



HAL
open science

Suivi des enregistrements géophone et RFID. Synthèse des campagnes de terrain

Alexandre Peeters, Mathieu Cassel, O. Navratil, Daniel Vazquez-tarrio,
Franck Perret, Bastien Bourjaillat, Christine Mouquet-Noppe, Louis Rey,
Robinson Nedelec, Salomé Berthier-Laumond, et al.

► **To cite this version:**

Alexandre Peeters, Mathieu Cassel, O. Navratil, Daniel Vazquez-tarrio, Franck Perret, et al.. Suivi des enregistrements géophone et RFID. Synthèse des campagnes de terrain. [Rapport de recherche] CNRS; CNR; Réserve Naturelle Nationale de l'île de la Platière. 2024. hal-03750532v3

HAL Id: hal-03750532

<https://hal.science/hal-03750532v3>

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

Suivi des enregistrements géophone et RFID. Synthèse des campagnes de terrain

Suivi des enregistrements géophone et RFID. Synthèse des campagnes de terrain

Rapport scientifique final

Version du 7 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 C3 – Evaluation de la durabilité et de la continuité sédimentaire à la suite d'opérations de recharge sédimentaire

Personnes impliquées

Alexandre Peeters (CNRS, UMR5600, EVS) ; Mathieu Cassel (CNRS, UMR5600, EVS) ; Oldrich Navratil (CNRS, UMR5600, EVS) ; Daniel Vázquez-Tarrío (CNRS, UMR5600, EVS) ; Franck Perret (CNRS, UMR5600, EVS, OMEAA) ; Bastien Bourjaillat (CNRS, UMR5600, EVS) ; Christine Mouquet-Noppe (ENS de Lyon, UMR5600, EVS) ; Louis Rey (ENS de Lyon, UMR5600, EVS) ; Robinson Nedelec (CNRS, UMR5600, EVS) ; Salomé Berthier-Laumond (CNRS, UMR5600, EVS) ; Kristell Michel (ENS de Lyon, UMR5600, EVS) ; Nicolas Tissot (CNRS, UMR5600, EVS) ; Hervé Parmentier (ENS de Lyon, UMR5600, EVS) ; Adrien Barra (CNRS, UMR5600, EVS, OMEAA), Hervé Piégay (CNRS, UMR5600, EVS)

Christophe Mora (CNR, RIDG) ; Lionel Meric (CNR, RIDG) ; Alexandre Falgon (CNR, RIDG) ; Manon Bounous (Réserve Naturelle Nationale de l'île de la Platière) ; Bernard Pont (Réserve Naturelle Nationale de l'île de la Platière)

Pour citer ce rapport

Peeters A. et al., (2024). *Suivi des enregistrements géophone et RFID. Synthèse des campagnes de terrain*. Rapport scientifique final. Observatoire des Sédiments du Rhône – 6^{ème} programme d'action. Action C3. 105 p.

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



Résumé

Dès 2017, des actions de redynamisation du corridor fluvial ont été mises en œuvre dans plusieurs Vieux-Rhône : (i) le démantèlement des casiers Girardon, afin de favoriser l'érosion latérale des berges (réinjection sédimentaire indirecte), et (ii) l'introduction artificiellement de larges volumes de sédiments grossiers dans le chenal, pour compenser le déficit en sédiments des secteurs pavés (réinjection sédimentaire directe). L'évaluation de l'efficacité de ces actions de restauration repose notamment sur un suivi du transport sédimentaire (par charriage) afin de déterminer dans quelle mesure et pour quelle durée la dynamique sédimentaire a pu être restaurée.

Le présent rapport fait état du suivi mené entre avril 2021 et mars 2024 (action C3 du programme OSR6). D'une manière générale, les résultats issus de ces suivis ont permis d'améliorer les connaissances sur le transport sédimentaire (charriage) du Rhône en termes (i) de quantification du transport solide (i.e., taille des sédiments mobilisables, distance et vitesse de transport) par type de secteur (pavé, dynamique, marges), (ii) de caractérisation des variables qui contrôlent le charriage, et (iii) des modalités de transfert des sédiments au travers des barrages.

Pour ce faire, neuf nouveaux relevés RFID ont été réalisés sur cinq tronçons du Vieux-Rhône. L'analyse et la synthèse de l'évolution de leur position ont permis, non seulement de quantifier le charriage à l'échelle du secteur, mais également de mieux comprendre l'importance des paramètres qui contrôlent le charriage (i.e., 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). Ainsi, il apparaît que le transport est plus efficace sur les secteurs dynamiques que sur les secteurs pavés.

Ces données quantifiées de transport par charriage ont permis d'alimenter un modèle de propagation hydro-sédimentaire de sédiments réinjectés sur deux Vieux-Rhône. Ce modèle fournit des informations sur les modalités de propagation du panache de sédiment issu des sites de réinjection (i.e., vitesse de transfert, volume, répartition le long du secteur).

En outre, l'analyse du signal sismique des géophones a permis (i) de confirmer les valeurs de débit critique de mise en mouvement de la charge de fond (Q_c), (ii) de démontrer que le signal sismique est bien associé au charriage (effet d'hystérésis entre le débit et le signal sismique), et (iii) de mieux comprendre les impacts des ouvertures de vannes du barrage de Jons sur le charriage et plus généralement du bruit anthropique. Par ailleurs, du point de vue métrologique, de nouvelles améliorations technologiques ont été apportées aux géophones (e.g., la conception d'un intégrateur analogique du signal sismique sur un pas de temps de 10 minutes, la conception d'une carte de traitement filtrant le signal sur la bande de fréquence du charriage 15-100 Hz).

A ce stade, les deux approches (géophone et traceurs RFID) ont été utilisées conjointement pour déterminer les valeurs de Q_c et pour mieux comprendre les modalités de transfert sédimentaire du barrage de Jons. Les deux approches n'ont, par contre, pas encore pu être couplées pour établir des relations entre la distance moyenne des traceurs et l'activité géophonique cumulée par période, faute de points de calage. Néanmoins, avec les crues survenues durant l'hiver 2023-2024 et les relevés RFID planifiés dans le cadre du programme OSR7, davantage de points de calage fourniront les premières bases pour établir ce type de relation.

Mots-clés

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

Table des matières

1. Introduction.....	6
2. Suivi des RFID : présentation et synthèse des dernières campagnes de terrain	9
2.1 Le Vieux Rhône de Chautagne : réinjection sédimentaire de Motz.....	9
2.1.1 Action de restauration et premiers suivis RFID.....	9
2.1.2 Nouveaux relevés RFID	13
2.1.3 Eléments de synthèse	15
2.2 Le Canal de Miribel et le barrage de Jons.....	19
2.2.1 Description du site et de ses enjeux.....	19
2.2.2 Mise en place du suivi RFID	21
2.2.3 Le nouveau relevé RFID.....	23
2.2.4 Eléments de synthèse	25
2.3 Le Vieux Rhône de Péage-de-Roussillon : l'île des Gravieres.....	35
2.3.1 Action de restauration et premiers suivis RFID.....	35
2.3.2 Le nouveau relevé RFID.....	38
2.4 Le Vieux Rhône de Péage-de-Roussillon : réinjection sédimentaire de la Platière.....	46
2.4.1 Action de restauration et premiers suivis RFID.....	46
2.4.2 Le nouveau relevé RFID.....	48
2.4.3 Eléments de synthèse	50
2.5 Le Vieux Rhône de Donzère-Mondragon : l'île des Dames	53
2.5.1 Action de restauration et premiers suivis RFID.....	53
2.5.2 Les nouveaux relevés RFID.....	56
2.5.3 Eléments de synthèse	59
2.6 Eléments de synthèse sur les traceurs RFID.....	65
2.6.1 Comparaison inter-sites en termes de distance et vitesse de transport par charriage. 65	65
2.6.2 Caractérisation des variables qui contrôlent le transport sédimentaire par charriage 67	67
2.6.3 Synthèse pour le Vieux Rhône de PDR	74
3. Modélisation hydro-sédimentaire	76
3.1 Rappels théoriques.....	76
3.2 Le Vieux Rhône de Péage-de-Roussillon	77
3.3 Le Vieux Rhône de Chautagne.....	79
3.4 Discussion et limites de la méthode.....	83

4. Suivi par géophone	84
4.1 Rappel contextuel.....	84
4.1 Secteurs et sites d'étude	85
4.1.1 <i>Le canal de Miribel et le Rhône en amont de Lyon.....</i>	<i>85</i>
4.1.2 <i>Le Vieux Rhône de Baix-le-Logis-Neuf</i>	<i>87</i>
4.1.3 <i>Le Vieux Rhône de Chautagne</i>	<i>88</i>
4.2 Résultats issus des premières acquisitions	89
4.2.1 <i>Sensibilité aux bruits environnants et filtration du signal</i>	<i>89</i>
4.2.2 <i>Effet d'hystérésis entre le débit et le signal sismique, et détermination du débit critique de mise en mouvement</i>	<i>91</i>
4.2.3 <i>Prise en compte des opérations du barrage de Jons pour interpréter le signal sismique</i>	<i>92</i>
4.2.4 <i>Vieux-Rhône de Baix-le-Logis-Neuf : une variabilité des signaux sismiques en fonction des conditions environnementales</i>	<i>98</i>
4.3 Nouvelles améliorations.....	99
5. Conclusions et perspectives.....	100
6. Bibliographie	102

1. Introduction

Dès 2017, des actions de redynamisation du corridor fluvial ont été mises en œuvre dans plusieurs tronçons du Vieux-Rhône. Elles visent à réactiver les processus hydro-géomorphologiques au travers de deux opérations de restauration complémentaires : (i) le démantèlement des casiers Girardon afin de favoriser l'érosion latérale des berges (réinjection sédimentaire indirecte), et (ii) l'introduction artificielle de larges volumes de sédiments grossiers dans le chenal pour compenser le déficit en sédiments des secteurs pavés (réinjection sédimentaire directe). L'évaluation de l'efficacité de ces actions de restauration repose notamment sur un suivi du transport sédimentaire (par charriage) afin de déterminer dans quelle mesure et pour quelle durée la dynamique sédimentaire a pu être restaurée. Le suivi du charriage fournit également des informations relatives aux risques résultant du transfert de ces sédiments grossiers dans la retenue aval.

Le présent rapport fait état du suivi et de l'évaluation de ces actions de restauration ; suivi mené entre avril 2021 et mars 2024 dans le cadre de l'action C3 du programme OSR6. Ce suivi repose sur deux approches couplées : (i) le monitoring du flux sédimentaire par l'utilisation conjointe de traceurs RFID et de géophones, et (ii) la modélisation probabiliste du transfert de la charge injectée. L'intérêt de ce couplage est de valider les prédictions de charriage (en termes de distances et de transport solide par classe granulométrique) par un suivi du transport solide *in situ*, et ce afin de pouvoir utiliser ces modèles pour établir des scénarios de restauration. En plus de l'objectif général de cette action qui concerne l'évaluation de la durabilité des opérations de réinjection, plusieurs questions de recherche sont également sous-tendues par cette double approche :

- Comment fonctionne le transport de la charge de fond au niveau des retenues ? Quelle est le degré de transparence sédimentaire des retenues ? Pour répondre à ces questions, une étude plus fine du transport solide au niveau de la retenue de Jons devrait permettre de valider les modèles (échelle locale) et de mieux évaluer le niveau de fragmentation du Rhône en termes de transit sédimentaire (échelle du cours d'eau) ;
- Est-il possible de prédire l'évolution à moyen et à long terme de la continuité sédimentaire du Rhône suite à différents scénarios d'injection ou de gestion des ouvrages dans un continuum affluent-fleuve-embouchure ? Dans ce cas, les suivis opérés sur les 6 tronçons court-circuités de ce travail apporteront des éléments de réponse.

Un autre objectif de ce travail est de coupler le suivi par traçage sédimentaire RFID avec le suivi par géophone ; ceci afin de déterminer les conditions de transfert des sédiments réinjectés (soit par érosion latérale soit par injection mécanique) le long des tronçons court-circuités et au travers des retenues. Le suivi RFID permet de déterminer le déplacement de particules individuelles le long du cours d'eau. Ceci permet ainsi d'évaluer (i) les distances de transport en fonction de l'occurrence et de l'intensité des événements de crue, (ii) le temps nécessaire à l'évacuation complète de la charge injectée en dehors du tronçon court-circuité et (iii) la possibilité de transit dans les réservoirs aval. D'autre part, les chroniques sismiques obtenues par les géophones fournissent un proxy du flux sédimentaire qui devrait permettre (i) de détecter les périodes avec un transport solide actif et les périodes sans transport solide (vidange du système) et (ii) de quantifier la dynamique de charriage (e.g., estimation du seuil de mise en mouvement, des flux charriés et leur variabilité). Si ce couplage s'avère concluant, l'utilisation des géophones devrait à terme remplacer le suivi RFID pour les suivis au long cours

car cette technique est beaucoup moins coûteuse et chronophage que le suivi RFID. Les différents sites d'étude concernés par ces approches sont détaillés au Tableau 1 et localisés à la Figure 1.

L'action s'appuie également sur une modélisation morphodynamique (2^{ème} approche utilisée pour évaluer la durabilité des actions de réinjection sédimentaire). Elle a été conduite par le CEREGE et a fait l'objet d'un rapport spécifique (Serlet *et al.*, 2022).

