, e2022WR034127. doi.org/10.1029/2022WR034127

Arnaud F., Piégay H., Béal D., Collery P., Vaudor L., Rollet A.J. (2017). Monitoring gravel augmentation in a large regulated river and implications for process-based restoration. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42, 2147-2166. <https://doi.org/10.1002/esp.4161>

Barlaup B.T., Gabrielsen S.E., Skoglund H., Wiers T. (2008). Addition of spawning gravel - A means to restore spawning habitat of Atlantic Salmon (*Salmo salar* L.), and anadromous and resident brown trout (*Salmo Trutta* L.) in regulated rivers. *River Research and Applications*, 24, 543-550.

Berthier-Laumond S., Peeters A., Nedelec R., Sirven D., Barra, A., Tissot N., Parmentier, H., Navratil, O., Geffray, A., Camenen, B., Bonnefoy, A., et Masquelier, F., Piégay, H. (2024). *Évaluation de l'état des habitats benthiques du Rhône. Campagnes de terrain sur les 10 stations réparties sur le Rhône. Rapport scientifique. Observatoire des Sédiments du Rhône – 6^{ème} programme d'action. p. 60*

Brousse G., Arnaud-Fassetta G., Liébault F., Bertrand M., Melun G., Loire R., Malavoi J.R., Fantino G., Borgniet L. (2019). Channel response to sediment replenishment in a large gravel-bed river: The case of the Saint-Sauveur dam in the Buëch River (Southern Alps, France). *River Research and Applications*, 36(6), 880-893.

Brousse G, Liébault F, Arnaud-Fassetta G, Breilh B, Tacon S. (2021). Gravel replenishment and active-channel widening for braided-river restoration: The case of the Upper Drac River (France). *Sci Total Environ.*, 766:142517. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142517

Bunte K., (2004). *Gravel mitigation and augmentation below hydroelectric dams: a geomorphological perspective*. State of the Science Review.

BURGEAP (2020). Stratégie de gestion sédimentaire du fleuve Rhône entre Genève et la Méditerranée. Etude réalisée par le groupement des bureaux d'études : BURGEAP (mandataire), GeoPeka, ACTEON, ARALEP et MOSAIQUE Environnement. 61 p.

Chardon V., Schmitt L., Arnaud F., Piégay H., Clutier A. (2021). Efficiency and sustainability of gravel augmentation to restore large regulated rivers: Insights from three experiments on the Rhine River (France/Germany). *Geomorphology*, 380:107639.

Descloux S., Datry T., Philippe M., Marmonier P. (2010). Comparison of different techniques to assess surface and subsurface streambed colmation with fine sediments. *International Review of Hydrobiology*, 95, 520-540.

Dugué V., Le Coz, J., Camenen, B. et Faure, J-B. (2016). Rapport OSR 4 sur le développement, le calage et l'amélioration du modèle hydro-sédimentaire 1D du Rhône du Lac Léman à la Mer Méditerranée, IRSTEA Lyon <https://hal.science/OSR/hal-02607085v1>

GeoPeka (2018). Suivi d'une injection sédimentaire : Vieux-Rhône de Chautagne. *Rapport de mesure*, version 3.2.

