

## Comparaison multi-site des distances de transport par charriage dans le Rhône par suivi RFID : retours d'expérience et recommandations opérationnelles pour la restauration des cours d'eau

### Multi-site comparison of gravel travel distance using RFID tracking in the Rhône River: feedback and operational recommendations for river restoration

Alexandre Peeters<sup>1</sup>, Daniel Vázquez-Tarrío<sup>2</sup>, Mathieu Cassel<sup>1</sup>, Christophe Mora<sup>3</sup>, Oldrich Navratil<sup>1</sup>, Hervé Piégay<sup>1</sup>

<sup>1</sup> University of Lyon, CNRS UMR 5600 EVS, alexandre.peeters@ens-lyon.fr

<sup>2</sup> Department of Geo-Hazards & Climate Change, IGME, CSIC, Madrid, Spain

<sup>3</sup> Compagnie nationale du Rhône, Direction de l'ingénierie et des grands projets, Lyon

#### RÉSUMÉ

Les activités humaines ont altéré les processus hydro-sédimentaires du Rhône, entraînant une perte des habitats et de la biodiversité. Pour limiter ces effets, des opérations de réinjection sédimentaire ont été mises en œuvre dans trois sections court-circuitées du Rhône. Une de ces opérations a été couplée avec le démantèlement des casiers Girardon afin de favoriser l'apport de galets par érosion de berge. L'efficacité de ces interventions a été évaluée en suivant la mobilité de ~4700 galets marqués (RFID), déployés sur cinq sites et suivis pendant 3-6 ans, selon les sites. L'analyse de leur position a permis d'identifier les facteurs qui influencent la mobilité des particules, à savoir l'intensité et la durée des crues, la taille des particules, la morphologie du chenal, la texture du lit et les conditions hydrauliques locales. Elle a montré que le transport par charriage était plus efficace dans les tronçons dynamiques que dans les tronçons pavés. Des recommandations opérationnelles ont été élaborées, notamment en termes de sélection des sites d'intervention, de granulométrie et de volume de sédiment à injecter. Les sites de réinjection doivent être sélectionnés en fonction des contraintes hydrauliques locales et des objectifs spécifiques du projet, qu'il s'agisse d'améliorer les habitats benthiques (i.e., en réapprovisionnant les radiers existants ou en créant de nouveaux radiers) ou les habitats riverains (i.e., en redynamisant les bancs de graviers pour favoriser la végétation pionnière et sa dynamique de rajeunissement). En outre, les projets de réinjection sédimentaire et de démantèlement des casiers se sont avérés être complémentaires.

#### ABSTRACT

Human activities have altered the hydro-sedimentary processes in the Rhône River, resulting in a loss of river habitats and biodiversity. To mitigate these physical effects, gravel augmentation operations were conducted in three bypassed channels of the Rhône River. One of these operations was combined with the removal of a groyne field to promote sediment supply through bank erosion. The effectiveness of these interventions was evaluated by tracking the mobility of the introduced gravels. Approximately 4700 tagged pebbles (RFID) were deployed at five sites, and their location surveyed 2-5 times over periods of 3-6 yrs, depending on the site.

The multi-site comparison enabled the identification of key factors influencing bedload transport, including the occurrence and intensity of floods, particle size, channel morphology, bed texture and local hydraulic conditions. It showed that bedload transport was more effective in dynamic reaches than in reaches with a paved bed. Operational recommendations for gravel augmentation projects were developed, focusing on site selection, appropriate grain sizes and sediment volumes for injection. Replenishment sites should be selected based on local shear stresses and the specific objectives of the project, whether aimed at improving benthic habitats (i.e., by replenishing existing riffles or creating new ones) or riparian habitats (i.e., by restoring gravel bar dynamics to promote pioneer vegetation). Gravel augmentation and groyne field removal were complementary.