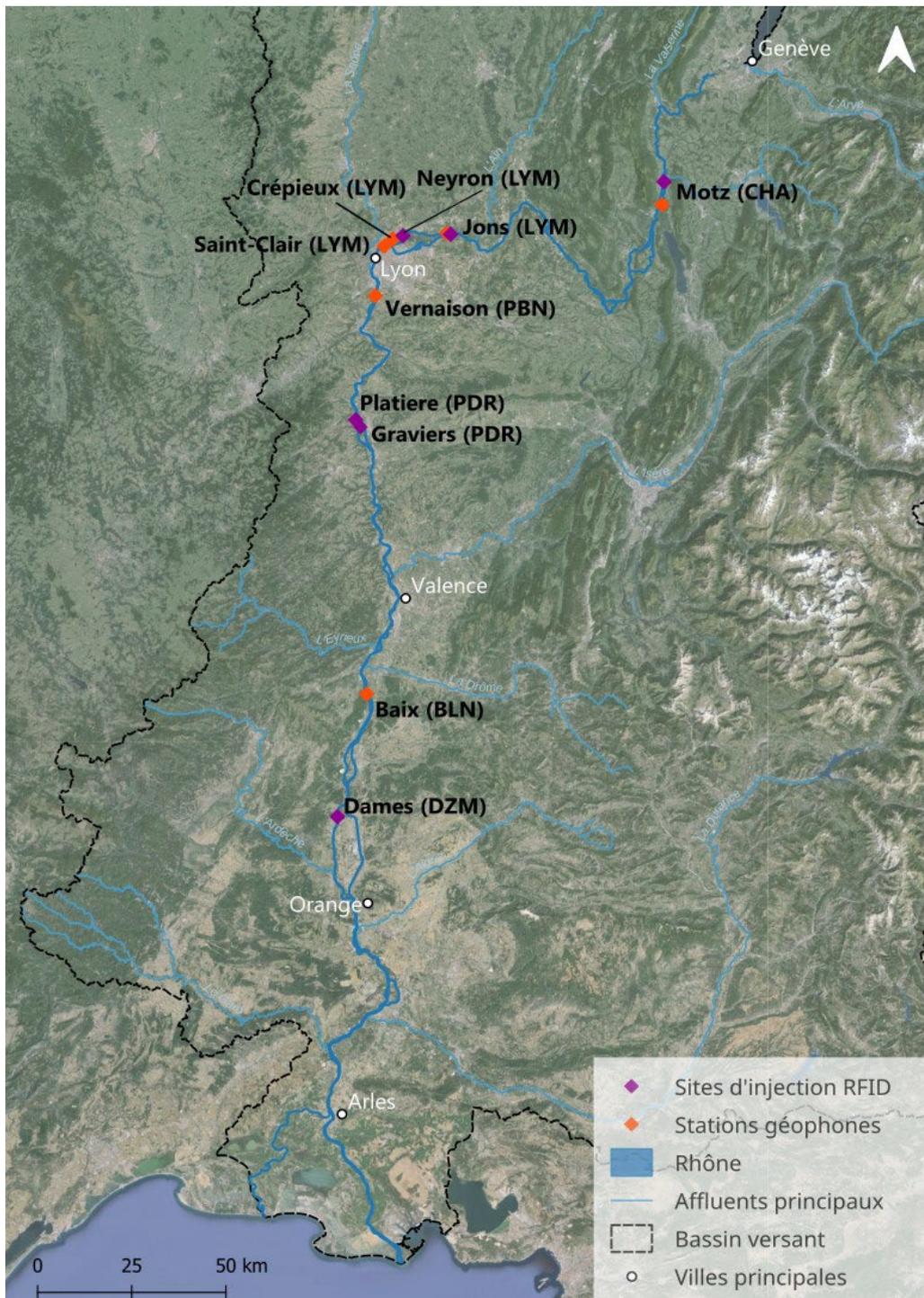


Figure 1. Localisation des sites d'étude

Tableau 1. Sites d'étude et caractéristiques des actions de restauration et des suivis

RCC	Site	Action de restauration	Enjeux	Date d'intervention	Volume de la réinjection (m ³)	Suivi RFID (+ nombre de relevés prévus dans OSR6)	Date de l'injection RFID (+ nombre de traceurs)	Suivi géophone (+ nombre de dispositifs)
CHA	Motz	Réinjection sédimentaire	Efficacité de la réinjection sédimentaire	nov. - déc. 2016	15000	oui (2)	21/12/2016 (888)	Oui (1 en place)
LYM	Jons	NA	Quantification du charriage sur le canal de Miribel, évaluation de la transparence sédi. du réservoir	NA	NA	oui (3)	Oct. 2016 (200) & août 2020 (199)	Oui (1 en place)
	Crépieux	NA	Quantification du charriage sur le canal de Miribel	NA	NA	non	NA	Oui (1 en place)
	St-Clair	NA	Quantification du charriage sur le Rhône total	NA	NA	non	NA	Oui (1 en place)
PBN	Vernaison	Réinjection sédimentaire	Efficacité de la réinjection sédimentaire	2024 ?	?	non	NA	Oui (1 en place)
PDR	La Platière	Réinjection sédimentaire	Efficacité de la réinjection sédimentaire	déc. 2016 - mars 2017	7850	oui (1)	14/03/2017 (991)	
	île des Gravieres	Démantèlement des casiers	Réactivation de la dynamique sédimentaire	déc. 2016 - mars 2017 (+ déc. 2018)	NA	oui (1)	05/02/2019 (999)	
BLN	Baix	Réinjection sédimentaire	Efficacité de la réinjection sédimentaire	nov. 2021	12000	oui (hors OSR6)	10/03/2022	oui (3 en place)
DZM	île des Dames	Réinjection sédimentaire	Efficacité de la réinjection sédimentaire	jan. 2019	30000	oui (2)	Avril 2019 (1199)	

2. Suivi des RFID : présentation et synthèse des dernières campagnes de terrain

2.1 Le Vieux Rhône de Chautagne : réinjection sédimentaire de Motz

2.1.1 Action de restauration et premiers suivis RFID

Afin de compenser les effets du déséquilibre sédimentaire dans le Vieux Rhône de Chautagne (Klingeman et al., 1994) et de faire face aux problèmes d'incision observés dans son tronçon amont, une réinjection de 15 000 m³ de sédiments a été réalisée à titre expérimental par la CNR en novembre-décembre 2016 (CNR, 2019). Ces sédiments sont issus du dragage de la rivière des Ussets (à raison de 4 000 m³) et de la retenue de Seyssel (à raison de 11 000 m³). Les indices granulométriques D50, D84 et D90 du stock de sédiments sont de 10,9 mm, 49,4 mm et 72,5 mm, respectivement (indices recalculés sur la base des 6 échantillons analysés par GeoPeka, 2018). L'introduction de ces sédiments a été réalisée 350 m en aval du barrage, dans la moitié gauche du lit du Vieux Rhône, sous la forme d'un merlon de 350 m de long (situé dans le prolongement de la mise à l'eau). La CNR, qui s'interroge sur les effets d'une telle opération sur le chenal et le devenir des sédiments réinjectés, a entrepris des suivis topobathymétriques et un suivi RFID. Ce dernier a été mis en œuvre par le bureau d'étude GeoPeka (2018), qui a également réalisé les 2 premiers suivis de la position des traceurs sédimentaires (relevés S1 et S2). 888 galets équipés de PIT tags (23 et 32 mm de long) ont ainsi été injectés le 21 décembre 2016. Ils sont répartis en 5 classes granulométriques (Tableau 2). L'injection est composée de 40 clusters qui comprennent chacun entre 19 et 23 traceurs. Ces clusters sont positionnés sur 5 secteurs morphologiques (Figure 2) :

- 4 clusters en amont du merlon ;
- 19 clusters sur les flancs du merlon ;
- 2 clusters dans la zone de convexité (rive droite) en aval du merlon ;
- 9 clusters dans la zone de concavité (rive gauche) en aval du merlon ;
- 4 clusters sur un radier localisé environ 750 m en aval du merlon.

Tableau 2. Réinjection sédimentaire de Motz : répartition par classes granulométriques des traceurs injectés (GeoPeka, 2018)

Classes granulométriques (mm)	22 - 32	32 - 45	45 - 64	64 - 90	90 - 128	Total
Nombre de traceurs	222	271	254	89	52	888
Part des traceurs	25 %	31 %	29 %	10 %	5 %	
Fréquences cumulées	0.25	0.56	0.85	0.95	1	

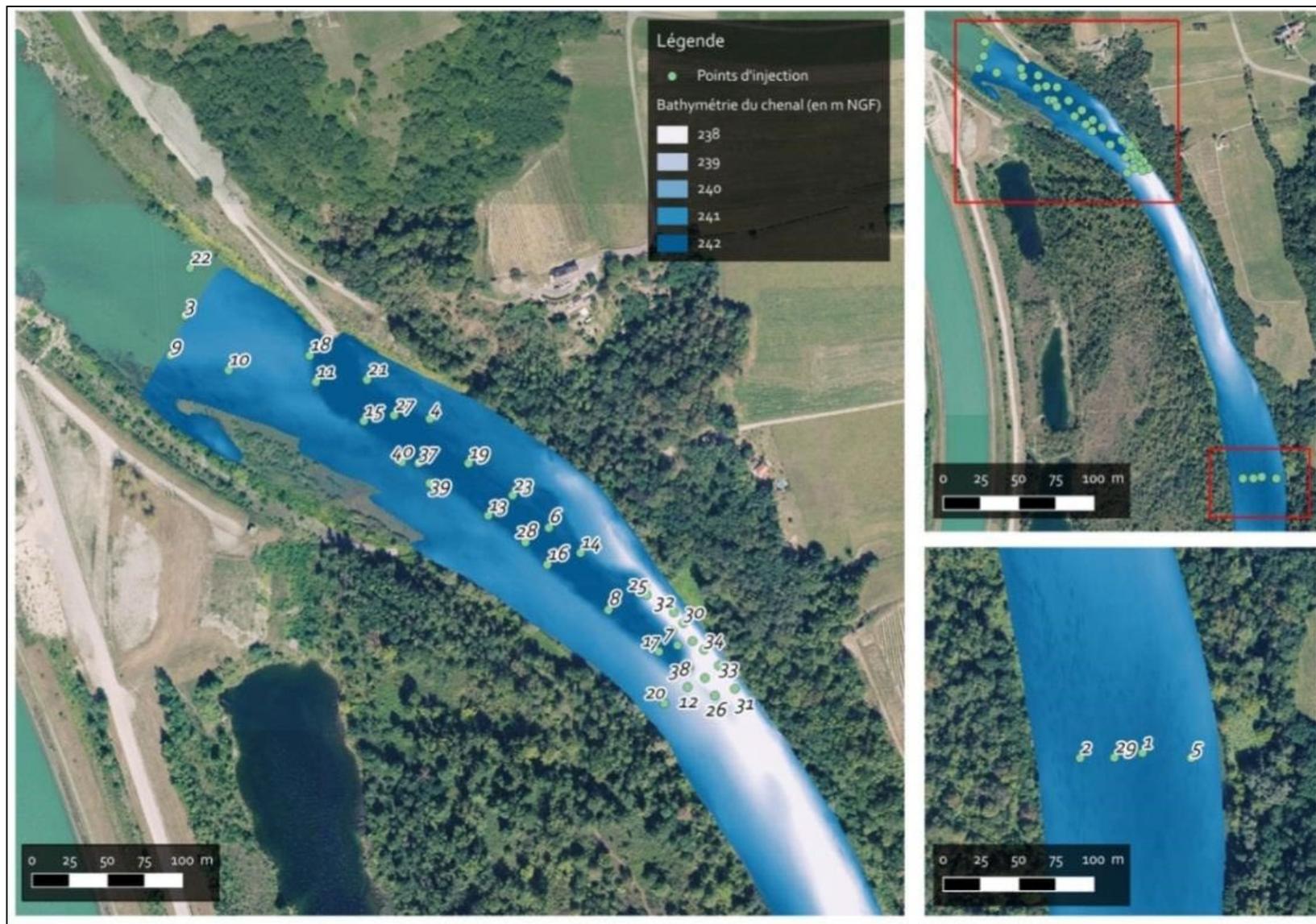


Figure 2. Réinjectionsédimentaire de Motz : Localisation des injections des traceurs en fonction de la bathymétrie initiale (GeoPeka, 2018)

Par la suite, trois relevés de la position des traceurs (S1, S2 et S3) ont été effectués (Figure 3 et Tableau 3). Les deux premiers suivis ont été réalisés par GeoPeka (2018), tandis que le troisième a été effectué par la CNR.

Le premier suivi (S1) a été réalisé en 4 jours (entre le 4 et le 7 décembre 2017), à la suite d'une activité hydrologique marquée par l'absence de crue mobilisatrice ($Q_{max} = 224 \text{ m}^3/\text{s} < Q_c$). Il en résulte une faible mobilisation. 16 % des traceurs ont été mobilisés et une distance moyenne de déplacement de 10 m a été enregistrée (Tableau 4), soit une distance inférieure à la valeur seuil de mobilisation (i.e., distance seuil indiquant que le changement de position du traceur est effectivement dû à un processus de transport et non aux seules erreurs de géopositionnement¹). Le pourcentage de retour est relativement faible (33 % avec les traceurs déduits) car les traceurs sont toujours regroupés, ce qui exacerbe les problèmes de collision des signaux des traceurs trop proches les uns des autres. Bien que la plupart des traceurs aient été détectés à proximité de leur point d'injection, plusieurs traceurs ont néanmoins parcouru plusieurs dizaines de mètres. Il s'agit principalement des traceurs issus des injections réalisées en amont du merlon et sur son flanc droit, là où les contraintes hydrauliques étaient probablement les plus élevées (GeoPeka, 2018).

Le deuxième suivi (S2, 27-30 mars 2018) a, quant à lui, fait suite à une période hydrologique intense, avec 4 pics de crues ($Q_{max} > Q_c$) ; le débit maximal atteignant $1926 \text{ m}^3/\text{s}$. Il présente aussi un faible taux de retour (27 % avec les traceurs déduits) probablement en lien avec la prospection limitée dans le temps et dans l'espace (pas de prospection au-delà du "seuil amont", jugé infranchissable avec l'embarcation utilisée). Ce suivi indique que plus de la moitié des éléments communs avec S1 ont été mobilisés. Les distances moyenne et maximale sont égales à 199 m et 1076 m, respectivement (Tableau 4).

Le troisième suivi (S3) a duré 2 jours et s'est terminé le 1 septembre 2020. La prospection n'était pas exhaustive mais elle s'est étendue au secteur situé entre les deux seuils. De manière générale, ce relevé montre une absence de déplacement des traceurs, avec un seul élément mobilisé sur une distance supérieure au seuil de mobilisation. La période hydrologique comprend 3 petits pics de crue ($Q_{max} > Q_c$), le plus important atteignant $728 \text{ m}^3/\text{s}$ (27/11/2019).

¹ La distance seuil (~20 m) avait été calculée par GeoPeka (2018) à partir de l'analyse des doublons issus du relevé S1.