- Gostner W., Alp M., Schleiss A.J., Robinson C.T. (2013). The hydro-morphological index of diversity: a tool for describing habitat heterogeneity in river engineering projects. *Hydrobiologia*, 712 (1), 43–60. <https://doi.org/10.1007/s10750-012-1288-5>.
- Hauer C., Pulg U., Reisinger F., Flödl P. (2020). Evolution of artificial spawning sites for Atlantic salmon (*Salmo salar*) and sea trout (*Salmo trutta*): field studies and numerical modelling in Aurland, Norway. *Hydrobiologia*, 849, 1137-1158.
- Heckmann T., Haas F., Abel J., Rimböck A., Becht M. (2017) Feeding the hungry river: Fluvial morphodynamics and the entrainment of artificially inserted sediment at the dammed river Isar, Eastern Alps, Germany. *Geomorphology*, 291, 128-1442.
- Janssen P., Couloigner C., Piégay H., Evette A. (2023). The accumulation of anthropogenic stressors induces a progressive shift in the ecological preferences and morphological traits shared by riparian plant communities. *Freshwater Biology*, 00, 1–14. doi.org/10.1111/fwb.14169 [https://hal.science/OHM-VALLEE DU RHONE/hal-04276515v1](https://hal.science/OHM-VALLEE_DU_RHONE/hal-04276515v1)
- Lejot J., Piégay H., Hunter P.D., Moulin B., Gagnage M. (2011). Utilisation de la télédétection pour la caractérisation des corridors fluviaux : exemples d'applications et enjeux actuels. *Géomorphologie: Relief, Processus, Environnement*, 2, 157–172. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.9362>
- Liébault F., Piégay H., Cassel M., Arnaud, F. (2023). Bedload tracing with RFID tags in gravel-bed rivers: Review and meta-analysis after 20 years of field and laboratory experiments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 49(1), 147–169. DOI: 10.1002/esp.5704
- Marteau B., Michel K., Piégay H. (2022). Can gravel augmentation restore thermal functions in gravel-bed rivers? A need to assess success within a trajectory-based before–after control–impact framework. *Hydrological Processes*, 36(2), e14480. <https://doi.org/10.1002/hyp.14480>
- McNeil W.J., Ahnell W.H. (1964). Success of pink salmon spawning relative to size of spawning bed materials. U.S. Fish and Wildlife Service Special Scientific Report. *Fisheries* 469.
- Parrot, E. (2015). Analyse spatiale et temporelle de la morphologie du chenal du Rhône du Léman à la Méditerranée. Thèse doctorale, Aix-Marseille Univ., Aix-en-Provence, France.
- Peeters A., Cassel M., Navratil O., Vázquez-Tarrío D., Perret F., Bourjaillat B., Mouquet-Noppe C., Rey L., Nedelec R., Berthier-Laumond S., Michel K., Tissot N., Parmentier H., Piégay H., Mora C., Meric L., Falgon A., Bounous M. et Pont B. (2024). Suivis des enregistrements RFID et géophones. Synthèse des campagnes de terrain. Rapport final. Observatoire des Sédiments du Rhône - 6e programme d'action. 106p. <https://hal.science/OSR/hal-03750532>
- Peeters A., Houbrechts G., de le Court B., Hallot E., Van Campenhout J., Petit F. (2021). Suitability and sustainability of spawning gravel placement in degraded river reaches, Belgium. *Catena*, 201, 105217. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105217>
- Piégay H., Arnaud F., Cassel M., Dépret T., Alber A., Michel K., Rollet A.-J., Vaudor L. (2016). Suivi par RFID de la mobilité des galets : retour sur 10 ans d'expérience en grandes rivières. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 67, 79-91. <https://hal.science/OSR/hal-01402008v1>

Pulg U., Sternecker K., Trepl L., Unfer G. (2013). Restoration of spawning habitats of brown trout (*Salmo trutta*) in a regulated chalk stream. *River Research and Applications*, 182, 172-182.

Rollet A. J. (2007). Etude et gestion de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial à l'aval d'un barrage : le cas de la Basse Vallée de l'Ain. Thèse de doctorat. Université de Lyon 3.

Staentzel C., Combroux I., Barillier A., Grac C., Chanez E., Beisel J.N. (2019). Effects of a river restoration project along the Old Rhine River (France-Germany): Response of macroinvertebrate communities. *Ecol Eng*, 127, 114–124. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.10.024>

Tal M., Vázquez-Tarrío D., Dussouillez P., Piégay H., Camenen B., Ati A. (2018). *Evolutions morphodynamiques du chenal sur le long-terme. Rapport Final*. Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR), 4^{ème} Programme d'Actions <https://hal.science/OSR/hal-03588697v1>

Trush W.J., McBain S.M., Leopold L.B. (2000). Attributes of an alluvial river and their relation to water policy and management. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 97 (22): 11858-11863

Vázquez-Tarrío D., Cassel M., Piégay H., Depret T., Arnaud F., et al. (2021). *Suivi de l'effet morphologique du démantèlement des marges : validation des estimations de charriage par des observations in situ. Rapport Final*. Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR), 5^{ème} Programme d'Actions. <https://hal.science/OSR/hal-03291004/>

Vázquez-Tarrío D., Peeters A., Cassel M., Piégay H. (2023). Modelling coarse-sediment propagation following gravel augmentation: The case of the Rhône River at Péage-de-Roussillon (France). *Geomorphology*, 428, 108639. <https://hal.science/OSR/hal-04050145v1>



Observatoire des Sédiments du Rhône

Dispositifs scientifiques cadres



Partenaires scientifiques



Partenaires techniques et financiers