#### MOTS CLÉS

Démantèlement des casiers, galet marqué, réinjection sédimentaire, RFID, Rhône

Gravel augmentation, groyne field removal, RFID, Rhône River, tagged pebble

## 1 CONTEXTE ET OBJECTIFS

Le fonctionnement hydro-sédimentaire du Rhône a été profondément perturbé par les aménagements mis en place dès la fin du 19<sup>e</sup> siècle (casiers de sédimentation Girardon, ouvrages liés à la production d'hydroélectricité, etc.), ce qui a provoqué des modifications hydromorphologiques majeures (e.g., incision, armurage du lit, déconnexion des bras secondaires) et, par conséquent, une dégradation des habitats et des communautés aquatiques du fleuve (Roux et al., 1989 ; Olivier et al., 2009). Sur la base de ce constat, plusieurs opérations de restauration ont vu le jour dans le cadre du Plan Rhône (2004) et du SDAGE Rhône-Méditerranée (2016-2021), avec pour objectifs de restaurer le fonctionnement hydro-sédimentaire du fleuve et d'améliorer sa qualité écologique (Lamouroux et al., 2015). Depuis les années 2010, les projets de restauration se concentrent davantage sur les processus hydro-sédimentaires. Ainsi, trois opérations de réinjection sédimentaire ont été mis en œuvre dans les Rhône court-circuités (RCC) de Chautagne (CHA), de Péage-de-Roussillon (PDR\_GA) et de Donzère-Mondragon (DZM) (tableau 1). A Péage-de-Roussillon, la réinjection sédimentaire a été combinée avec le démantèlement des casiers Girardon afin de favoriser l'apport de galets par érosion de berge (PDR\_SC).

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 annuelles ou bisannuelles. Un surdimensionnement de la taille des particules entrainera une mobilité limitée, voire nulle, susceptible de favoriser le colmatage du fond caillouteux par les MES. 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 la durée d'efficacité des injections en réduisant rapidement l'épaisseur de la couche de galets/graviers injectés, la rendant par conséquent peu fonctionnelle pour les organismes aquatiques.

Pour évaluer l'efficacité de ces interventions, environ 4700 galets marqués (RFID) ont été déployés sur cinq sites entre 2016 et 2019. Ils ont été géolocalisés entre 2 et 5 fois sur des périodes de 3 à 6 ans, selon les sites. Outre les trois sites de réinjection sédimentaire directe (CHA, PDR\_GA et DZM) et le site de démantèlement des casiers (réinjection indirecte à PDR\_SC), le suivi a également concerné un secteur à transport solide actif (LYM). L'analyse répétée de la position des traceurs a pour objectifs : (i) de quantifier et de comparer la mobilité des particules entre les secteurs étudiés, et (ii) d'identifier les paramètres clés qui contrôlent cette mobilité.

Synthèse des vitesses de transport calculées selon le temps calendaire

Site	Type de site	Date injection (+ n traceurs)	Durée suivi (an)	n relevés	Dist moy (m)	Vitesse moy (m/an)	Dist max (m)	Vitesse max (m/an)
CHA	Réinjection sédi. active	Déc. 2016 (888)	6	5	701	118	2435	409
LYM	Référence	Août 2020 (199)	3.7	5	3428	925	8926	2408
PDR_GA	Réinjection sédi. active	Mars 2017 (991)	5.1	3	915	179	3652	716
PDR_SC	Réinjection sédi. passive	Févr. 2019 (999)	3	3	40.8	14	475	160
DZM	Réinjection sédi. active	Avril 2019 (1199)	4.2	5	830	198	2486	593

## 2 RÉSULTATS

### 2.1 Comparaison inter-sites de la distance parcourue et de la vitesse des particules

Pour chaque site suivi, l'analyse de la mobilité des traceurs a permis d'établir le débit critique de mise en mouvement de la charge de fond ( $Q_c$ ), d'évaluer la compétence du fleuve, et de quantifier les distances de transport. L'examen des événements hydrologiques survenus durant les périodes étudiées a permis de calculer la vitesse virtuelle de transport, connaissant la durée du charriage (lorsque  $Q > Q_c$ ). La comparaison des vitesses virtuelles a mis en évidence des contrastes selon les types de secteur. Il apparaît ainsi que les distances et les vitesses de déplacement sont plus élevées dans les secteurs dynamiques (JONS et CHA) que dans les secteurs pavés (PDR\_GA, PDR\_SC et DZM). Aussi, le site de PDR\_SC (site avec réinjection granulométrique passive), sur lequel les traceurs se trouvent dans le chenal secondaire délimité par la berge et le cordon d'îlots issus du démantèlement des casiers, possède des vitesses très faibles, probablement en lien avec des conditions hydrauliques locales peu efficaces (*cf. infra*).