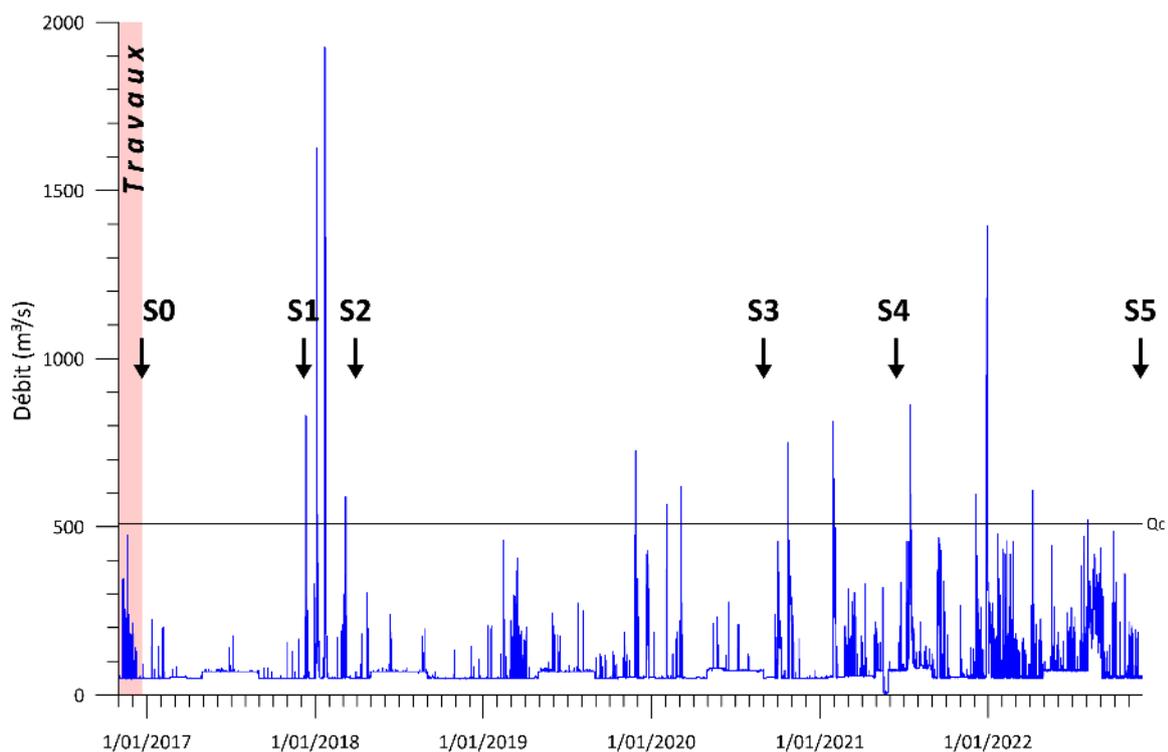


Figure 3. Réinjection sédimentaire de Motz : hydrogramme et relevés RFID. Débits horaires bruts et non validés fournis par la CNR (station limnigraphique du barrage de Motz)

Tableau 3. Réinjection sédimentaire de Motz : caractéristiques des prospections et des périodes hydrologiques associées aux relevés RFID

n°	Date de fin	Temps de prospection (h)	Surface prospectée (ha)	Nbre d'éléments retrouvés	% de retour	Nbre d'événements > Qc	Q _{max} (m ³ /s) + date du Q _{max}
S1	7/12/2017	22.3	5.11	267	30	0	224 (12/01/2017)
S2	30/03/2018	31	13	213	24	4	1926 (22/01/2018)
S3	1/09/2020	11.5	2.02	71	8	3	728 (27/11/2019)
S4	16/06/2021	15.7	4.44	113	13	2	814 (29/01/2021)
S5	28/11/2022	33.5	10.8	122	14	5	1395 (29/12/2021)

2.1.2 Nouveaux relevés RFID

Prospection

Un nouveau relevé (S4) a été réalisé sur 2 jours et s'est terminé le 16 juin 2021. Il a été effectué par la CNR, avec l'appui d'une stagiaire, Florine Merelle, qui a analysé les données dans le cadre de son mémoire de Master (M2 en Sciences de l'Eau – Université Lumière Lyon 2 ; Merelle, 2021). Ce relevé fait suite à une période hydrologique marquée par 2 pics de crue dont le débit était légèrement supérieur aux estimations théoriques du débit critique de mise en mouvement ($Q_{max} = 814 \text{ m}^3/\text{s}$, le 19/01/2021). Seuls 113 traceurs ont été retrouvés, ce qui correspond à un taux de retour de 13 % (Tableau 3). Cette faible valeur est liée à la prospection qui (i) s'est limitée au secteur situé en amont du seuil amont, et qui (ii) n'était pas exhaustive (Figure 5). En effet, il montre une absence de mobilisation significative, avec 2 % de traceurs mobilisés sur une distance moyenne de 5 m (Tableau 4). Néanmoins, 2 particules ont parcouru une distance importante (86 et 259 m), ce qui indique que le pic de crue devait être proche du Q_c .

Quant au dernier relevé (S5), il fait suite à une période caractérisée par trois crues $>Q_c$, dont la plus importante a atteint $1395 \text{ m}^3/\text{s}$ (29/12/2021). Il faut noter que ce relevé a débuté le 17/04/2022 et s'est terminé le 28/11/2022. La période comprise entre ces deux dates a connu quelques petites crues principalement liées à l'arrêt d'un groupe de production de l'usine sur laquelle des opérations de maintenance étaient menées (F. Maure, communication personnelle, 02/08/2022). Seule une de ces petites crues a atteint le Q_c . Elle est dès lors susceptible d'avoir entraîné du charriage durant la période de relevé, ce qui pourrait introduire de légères erreurs dans les déplacements mesurés. Toutefois, aucun traceur n'a été relevé à deux positions différentes durant cette période, ce qui tend à suggérer que ce biais est minime. Le matériel utilisé comprend le boîtier de lecture RFID, auquel a été couplé un système complémentaire développé par DATAMAX Electronique en partenariat avec la CNR. Ce système permet, non seulement d'identifier les traceurs, mais aussi de les géolocaliser (GPS intégré) et de les inventorier (horodatage des données dans la mémoire intégrée). Au total, 6 jours de prospection ont permis de couvrir une superficie de 10,8 ha. Deux bateaux ont été utilisés, celui de la CNR et celui d'EVS ; ce dernier, plus léger et compact (mais moins puissant), ayant permis de prospecter les secteurs difficiles d'accès. Notons également que plusieurs bancs ont été prospectés à l'aide de la petite antenne circulaire (Figure 5).

Au total, 119 traceurs ont été localisés durant le relevé S5 (13 % de récupération). Comparé avec le relevé précédent (S4), ce relevé indique une mobilisation sur une distance moyenne et maximale de 85 m et 598 m, respectivement. 43 % des éléments communs aux deux relevés ont été mobilisés (Tableau 4).



Figure 4. Réinjection sédimentaire à Motz : zone prospectée (trait blanc) lors du relevé S5

Tableau 4. Réinjection sédimentaire de Motz : synthèse des relevés RFID

n°	Nbre d'éléments déduits	Nbre total d'éléments	% de retour (avec éléments déduits)	Nombre d'éléments mobilisés / éléments communs avec levé précédent (%)	Dist. moy. (m)	Dist. max. (m)
S1	25	292	33	47/292 (16)	10	79
S2	29	242	27	60/104 (58)	199	1076
S3	49	120	14	1/72 (1)	1	31
S4	19	132	15	2/82 (2)	5	259
S5	0	119	13	20/47 (43)	85	598

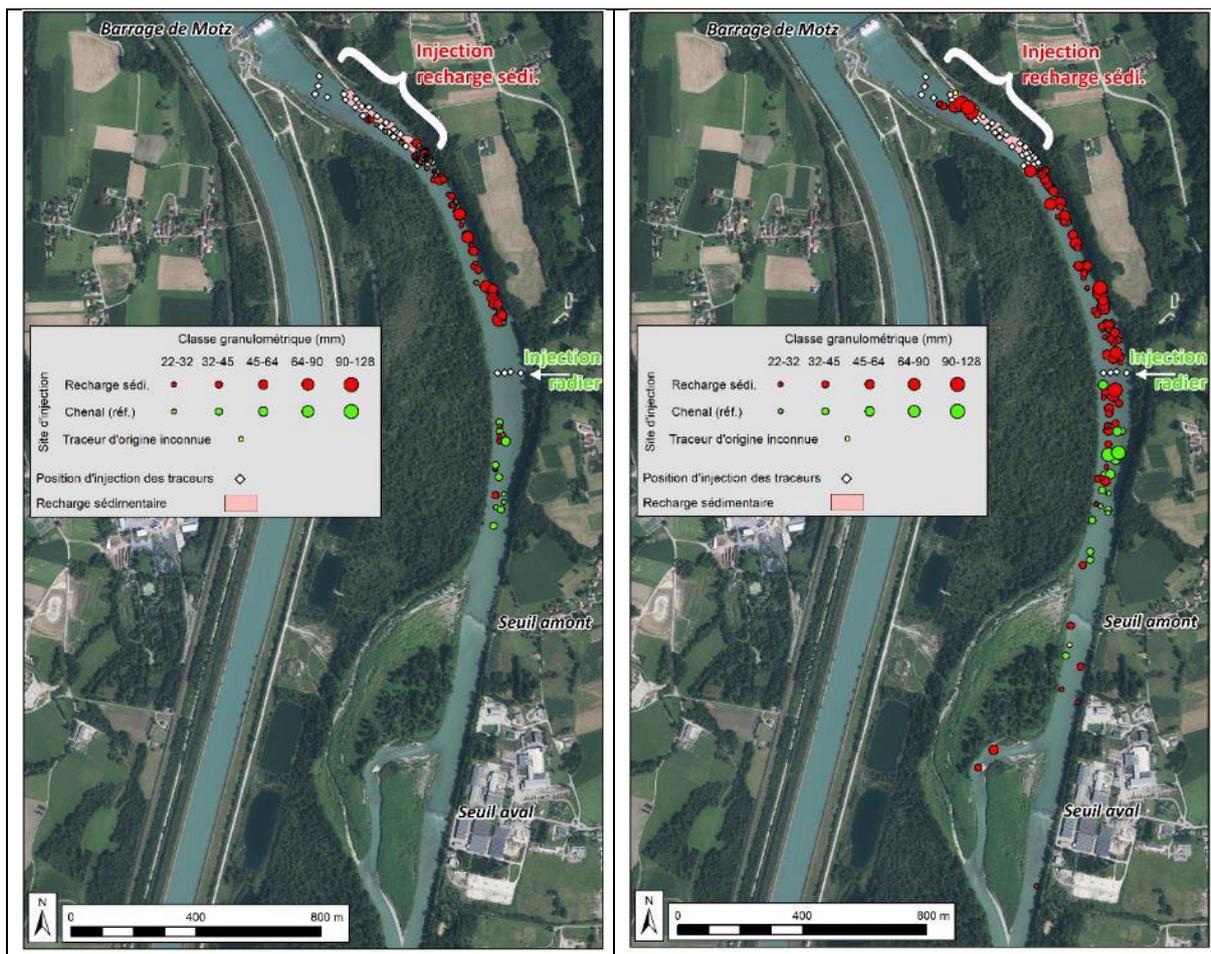


Figure 5. Réinjection sédimentaire à Motz : localisation des traceurs pour les relevés S4 (à gauche) et S5 (à droite)

2.1.3 Éléments de synthèse

Pourcentage de récupération

Le détail des pourcentages de récupération calculés selon la classe granulométrique et selon la taille de la capsule RFID utilisée est représenté en Figure 6. D'une manière générale, il apparaît que, pour chacun des relevés, ce pourcentage varie peu, quelle que soit la classe granulométrique et quelle que soit la taille de la capsule RFID. Ceci suggère que la prospection a couvert un secteur suffisamment long et que les *frontrunners* (i.e., les traceurs les plus distants de leur site d'injection) liés à un éventuel transport sélectif ont été détectés. Seuls les relevés S1 et S2 montrent de légères disparités, avec de meilleurs pourcentages de retour pour les classes granulométriques les plus grossières et pour les capsules les plus grandes.

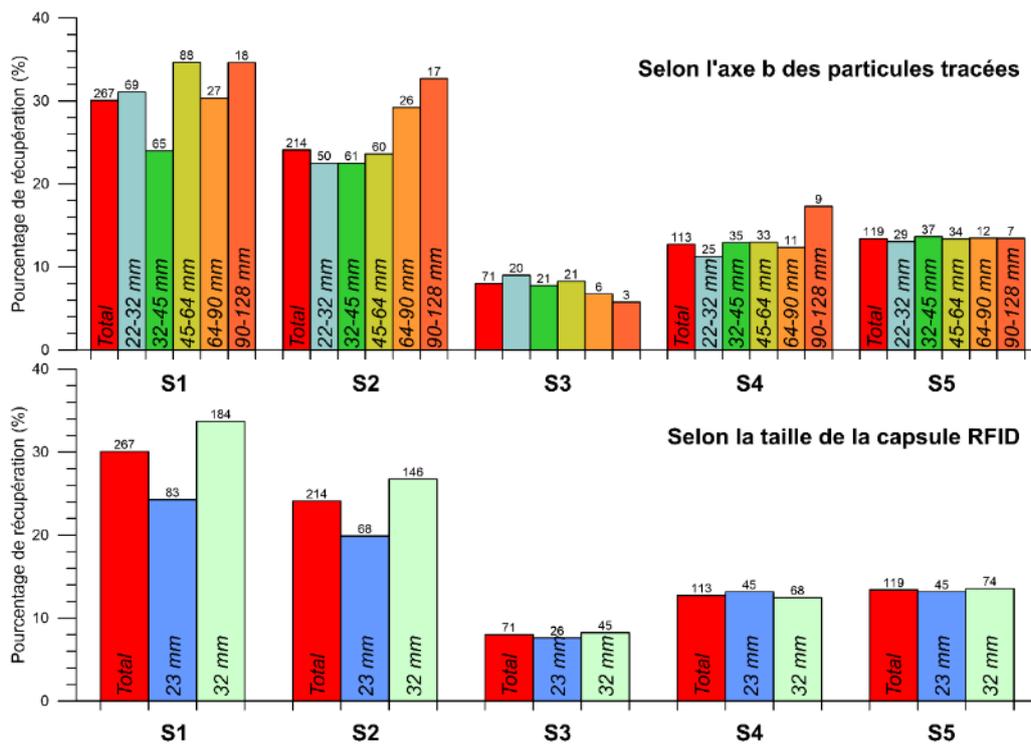


Figure 6. Réinjection sédimentaire à Motz : pourcentages de récupération des 5 relevés RFID présentés selon l'axe b des particules tracées (en-haut) et selon la taille de la capsule RFID (en bas) (les numéros surmontant les histogrammes réfèrent aux nombres de particules retrouvées)

Détermination du débit critique de mise en mouvement

Le Q_c (débit critique de mise en mouvement) a été déterminé sur la base de la relation établie entre le débit de pointe de la période comprise entre 2 relevés successifs (x) et la distance moyenne parcourue par les particules communes à ces 2 relevés successifs (y). De la sorte, cette relation établie sur les 5 relevés RFID ($y = 0,1182 x - 60,311$; $R^2 = 0,83$) permet de déterminer un Q_c égal à **510 m³/s**. Cette approche fournit une valeur proche de celles calculées via les formules de Schoklitsch et de Bathurst, qui sont de 498 m³/s et 603 m³/s, respectivement.

Analyse à l'échelle du secteur

Lorsque le nombre de particules communes entre deux relevés successifs est relativement faible, comme pour les derniers relevés (seulement 47 traceurs communs entre S4 et S5), on peut considérer que le nombre d'individus devient insuffisant pour calculer avec robustesse des métriques représentatives de l'ensemble de la population de traceurs. Dans ce cas, il est préférable de comparer chaque relevé S_i avec l'injection S_0 . La distance moyenne $S_i - S_0$ correspond à la distance parcourue par le centre du nuage de traceurs (le *tracer cloud centroid* d'après Arnaud et al., 2017). En procédant de la sorte, le nombre d'individus ne souffre pas du biais lié à la présence d'un mauvais relevé (i.e., à son faible pourcentage de retour), et le nombre de particules pour calculer les métriques est plus important. Ainsi, la comparaison du relevé S5 avec l'injection S_0 fournit une évaluation du transport solide sur le moyen terme (~5 ans). Sur les 119 traceurs retrouvés en S5, 118 traceurs ont effectué un déplacement

significatif, ce qui correspond à 99 % d'éléments mobilisés (Tableau 5). Sur la période de 5 ans, les traceurs ont ainsi parcouru une distance moyenne de 701 m et une distance maximale de 2435 m. La valeur de l'écart-type (491 m) fournit quant à elle une indication de la dispersion des traceurs le long du secteur étudié.

Tableau 5. Réinjection sédimentaire de Motz : comparaison des relevés RFID (Si) avec l'injection (S0)

n°	Nombre d'éléments mobilisés / éléments communs avec S0 (%)	Dist. moy. (m)	Ecart-type (m)	Dist. max. (m)
S1 vs. S0	47/292 (16)	10	14	79
S2 vs. S0	204/242 (84)	327	297	1340
S3 vs. S0	110/137 (80)	336	364	1679
S4 vs. S0	105/132 (80)	325 *	327	1328 *
S5 vs. S0	118/119 (99)	701	491	2435

* Valeurs sous-estimées car la prospection en S4 s'est limitée au secteur compris entre l'injection et le seuil amont, soit sur une distance inférieure à celle du relevé S3.

Influence de la taille des particules sur les distances de transport

L'analyse des distances de transport par classe granulométrique doit être réalisée avec précaution car le nombre de particules par classe granulométrique est dans certains cas très faible, ce qui rend délicat la comparaison des indices granulométriques (médiane et percentiles) (Figure 7). A l'exception du relevé S1, qui montre des distances de déplacement plus faibles pour la classe granulométrique la plus grossière (90-128 mm), l'analyse des autres relevés n'indique pas d'effet de la taille des particules sur les distances de transport. On notera tout de même que le relevé S4, qui a fait suite à une série de petites crues, ne présente des déplacements significatifs que pour les deux classes granulométriques les plus fines.

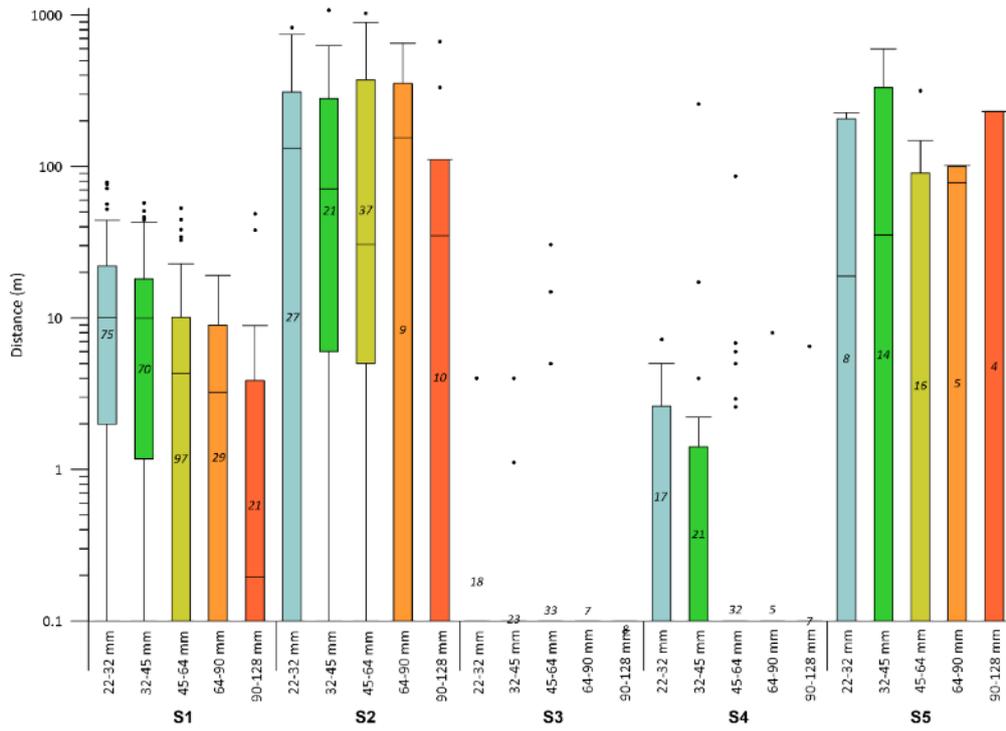


Figure 7. Réinjection sédimentaire de Motz : distances de transport par classe granulométrique

2.2 Le Canal de Miribel et le barrage de Jons

2.2.1 Description du site et de ses enjeux

Les éléments de cette section s'appuient sur les rapports suivants :

- Rapport de synthèse de l'OSR4 : "Mesures et modélisations du fonctionnement hydrosédimentaire du secteur Miribel-Jonage" (Dépret et al., 2018) ;
- Rapport final du projet GreenDam : "Évaluation de la transparence sédimentaire des ouvrages hydro-électriques : Éléments opérationnels pour promouvoir une énergie hydraulique vertueuse" (Cassel et al., 2021).

La présentation du secteur d'étude, de l'historique des aménagements et des enjeux y est développée en détails. Le présent rapport se limite à en faire la synthèse.

Le canal de Miribel est localisé sur le Rhône moyen, en amont immédiat de la ville de Lyon. Il présente un transport solide toujours actif grâce aux apports de la rivière d'Ain (30000 à 40000 m³/an ; Rollet, 2007), qui conflue avec le Rhône 8 km en amont du barrage de Jons (Figure 8).

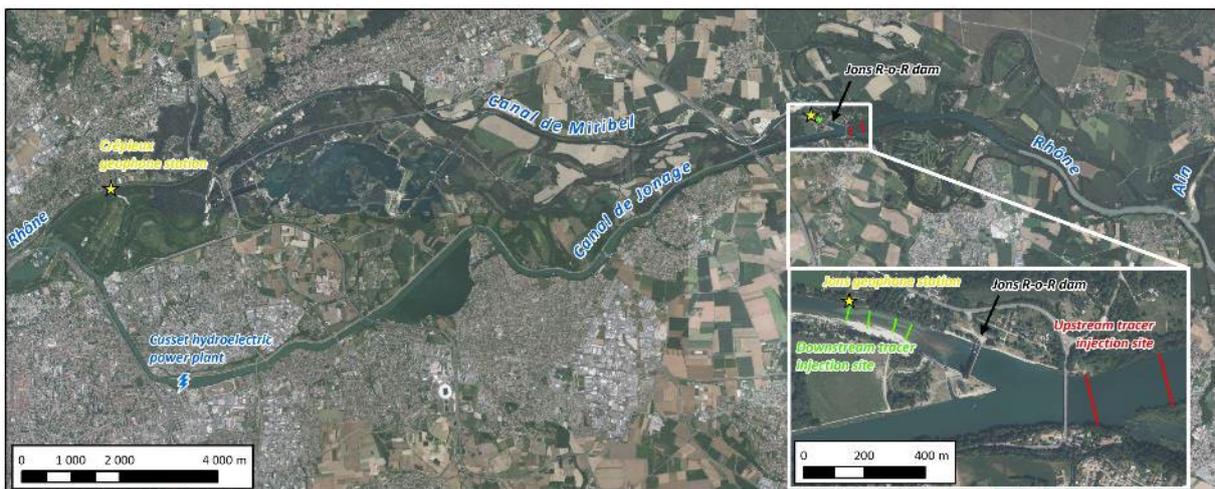


Figure 8. Carte de localisation : (A) du Canal de Miribel et du barrage de Jons sur le Rhône en amont de Lyon ; (B) des dispositifs de suivi du transport sédimentaire (charrriage)

Le secteur étudié comprend deux sections distinctes, séparées par le barrage de Jons :

- la section amont (8 km), s'étendant de la confluence avec l'Ain jusqu'au barrage de Jons, placée sous l'influence de ce dernier ;
- la section aval (18 km), qui correspond au Canal de Miribel (lit court-circuité du Rhône).

Cette dernière est caractérisée par une dynamique fluviale qui a été profondément modifiée depuis le milieu du XIX^{ème} siècle par plusieurs phases d'aménagement : concentration des écoulements dans le canal de Miribel (entre 1848 et 1897), construction de la dérivation de Jonage (1894-1899) et du barrage de Jons (mis en service en 1937), exploitation des sédiments du lit mineur (depuis les années 1960 jusqu'au début des années 1990 ; Petit et al., 1996). Ces aménagements ont concouru à transformer le style en tresses du tronçon en un chenal unique relativement figé, l'ajustement des formes fluviales ne s'opérant plus que dans la dimension verticale.

Concernant le barrage de Jons, il faut préciser qu'il est composé de cinq passes à vannes wagon de 18 m de large. Elles permettent à l'ouvrage d'être mis en transparence sédimentaire pendant les épisodes de crue du Rhône (Figure 9). De la sorte, le barrage est partiellement effacé à partir d'un débit de 900 m³/s et totalement au-delà de 2100 m³/s (débit mesuré à l'amont du barrage ; T~2,4 ans ; Dépret et al., 2018).

En aval, dans le secteur court-circuité, le débit critique de mobilisation de la charge de fond est de l'ordre de 440 m³/s (soit 40 jours par an) d'après Petit et al. (1996). Selon ces mêmes auteurs, une mise en mouvement généralisée se produit pour un débit supérieur à 550 m³/s (soit 30 jours par an). Cette mobilité fréquente de la charge de fond et la section endiguée du chenal ont contribué à l'export rapide des sédiments, ce qui a entraîné un enfoncement du chenal de 2-3 m (moyenne calculée sur la période 1952-1996 ; Malavoi, 2000). Cette incision semble avoir été stoppée depuis les années 2000 suite à l'arrêt des extractions fin 1991 (Petit et al., 1996) et à la modification des pratiques de gestion du barrage de Jons. Ce dernier est actuellement considéré comme transparent pour la charge de fond, et l'essentiel des matériaux provenant de l'amont transite par le canal de Miribel.



Figure 9. Barrage de Jons (vue vers l'amont ; photo de M. Cassel)

Enfin, il faut souligner l'importance de maintenir une continuité sédimentaire non perturbée sur l'ensemble de ce secteur, qui se trouve au centre de nombreux enjeux, tant humains (production d'énergie électrique et d'eau potable pour la ville de Lyon, risque d'inondation, zone de loisirs) qu'environnementaux (maintien de la biodiversité, services écosystémiques). C'est pourquoi ce secteur a été largement étudié par le passé (liste des références dans Dépret et al., 2018), et a fait l'objet de différents plans de gestion sédimentaire et d'actions de restauration.

Il ressort de ces études que le barrage de Jons peut influencer la continuité sédimentaire entre l'Ain et le Canal de Miribel. De ce fait, les modalités de gestion des vannes du barrage permettent de contrôler le transit de la charge grossière et sa vitesse de transfert, et, par conséquent, le profil longitudinal du talweg en amont (dans la retenue) et en aval (dans le Canal de Miribel). Toutefois, malgré une bonne connaissance des relations morpho-sédimentaires entre les différents compartiments (Ain, Rhône, Canal de Miribel), les vitesses de déplacement de la charge de fond dans la retenue, au travers du barrage de Jons et dans le Canal de Miribel demeuraient encore inconnues, tant à l'échelle événementielle qu'à l'échelle pluriannuelle.

C'est pourquoi le site a été équipé de traceurs sédimentaires à deux reprises :

- un premier suivi, entre octobre 2016 (injection des traceurs) et septembre 2018 (dernier relevé) ;
- un second suivi, entre août 2020 (injection des traceurs) et octobre 2023 (dernier relevé).

Le présent rapport concerne uniquement le second suivi mais il intègre néanmoins les résultats du premier suivi. Une description détaillée du premier suivi se trouve dans les rapports de l'OSR4 (Dépret et al., 2018) et de l'OSR6 (Vázquez Tarrío et al., 2021).

2.2.2 Mise en place du suivi RFID

199 traceurs ont été injectés de part et d'autre du barrage de Jons en août 2020 (dans le cadre d'un stage de fin d'étude financé par le programme OHM Vallée du Rhône ; Cassel et al., 2021). Ces traceurs sont composés de galets artificiels synthétiques équipés de transpondeurs a-UHF (modèle COIN ID - 433.92MHz ; Cassel et al., 2017). Ils sont équirépartis entre quatre classes granulométriques : 32-45, 45-64, 64-96 et 96-128 mm. La moitié d'entre eux a été injectée et géolocalisée en amont du barrage et l'autre moitié en aval du barrage, soit :

- 100 traceurs dans le réservoir, le long de 2 profils en travers (50 traceurs par profil) localisés à respectivement 660 m (profil Amont 1) et 400 m (profil Amont 2) du barrage ;
- 99 traceurs le long de 4 profils en travers situés 240 m (profil AV1), 300 m (profil AV2), 370 m (profil AV3) et 440 m (profil AV4) à l'aval du barrage (Figure 8).

Depuis leur injection (S0, en août 2020), la position de ces traceurs a été relevée à 4 reprises (S1 à S4) dans le cadre des programmes OSR5, Greendam et OSR6. Il est important de préciser que ces prospections ne concernent que le secteur situé en aval du barrage de Jons, le réservoir du barrage n'étant pas prospectable pour des raisons techniques (profondeur trop importante compte tenu des distances de détection des traceurs sous l'eau ; Cassel et al., 2017).

Le premier relevé (S1) avait été réalisé après deux petits évènements hydrologiques dont le débit a légèrement dépassé la valeur de Q_c initialement calculée par Petit et al. (1996 ; cf *infra* ; Figure 34 et Tableau 21). D'après ce relevé, seuls 6 traceurs (sur les 42 retrouvés) ont parcouru une distance supérieure à 50 m (distance seuil de mobilisation ; Cassel et al, 2021). Cette crue a entraîné un déplacement des traceurs sur une distance moyenne et maximale de 23 m et 104 m, respectivement.

Le deuxième relevé (S2) s'est, quant à lui, déroulé durant 4 jours (19 - 23 avril 2021), avec un jour de prospection à pied des bancs émergés et trois jours de prospection en bateau. Ce relevé a fait suite à une période hydrologique caractérisée par deux pics de crue largement supérieurs au Q_c ($Q_{max} = 1894 \text{ m}^3/\text{s}$, le 24/10/2019). Il met en évidence un transport solide marqué (80 % d'éléments mobiles), avec une distance mobilisée moyenne de 735 m (distance max.: 2566 m).

Le troisième relevé (S3) a également duré 4 jours (27 - 30 septembre 2021), avec la même répartition de jours de prospection pédestre/bateau. La période hydrologique associée à ce relevé comprend deux pics de crue $> Q_c$ ($Q_{max} = 2048 \text{ m}^3/\text{s}$ le 17/07/2021). Les caractéristiques

du déplacement des traceurs sont semblables à celles du relevé S2, à savoir 74 % d'éléments mobiles et une distance mobilisée moyenne de 644 m (distance max.: 2435 m).