Les vitesses de transport calculées selon le temps calendaire (i.e., en tenant compte des périodes d'activité et d'inactivité de transport par charriage ; Tableau 1) fournissent une évaluation plus facile à interpréter (distance rapportée à l'année) que les vitesses virtuelles (distance rapportée à l'heure). Leur analyse montre que 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) 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).

## 2.2 Caractérisation des variables qui contrôlent le transport sédimentaire par charriage

Cette étude a permis de mieux comprendre les facteurs qui contrôlent le charriage dans le Rhône, à savoir l'occurrence et l'intensité des crues, la taille des particules, la configuration morphologique du chenal, la texture du lit et les conditions hydrauliques locales. Même si l'intensité et la durée des crues sont les principaux facteurs permettant de caractériser les distances parcourues, les autres facteurs jouent également un rôle. C'est notamment le cas de la texture du lit dont dépendent les phénomènes d'imbrication. Ainsi, il apparaît que le transport est plus efficace sur les secteurs dynamiques que sur les secteurs pavés qui ont subi des réinjections sédimentaires. De même, les conditions hydrauliques locales sont déterminantes, comme l'exemple du bras latéral de PDR\_SC a pu le montrer. Leur influence n'est cependant pas encore bien caractérisée.

## 3 RECOMMANDATIONS OPÉRATIONNELLES

Les réinjections sédimentaires devraient être bénéfiques pendant plusieurs décennies sur l'ensemble des sites. 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 aquatiques et rivulaires. Le cas de CHA montre toutefois que la mobilisation des galets/graviers n'est pas toujours optimale en raison des faibles contraintes de cisaillement sur le site de réinjection. Ceci souligne qu'il faut porter une plus grande attention aux conditions hydrauliques des sites d'injection en lien avec les granulométries injectées si l'on envisage une diffusion de cette charge. Il apparaît aussi que de nouvelles injections s'avèrent être localement nécessaires car la charge injectée a été rapidement translatée vers l'aval. 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 et de la faisabilité opérationnelle.

Les retours d'expérience en termes de localisation des sites de réinjection montrent qu'il est nécessaire de bien définir les objectifs des opérations de réinjection avant intervention. 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, où les sédiments injectés seront rapidement mobilisés en aval, ce qui permettra de ré-engraisser des radiers existants ou de créer de nouveaux radiers. En revanche, dans le cas où l'objectif est de restaurer la dynamique des bancs alluviaux en les ré-engraissant pour y favoriser la végétation pionnière et sa dynamique de rajeunissement, 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 judicieux de promouvoir une 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 RCC 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).

## BIBLIOGRAPHIE

Olivier J.-M., Carrel G., Lamouroux N., Dole-Olivier M.-J., Malard F., Bravard J.-P., Amoros C., 2009. The Rhône River basin. In: Tockner K., Robinson C.T., Uehlinger U. (Eds.) *Rivers of Europe*, Elsevier, Amsterdam, 247-295.

Lamouroux N., Gore J.A., Lepori F., Statzner B., 2015. The ecological restoration of large rivers needs science-based, predictive tools meeting public expectations: an overview of the Rhône project. *Freshw Biol*, 60:1069-1084.

Roux A. L., Bravard J.-P., Amoros A., Pautou G., 1989. Ecological changes of the French Upper Rhône River since 1750. In: Petts G.E., Möller H., Roux A.L. (Eds.) *Historical Change of Large Alluvial Rivers: Western Europe*, J. Wiley & Sons Ltd, Chichester, 323-350.