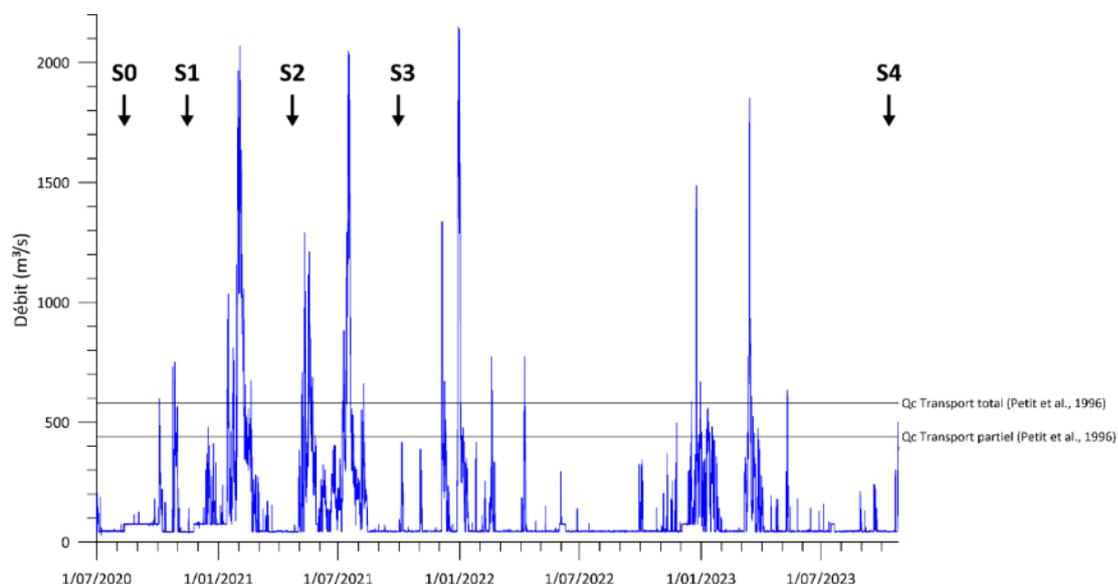


Figure 10. Canal de Miribel : hydrogramme et relevés RFID. Débit horaire fourni par EDF (débit déversé au barrage de Jons comprenant les fuites et le débit de la passe à poissons)

Tableau 6. Canal de Miribel : caractéristiques des prospections et des périodes hydrologiques associées aux relevés RFID

n°	Date de fin	Temps de prospection (h)	Surface prospectée (ha)	Nbre d'éléments retrouvés	% de retour	Nbre d'événements > Qc	Q _{max} (m ³ /s) + date du Q _{max}
S1	16/11/2020	1	1.2	38	19	2	751 (27/10/2020)
S2	23/04/2021	~28	22	107	53	2	2068 (2/02/2021)
S3	30/09/2021	~28	42	104	52	2	2048 (17/07/2021)
S4	19/11/2023	56	67	98	49	7	2148 (30/12/2021)

Tableau 7. Canal de Miribel : synthèse des relevés RFID

n°	Nbre d'éléments déduits	Nbre total d'éléments	% de retour (avec éléments déduits)	Nombre d'éléments mobilisés / éléments communs avec levé précédent (%)	Dist. moy. (m)	Dist. max. (m)
S1	4	42	21	6/42 (14)	23	104
S2	1	108	54	24/30 (80)	735	2566
S3	2	106	53	62/84 (74)	644	2435
S4	NA	98	49	51/76 (67)	487	2613

2.2.3 Le nouveau relevé RFID

Prospection

Le dernier relevé des traceurs RFID (S4) a nécessité 56h de prospection, réparties en plusieurs jours sur les mois de septembre et octobre 2023 (Tableau 22). Il porte sur un tronçon de 10 km de long du Canal de Miribel (distance mesurée selon l'axe du chenal), tandis que la distance prospectée parcourue totalise 121 km, soit 98 km en bateau et 23 km à pied (Figure 11). Ce relevé fait suite à une période de 2 ans caractérisée par 6 crues mobilisatrices, comprenant la crue la plus importante de ce suivi RFID, dont le débit a atteint 2148 m³/s (30/12/2021 ; Figure 34 et Tableau 21).

Ce relevé a permis de géolocaliser 98 traceurs, ce qui représente un bon pourcentage de retour (49 %), compte tenu du fait que ni la retenue du barrage ni le canal de Jonage ne peuvent être prospectés pour des raisons techniques (profondeur trop importante ne permettant pas de détecter les traceurs RFID).

Tableau 8. Canal de Miribel : caractéristiques de la prospection associée au relevé S4

Date	Opérateur	Q Jons (m ³ /s)	Type de prospection	Forme prospectée	Temps (h)	Linéaire (m)
4/09/2023	2 (EVS)	~45 (Qr)	A pied	Bancs émergés (+ bordures)	7	6960
5/09/2023 AM	3 (EVS)	45 - 130	En bateau et à pied	Thalweg et bancs émergés (+ bordures)	4.5	5960
5/09/2023 PM	3 (EVS)	45 - 90	A pied	Bancs émergés (+ bordures)	1	1348
07-09-23	3 (EVS)	~45 (Qr)	En bateau	Thalweg	8.5	19830
08-09-23	3 (EVS)	~45 (Qr)	En bateau	Thalweg	7.5	22145
11-09-23 AM	2 (EVS)	~45 (Qr)	En bateau	Thalweg	1.5	6688
11-09-23 PM	2 (EVS)	~45 (Qr)	A pied	Bancs émergés (+ bordures)	5	5445
12-09-23	2 (EVS)	~45 (Qr)	En bateau	Thalweg	6.5	20035
22-09-23	1 (EVS)	45 - 75	A pied	Bancs émergés (+ bordures)	1.5	4160
26-09-23	2 (EVS)	~45 (Qr)	En bateau	Thalweg	1	890
12-10-23	1 (EVS)	~45 (Qr)	A pied	Bancs émergés (+ bordures)	5.5	4867
16-10-23	2 (EVS)	~45 (Qr)	En bateau	Thalweg	6.5	22156

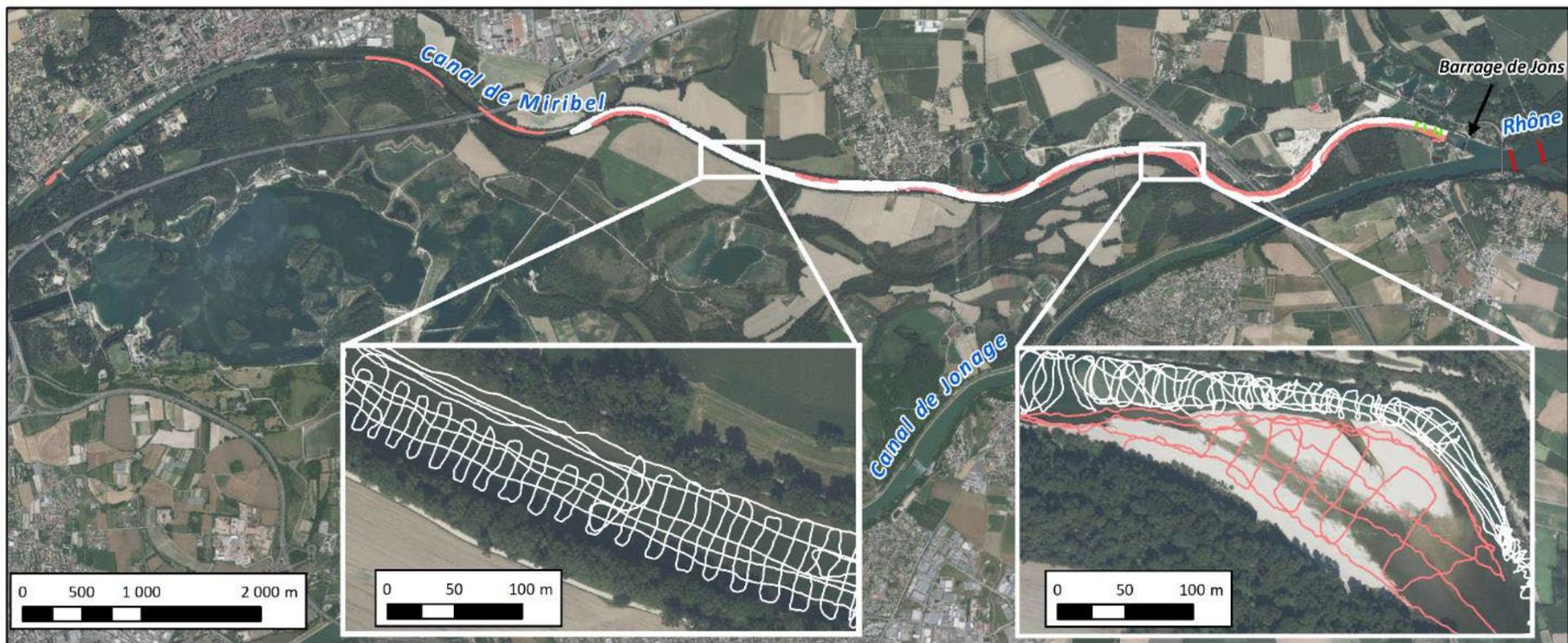


Figure 11. Canal de Miribel : prospection lors du relevé S4 (le trait rouge indique la prospection réalisée à pied et le trait blanc la prospection effectuée en bateau)

Analyse de la position des traceurs

Le relevé S4 met en évidence une dispersion des traceurs sur une distance d'environ 4,5 km et 5,8 km pour les traceurs des injections amont et aval, respectivement (Figure 12). Les traceurs sont principalement localisés sur les radiers et les bancs de convexité. De plus, la forte concentration d'éléments de la classe granulométrique la plus grossière (92-128 mm) sur le premier radier amont suggère un seuil de compétence proche de 92 mm.

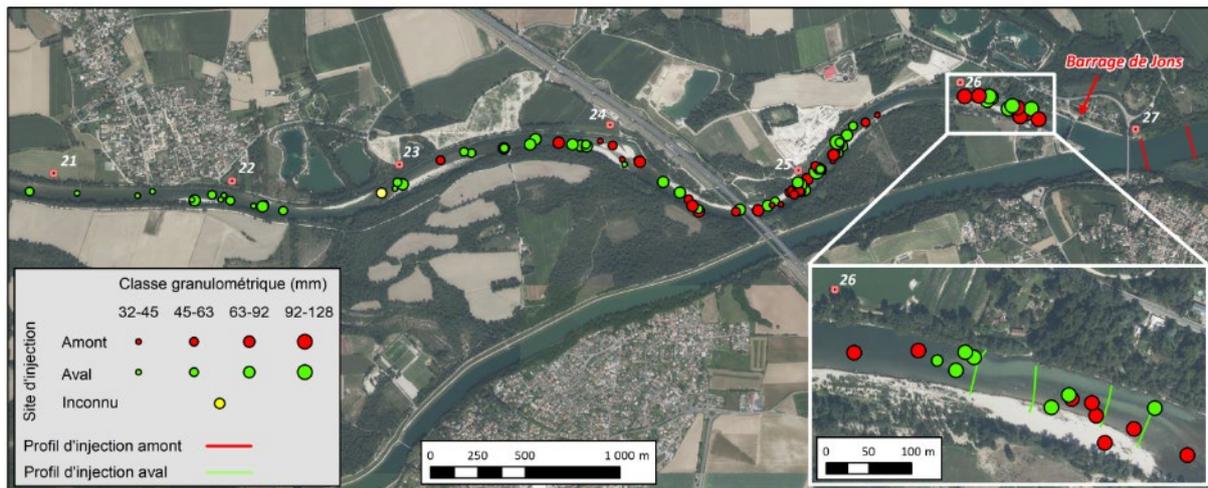


Figure 12. Canal de Miribel : position des traceurs pour le relevé S4

2.2.4 Eléments de synthèse

Détermination du débit critique de mise en mouvement

Le Q_c (débit critique de mise en mouvement) a été déterminé sur la base de plusieurs approches.

Tout d'abord, l'approche utilisée par Petit et al. (1996), basée sur la technique de marquage par placette sur 2 bancs de convexité, indique un début de mobilisation de la charge de fond pour un débit de l'ordre de $440 \text{ m}^3/\text{s}$ et un transport généralisé pour $580 \text{ m}^3/\text{s}$.

Grâce aux résultats des marquages RFID, une relation " Q_{max} vs. distance moyenne" a pu être établie pour chacune des classes granulométriques, ainsi que pour l'ensemble des traceurs (toutes classes granulométriques confondues) (Figure 13). Sur la base de l'équation de la droite de régression qui s'ajuste sur les quatre couples de points ($y = 0,4381 x - 296,21$; $R^2 = 0,86$), il a été possible de déterminer le Q_c (qui correspond à une distance de 0 m, soit le début de la mobilisation). Ce dernier est égal à $676 \text{ m}^3/\text{s}$ toutes classes granulométriques confondues. Quant aux relations établies par classe granulométrique, elles ne fournissent pas de résultats cohérents. En effet, bien que l'effet de taille des particules soit visible (moindres distances parcourues pour la classe 92-128 mm), cette approche ne fournit pas des Q_c par classe granulométrique suffisamment robustes, et ce pour deux raisons. Tout d'abord, en raison du faible nombre de points sur lesquels repose la droite de régression, en particulier les points associés à de faibles et moyennes valeurs de débit. Ensuite, parce que le seul point associé à un faible débit (S_0-S_1) correspond au premier relevé après l'injection des traceurs

RFID. Or, d'après la littérature (Houbrechts et al., 2015 ; Vázquez-Tarrío et al., 2019), il s'avère que le premier relevé (S_1) après l'injection des traceurs montre généralement des distances surévaluées du fait des conditions d'arrangement non naturelles des particules (faible imbrication des traceurs parmi les particules constituant le lit). Davantage de relevés, en particulier pour de faibles et moyennes valeurs de débit permettraient de construire des relations fiables pour chaque classe granulométrique.

Notons également les valeurs théoriques de Q_c obtenues par les formules de Schoklitsch et de Bathurst (981 m^3/s et 1080 m^3/s , respectivement ; Vázquez-Tarrío et al., 2021).

Enfin, l'analyse du signal géophonique (*cf. infra*) permet également d'estimer le Q_c en identifiant le début des pics de signal géophonique (rupture de pente dans la courbe d'évolution du signal au cours du temps).

Ces différentes approches mettent en évidence des valeurs de Q_c comprises entre 440 et 1080 m^3/s . Il faut toutefois préciser : (i) que ces valeurs ne concernent pas la même échelle (échelle du Canal de Miribel pour les approches théoriques vs. échelle du secteur ou de la forme pour les approches de terrain) et (ii) que ces valeurs seuils ne désignent pas systématiquement le même degré d'intensité du processus de charriage (début de la mise en mouvement vs. transport généralisé). Finalement, comme le secteur étudié par traçage sédimentaire se trouve dans la partie amont du Canal de Miribel, à savoir la même partie que celle étudiée par géophone et par traçage par placettes (Petit et al., 1996), on retiendra les valeurs mises en évidence par Petit et al. (1996), soit 440 m^3/s pour le début de mobilisation de la charge de fond et 580 m^3/s pour le transport généralisé.

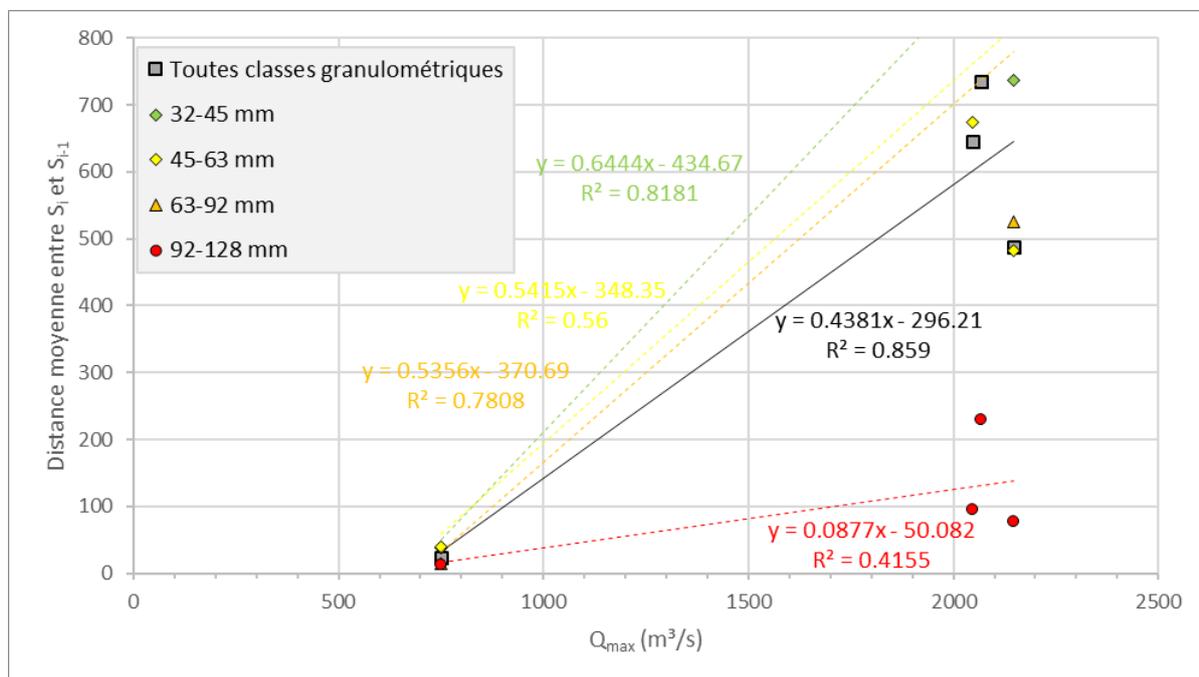


Figure 13. Le Canal de Miribel : relation établie entre le Q_{max} de la période comprise entre 2 relevés successifs ($S_{i-1} - S_i$) et la distance moyenne des traceurs durant cette période

Pourcentage de récupération

Les pourcentages de récupération ont été calculés selon : (i) la classe granulométrique (axe b) des traceurs, (ii) le site d'injection et (iii) la distance latérale du traceur par rapport au centre du chenal (Figure 38). Tout d'abord, l'absence de prospection dans la retenue se marque par un moindre taux de retour pour l'injection amont que pour l'injection aval. Ensuite, il apparaît que les pourcentages de récupération sont moindres pour les traceurs de la classe granulométrique la plus grossière (92-128 mm) par rapport aux autres classes granulométriques, ce qui s'explique par des distances de déplacement moins importantes pour les éléments grossiers localisés dans la retenue (les éléments plus fins ayant en partie quitté la retenue). Enfin, il apparaît une relation décroissante entre la distance au centre du chenal et le pourcentage de récupération, ce qui pourrait également s'expliquer par un comportement différencié des traceurs de l'injection amont (retenue). De la sorte, les traceurs situés à proximité des berges auraient tendance à parcourir de plus faibles distances ou à prendre la direction du Canal de Jonage (pour ceux proches de la rive gauche), à l'inverse des traceurs proches du centre du chenal.

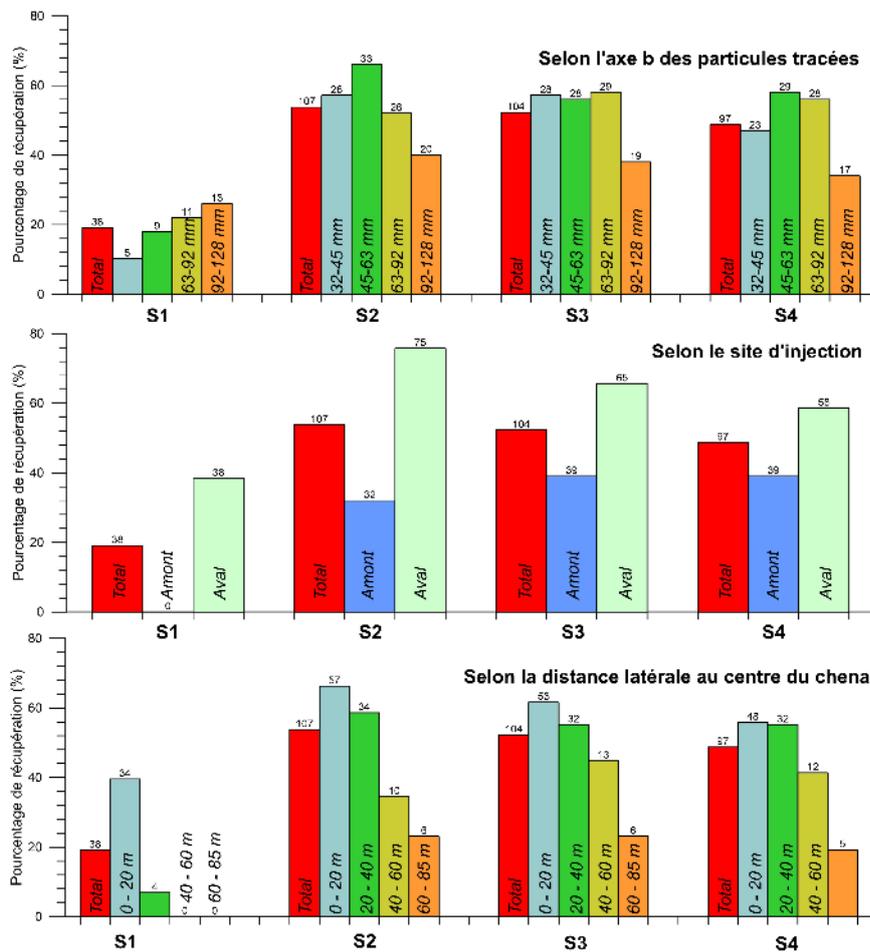


Figure 14. Le Canal de Miribel : pourcentages de récupération des 4 relevés RFID présentés selon l'axe b des particules tracées (en-haut), selon le site d'injection (au milieu) et selon la distance latérale par rapport au centre du chenal (en bas) (les numéros surmontant les histogrammes se réfèrent aux nombres de particules retrouvées)

Analyse de la position des traceurs et des distances parcourues

La Figure 38 représente la dernière position connue des différents traceurs en fonction de l'axe b. Concernant l'injection amont, il apparaît que :

- Sur les 100 traceurs injectés dans le réservoir, 47 n'ont pas été retrouvés. Une analyse approfondie sera développée ci-dessous (cf. § Impact du barrage de Jons sur le charriage) pour déterminer leur localisation la plus probable ;
- D'après les 53 traceurs retrouvés, le barrage est transparent pour toutes les classes granulométriques marquées ;
- Par contre, à l'aval du barrage, les traceurs de la classe granulométrique la plus grossière (92-128 mm) n'ont pas été déplacés au-delà du premier radier, ce qui confirme un seuil de compétence proche de 92 mm dans le secteur en aval du barrage.

Concernant l'injection aval, l'analyse de la position des traceurs met également en évidence des déplacements différenciés entre la classe granulométrique la plus grossière (92-128 mm ; éléments dispersés sur 1,4 km jusqu'au 2e radier) et les éléments plus fins (32-128 mm ; éléments dispersés sur 5,8 km).

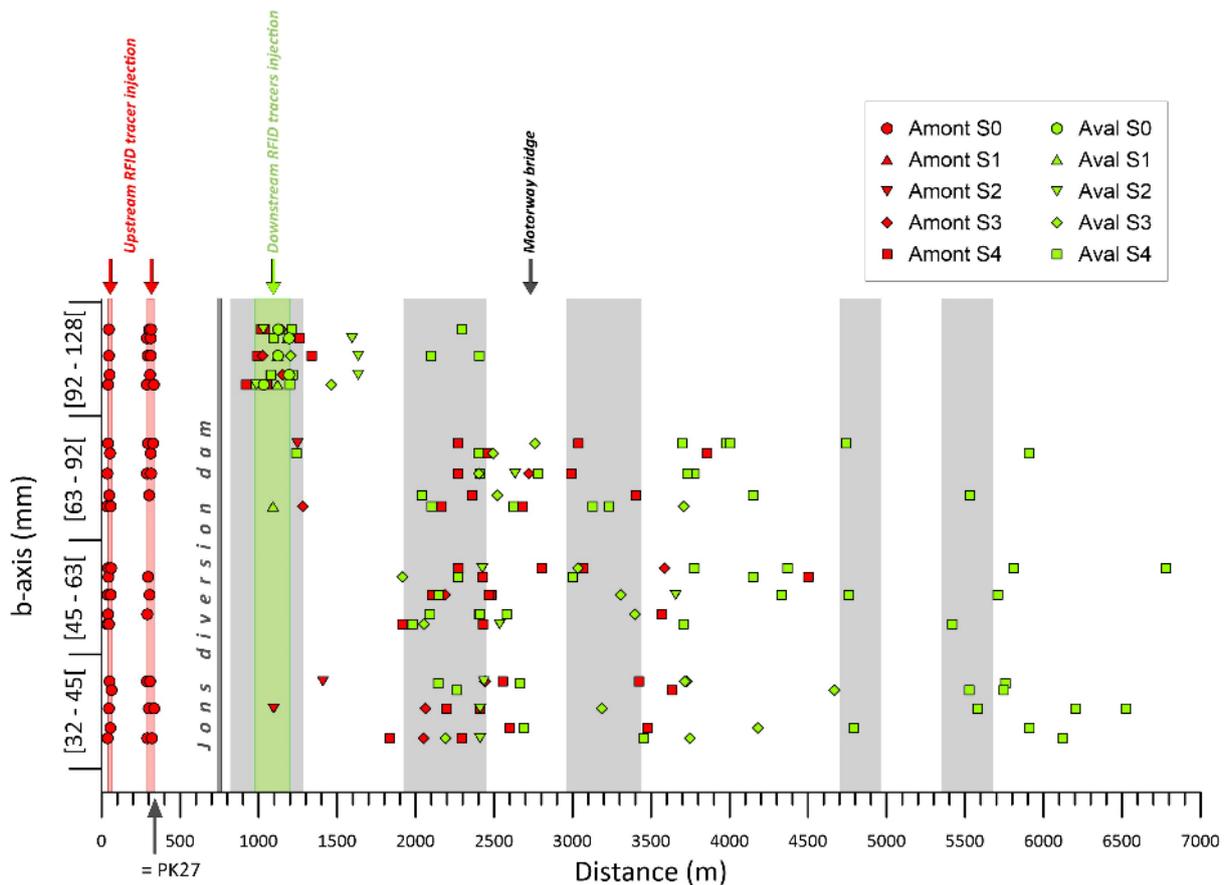


Figure 15. Le Canal de Miribel : Position et taille (axe b) des traceurs pour le relevé S4

La comparaison des distances en la position d'un relevé donné (S_i) et le point d'injection S_0 (Tableau 9Tableau 5) permet de mieux comprendre la dynamique du transit en fonction de l'hydrologie et des processus internes influençant la mise en mouvement. Ainsi, la

comparaison des relevés S_3 et S_0 met en évidence une distance moyenne de 2359 m sur une période de 3,3 ans, ce qui correspond à une vitesse moyenne de 721 m/an. Pour les relevés S_2 et S_3 , la vitesse moyenne est plus élevée (~1570 m/an) malgré un nombre de crues morphogènes plus faible, ce qui indique une diminution de la vitesse de transport au cours du temps. En outre, l'augmentation continue de l'écart-type suggère une dispersion des traceurs au fil du temps (et non une translation du panache de traceurs), notamment en lien avec le transport différencié des éléments grossiers (92-128 mm) et fins (32-92 mm).

Tableau 9. Le Canal de Miribel : comparaison des relevés RFID (S_i) avec l'injection (S_0)

n° (+ durée de la période en années)	Nombre d'éléments mobilisés / éléments communs avec S_0 (%)	Dist. moy. (m)	Ecart-type (m)	Dist. max. (m)
S1 vs. S0 (0,3)	6/42 (14)	23	26	104
S2 vs. S0 (0,7)	100/108 (93)	1087	557	2661
S3 vs. S0 (1,1)	100/106 (94)	1770	1025	4932
S4 vs. S0 (3,3)	92/98 (95)	2359	1415	5660

Influence de la taille des particules sur les distances de transport

L'analyse des distances par classe granulométrique de la Figure 16 confirme le seuil de compétence proche de 92 mm. A l'exception du relevé S_1 , tous les relevés montrent des distances médianes parcourues moins importantes (1 ordre de grandeur) pour les éléments dont l'axe b est supérieur à 92 mm que pour les autres éléments (Axe $b < 92$ mm). Cette figure montre également des distances médianes moins importantes pour le relevé S_4 que pour les relevés S_2 et S_3 , et ce malgré une période hydrologique comportant plus de crues morphogènes, ce qui confirme la diminution de la vitesse de transport sur le moyen terme (3,3 ans).

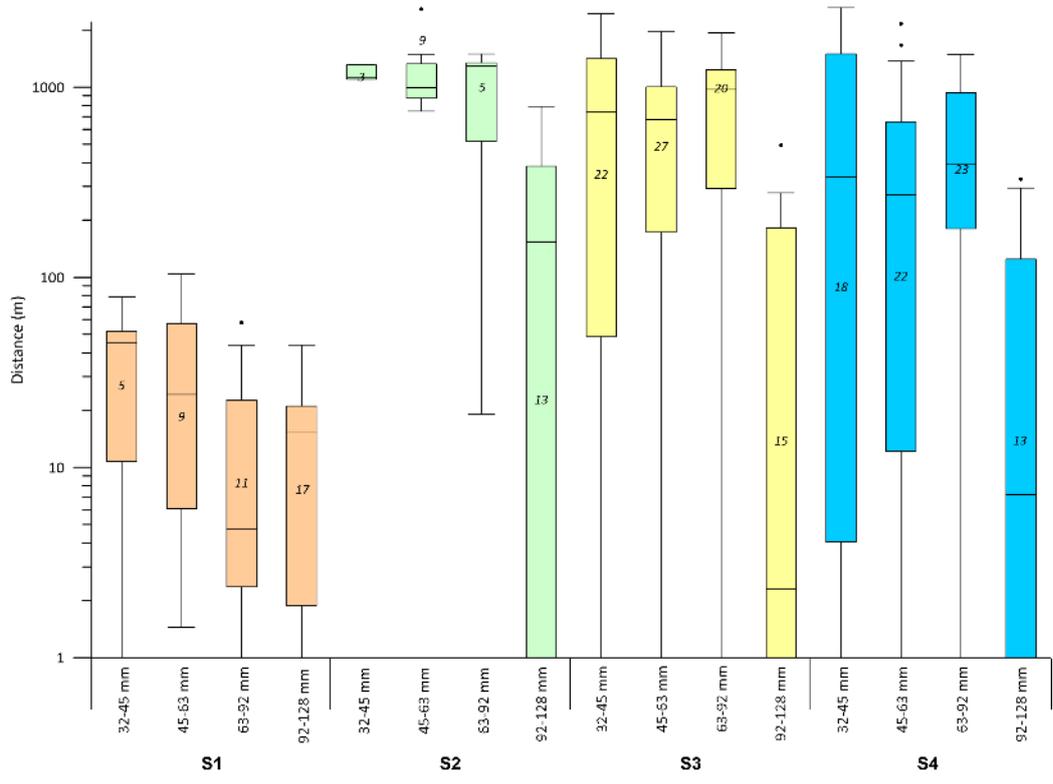


Figure 16. Le Canal de Miribel : distances de transport par classe granulométrique

Impact du barrage de Jons sur le charriage

L'objectif de cette partie est d'évaluer l'impact du barrage de Jons sur le charriage, plus exactement en termes de distances de déplacement. Pour déterminer si un ralentissement du transport de la charge de fond a lieu dans la retenue, les distances de transport des injections amont (retenue du barrage) et aval ont été comparées. Toutefois, ce travail a été rendu compliqué en raison de l'absence de prospection dans la retenue du barrage. En effet, cette dernière présente des profondeurs trop importantes, qui ne permettent pas la détection des traceurs sur le fond du lit avec les antennes utilisées. Dès lors, le calcul des distances parcourues par les traceurs de l'injection amont ne peut se faire que lorsqu'ils sont retrouvés à l'aval du barrage, où les conditions de détection sont bonnes. Aussi, lorsqu'un traceur de l'injection amont est retrouvé en aval du barrage en S_i , il ne peut être comparé qu'avec sa position d'injection (S_0) car sa position en S_{i-1} n'est pas connue (dans la retenue). C'est pourquoi le calcul des distances de déplacement pour ce travail de comparaison (amont vs. aval) a été réalisé sur la base des distances $S_i - S_0$. Il faut aussi préciser que les métriques de distance pour les traceurs de l'injection amont ne sont calculées que sur la population des traceurs qui ont franchi le barrage entre S_i et S_{i-1} , les traceurs qui ont franchi le barrage auparavant ayant connu des conditions hydrauliques mixtes (i.e., dans la retenue d'abord, en aval du barrage ensuite).

Ce travail de comparaison est délicat car, pour les traceurs de l'injection amont, il repose sur de faibles échantillons de traceurs en raison de l'absence de prospection dans la retenue (Tableau 10). Néanmoins, il en ressort que :

- Aucun traceur n'a franchi le barrage en S1, soit après une période caractérisée par deux petits événements hydrologiques $> Q_c$ (Figure 17) ;
- 32 traceurs ont quitté la retenue en S2. Leur distance moyenne (1106 m) est similaire à celle calculée pour les traceurs de l'injection aval (1078 m) ;
- en revanche, une différence se marque pour le relevé S3, qui indique une distance moyenne cumulée plus importante pour les traceurs de l'injection aval (1833 m) que pour ceux de l'injection amont (1199 m). Cette différence s'explique par la présence d'éléments principalement grossiers parmi les 13 traceurs de l'injection amont retrouvés en S3, ces éléments parcourant de moindres distances (*cf. supra*) ;
- enfin, pour le dernier relevé (S4), les déplacements effectués par les deux populations de traceurs sont similaires (+ ~650 m de distance moyenne cumulée).

Au final, avec les précautions associées aux faibles échantillons de traceurs utilisées pour calculer les métriques de distance, ces premiers résultats indiquent que le transport de la charge de fond est peu affecté par le barrage de Jons, du moins pour les 700 premiers mètres de la retenue en amont immédiat du barrage (à savoir le secteur étudié par traçage sédimentaire). Ces résultats ne concernent pas le reste de la retenue (partie amont). Davantage de relevés des traceurs RFID, couplés avec une analyse topo-bathymétrique et sédimentologique, apporterait toutefois plus de robustesse aux résultats.

Tableau 10. Le Canal de Miribel : comparaison des distances de transport entre l'amont (retenue) et l'aval du barrage de Jons

	AMONT			AVAL		
	n traceurs passant le barrage entre S_i et S_{i-1}	Dist. moy. (m)	Dist. max. (m)	n traceurs	Dist. moy. (m)	Dist. max. (m)
S1 vs. S0	0	NA	NA	42	22	104
S2 vs. S0	32	1106	1619	76	1078	2661
S3 vs. S0	13	1199	2248	67	1833	4932
S4 vs. S0	8	1854	2751	58	2467	5660

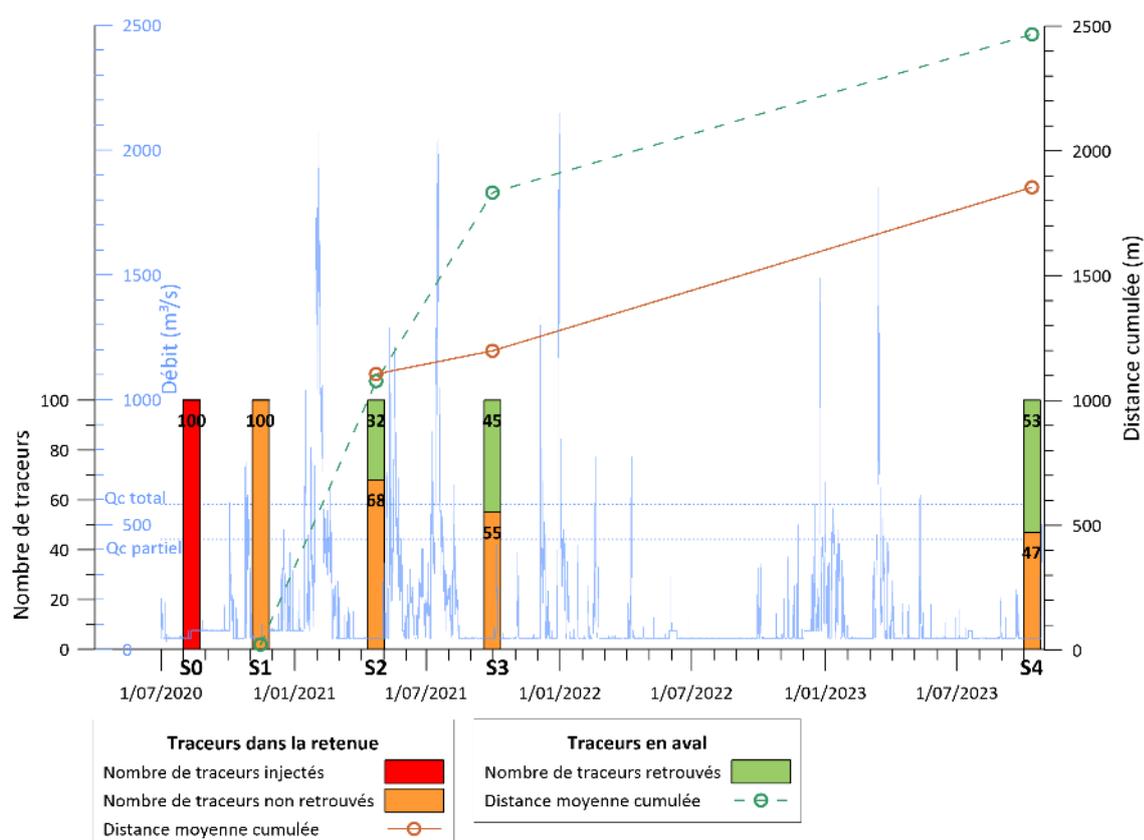


Figure 17. Le Canal de Miribel : évolution du nombre de traceurs quittant la retenue du barrage de Jons (histogrammes) et distance moyenne cumulée des traceurs des injections amont et aval (courbes cumulatives)

Au terme des 3,3 ans de ce suivi (S0 - S4), il apparaît que 53 traceurs de l'injection amont ont franchi le barrage de Jons et que 47 traceurs n'ont pas été retrouvés (Figure 17). Ces derniers ont des diamètres variés (i.e., toutes classes granulométriques représentées ; Figure 18). En l'absence de prospection dans la retenue et dans le canal de Jonage, leur localisation ne peut qu'être déduite sur la base de : (i) leur position d'injection (profil amont/aval et distance latérale par rapport au centre du chenal), (ii) leur taille, et (iii) la configuration spatiale du site. D'une manière générale, les traceurs non retrouvés peuvent être localisés à trois endroits : (i) dans la retenue du barrage de Jons, (ii) dans le Canal de Jonage, et (iii) en aval du barrage (auquel cas ils n'auraient pas été détectés lors des quatre prospections fines du secteur).

L'analyse de la ligne d'injection "profil amont 2", la ligne d'injection plus proche du barrage de Jons, montre que la plupart des traceurs non retrouvés se trouvent sur la moitié gauche du profil, quel que soit la taille des particules (Figure 18b). Compte tenu de la configuration du site, il est probable que ces traceurs aient pris la direction du Canal de Jonage (cette hypothèse ne pouvant cependant pas être vérifiée en l'absence de prospection dans le canal de Jonage). Parmi les traceurs non retrouvés de la moitié droite du "profil amont 2", 3 traceurs sont dans la classe granulométrique la plus grossière, ce qui pourrait impliquer qu'ils soient toujours en transit dans la retenue, les vitesses de transport étant plus limitées pour cette classe granulométrique. Enfin, pour les 2 traceurs de faible diamètre injectés dans la moitié droite du chenal, il n'est pas possible de déduire leur localisation.

En ce qui concerne la ligne d'injection "profil amont 1", les traceurs non retrouvés sont plus ou moins équirépartis entre les quatre classes granulométriques et possèdent des positions d'injection variées, ce qui ne permet pas de déduire leur localisation probable, à l'inverse du "profil amont 2". Comme ce profil d'injection se trouve 250 m en amont du "profil amont 2", il est possible que plusieurs de ces traceurs se trouvent encore dans le réservoir. De nouvelles prospections, consécutives à des crues morphogènes, permettront de retrouver davantage de traceurs en aval du barrage, ce qui apportera de nouveaux éléments de compréhension sur les trajectoires de transport de ces traceurs. En outre, une modélisation hydraulique 2D permettrait également de mieux comprendre le transport des sédiments grossiers dans cette partie de la retenue.

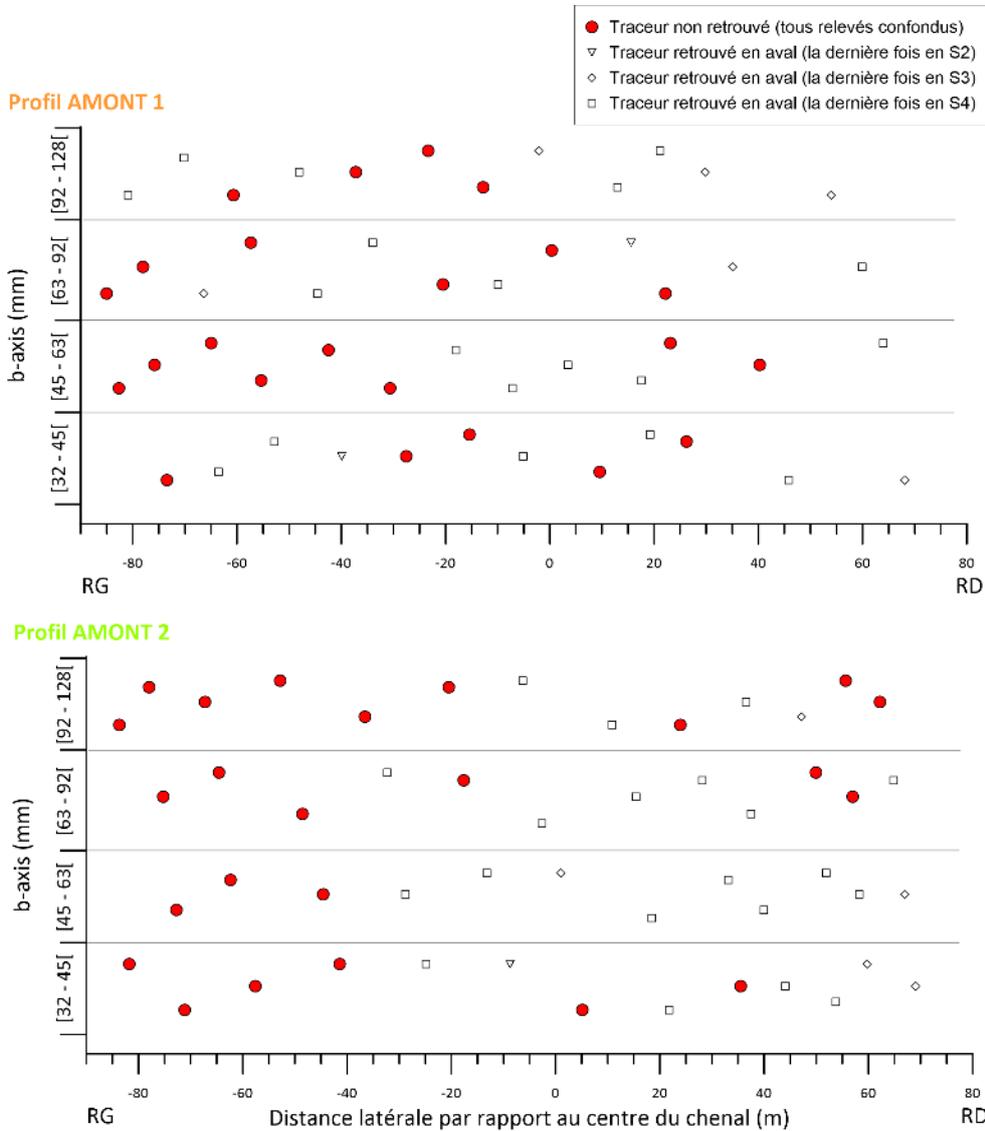
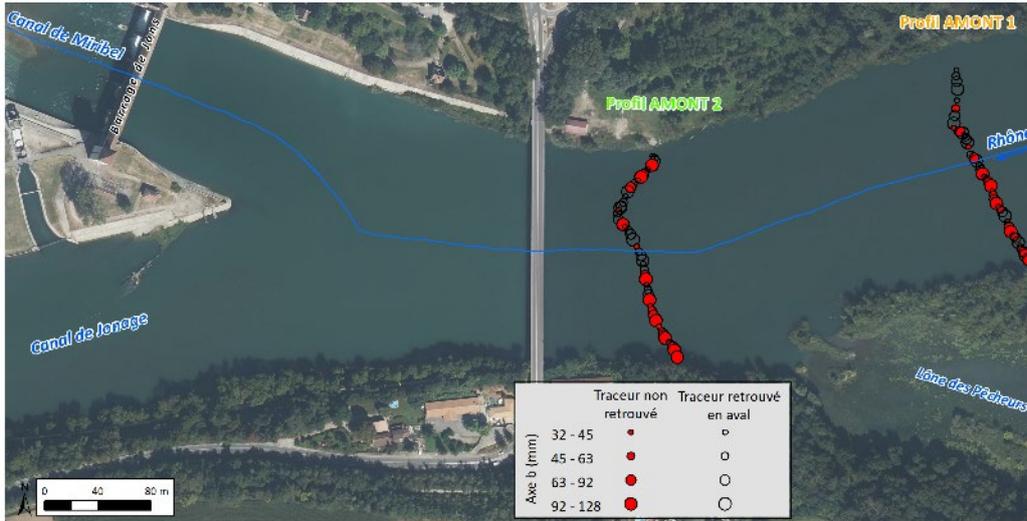


Figure 18. Le Canal de Miribel : Traceurs de l'injection amont retrouvés et non retrouvés en aval du barrage de Jons : (haut) cartographie de leur position d'injection, (bas) représentation de leur distance latérale par rapport au centre du chenal en fonction de leur diamètre

2.3 Le Vieux Rhône de Péage-de-Roussillon : l'île des Gravieres

2.3.1 Action de restauration et premiers suivis RFID

Sur le Vieux Rhône de Péage-de-Roussillon, un linéaire de 1200 m de berge a été désartificialisé à l'intérieur du périmètre de la Réserve Naturelle Nationale de la Platière (en rive gauche du Vieux Rhône, au niveau de l'île des Gravieres). Le démantèlement des casiers de la berge entrepris par la CNR entre décembre 2016 et mars 2017 avait pour objectif de réactiver la dynamique sédimentaire par érosion de berge, ce qui devrait avoir pour effet d'améliorer les habitats aquatiques dans le Vieux Rhône. Il faut également noter que, suite aux premières crues post-travaux (hiver 2017-2018), de nouveaux blocs d'enrochement ont été exhumés, ce qui a nécessité une nouvelle intervention en décembre 2018 destinée à rompre la carapace en formation et à réactiver davantage les processus de remise en mouvement des particules.

Afin de mieux comprendre et évaluer la réactivation du transport sédimentaire et l'érosion de la berge après le démantèlement des casiers, un suivi RFID avait été mis en place en 2019 dans le cadre de l'action A.2.4 du programme OSR5 ; ceci en étroite collaboration avec les gestionnaires de la Réserve Naturelle (Vázquez-Tarrío et al., 2021). Ainsi, 999 traceurs équirépartis selon quatre classes granulométriques (Tableau 11) avaient été déployés le 5 février 2019 (S0) sur cinq zones réparties d'amont en aval le long de la zone de réactivation de la berge restaurée en rive gauche du chenal (Figure 19).

Tableau 11. L'île des Gravieres : répartition par classes granulométriques des traceurs injectés

Classes granulométriques (mm)	16 - 32	32 - 45	45 - 64	64 - 80	Total
Nb de traceurs	250	250	249	250	999
Part des traceurs	25%	25%	25%	25%	
Fréquences cumulées	0.25	0.50	0.75	1	



Figure 19. L'île des Graviers : (A) localisation des sites d'injection des traceurs RFID ; (B) répartition par classes granulométriques

Par la suite, deux relevés de la position des traceurs (S1 et S2) ont été effectués (Figure 20 et Tableau 12).

Un premier suivi (S1) a été réalisé le 29 janvier 2020, à la suite d'une activité hydrologique caractérisée par 3 petites crues ($Q < Q_c$) et une crue plus importante dont le débit maximal ($1458 \text{ m}^3/\text{s}$) a dépassé le Q_c . La mobilisation engendrée par ces crues a été relativement modeste, avec 40 traceurs mobilisés (sur 789) et une distance moyenne de 8,8 m. Quelques particules, essentiellement dans la classe granulométrique 18-32 mm, ont néanmoins parcouru des distances plus importantes, jusqu'à 129 m (distance maximale ; Tableau 13). Cette faible mobilisation conforte les estimations de débit critique de mise en mouvement calculées à partir des formules de Schoklitsch adimensionnel ($Q_c = 1343 \text{ m}^3/\text{s}$) et Bathurst ($Q_c = 1453 \text{ m}^3/\text{s}$) (Vázquez Tarrío et al., 2021). En outre, ce relevé a permis de mener une analyse de l'incertitude de positionnement des particules (basée sur la position des doublons) et de déterminer une valeur seuil de mobilisation. Ainsi, un déplacement d'une particule doit être supérieur à 17,6 m pour considérer sa distance comme résultant effectivement d'un transport (Cassel et al., 2019).

Un deuxième suivi (S2) a été réalisé les 14 et 15 octobre 2020, après une période marquée par une seule crue mobilisatrice dont le débit a atteint $2117 \text{ m}^3/\text{s}$. Malgré ce débit plus important,

les déplacements mesurés lors de ce deuxième suivi sont légèrement plus faibles que pour le suivi S1, avec des distances moyenne et maximale de respectivement 5,6 m et 93 m (Tableau 13). Seulement 6 % des particules retrouvées se sont déplacées de 17,6 m ou plus. Comparée au relevé S1, cette faible mobilisation pourrait s’expliquer par un degré d’imbrication plus important des traceurs au sein des sédiments autochtones du bras restauré.

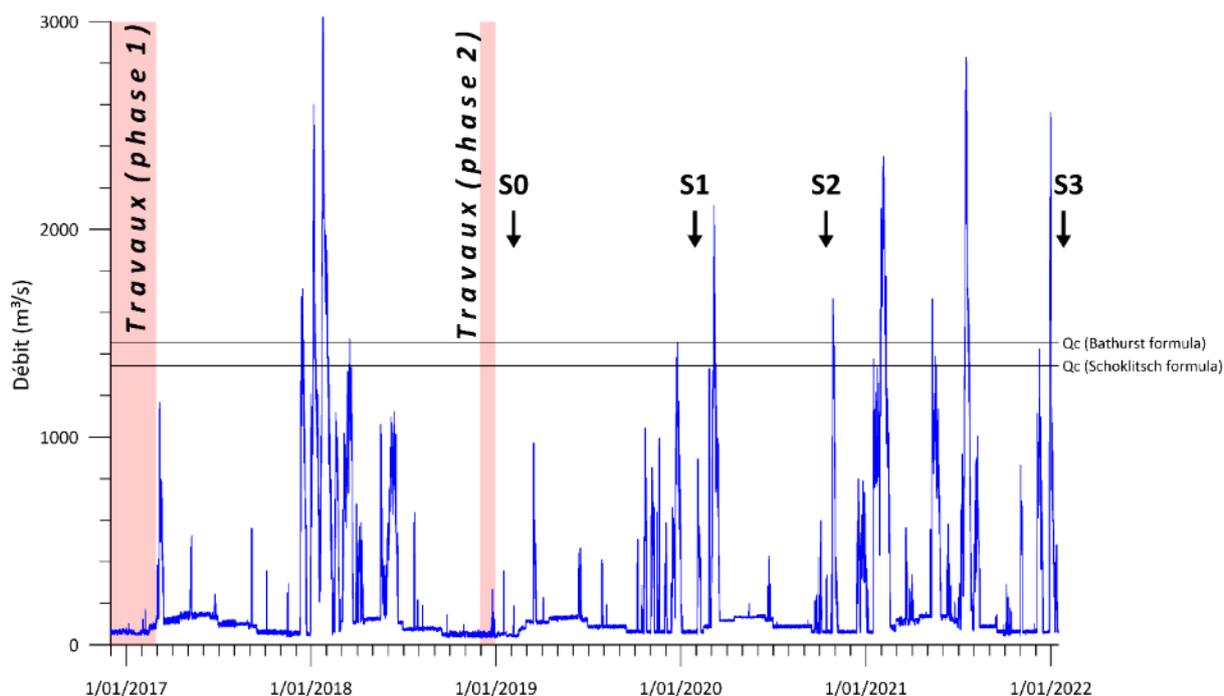


Figure 20. L’Île des Graviers : hydrogramme et relevés RFID. Débits horaires bruts et non validés fournis par la CNR (station limnigraphique située en aval du barrage de Saint-Pierre-de-Bœuf)

Tableau 12. L’Île des Graviers : caractéristiques des prospections et des périodes hydrologiques associées aux relevés RFID

n°	Date	Temps de prospection (h)	Surface prospectée (ha)	Nombre d’éléments retrouvés	% de retour	Nbre d’événements > Qc	Q _{max} (m³/s) + date du Q _{max}
S1	29/01/2020	15	1,8	655	65	1	1458 (25/12/2019)
S2	14-15/10/2020	9	1,8	253	25	1	2117 (6/03/2020)
S3	26 et 31/01/2022	14	3,7	634	63	5	2828 (17/07/2021)

Pourcentage de récupération

Le détail des pourcentages de récupération calculés selon la classe granulométrique et selon la taille de la capsule RFID utilisée est représenté à la Figure 21. Bien que ce pourcentage

augmente légèrement avec la taille des particules et la taille de la capsule RFID, il ne montre dans l'ensemble pas de grandes disparités.

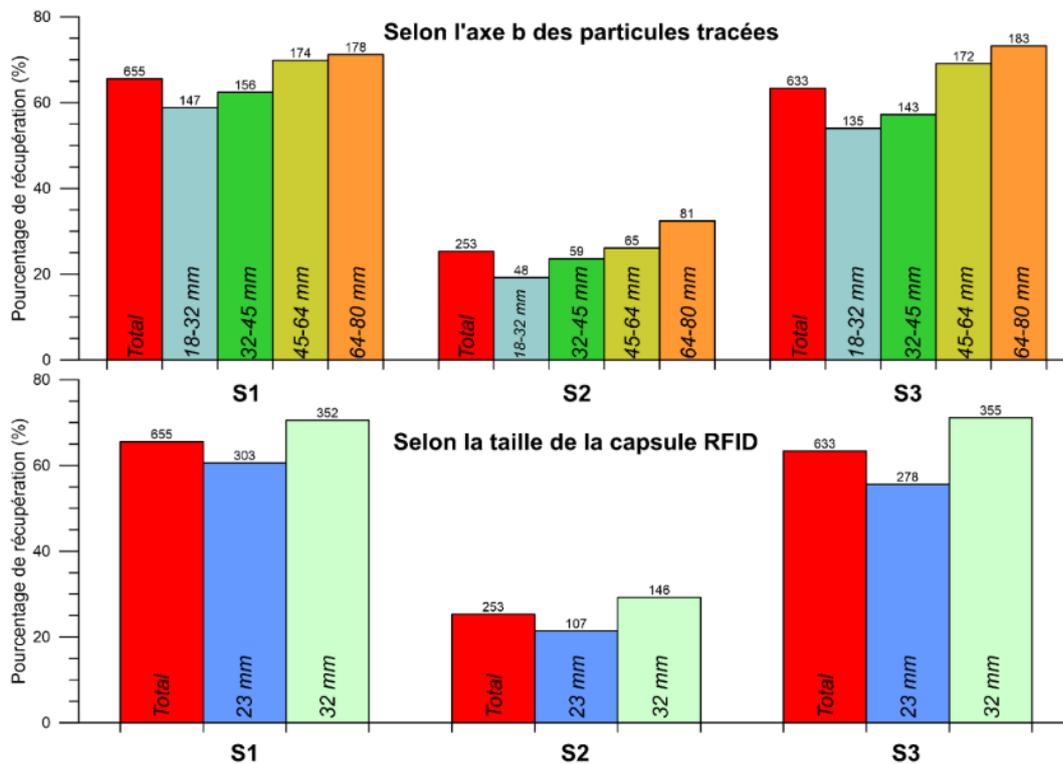


Figure 21. L'île des Gravier : pourcentages de récupération des 3 relevés RFID présentés selon l'axe b des particules tracées (en-haut) et selon la taille de la capsule RFID (en bas) (les numéros surmontant les histogrammes réfèrent aux nombres de particules retrouvées)

2.3.2 Le nouveau relevé RFID

Prospection

Un nouveau relevé (S3) a été réalisé les 26 et 31 janvier 2022 à la suite d'une période hydrologique caractérisée par 5 crues mobilisatrices, la plus importante d'entre-elles ayant atteint un débit de 2828 m³/s (Figure 20 et Tableau 12). Le relevé a été réalisé en collaboration avec le personnel de la Réserve Naturelle Nationale de la Platière. Il a mobilisé 3 opérateurs durant 2 jours, ce qui correspond approximativement à 12,5 h de temps de prospection. Le matériel utilisé comprend le boîtier de lecture RFID et le système DATAMAX. La prospection a nécessité l'utilisation de 2 antennes :

- une grande antenne, de forme rectangulaire (2,1 m sur 0,5 m), a été utilisée sur la plupart des bancs émergés et dans les zones de faible profondeur ;
- une petite antenne, de forme circulaire (0,5 m de diamètre), s'est avérée plus appropriée lorsque la végétation des bancs était trop contraignante (végétation ligneuse ne permettant pas de tracter la grande antenne).

En outre, la prospection a également été réalisée sur les dépôts récents de galets localisés en aval du secteur restauré. Ainsi, la surface prospectée à pied couvre 3,4 ha (Figure 22).

Enfin, un complément de prospection par bateau s'est déroulé le 27/04/2022 dans les zones les plus profondes (~0,3 ha). Il a permis de localiser 4 éléments qui n'avaient pas été retrouvés auparavant. Seules quelques zones, comportant de nombreux embâcles susceptibles d'entraver la navigation, n'ont pas pu être inspectées (Figure 22). De la sorte, le secteur restauré a été finement prospecté, fournissant un taux de récupération de 63 %. Au total, une superficie de 3,7 ha a été couverte.



Figure 22. L'Île des Gravieres : zone prospectée pour le relevé S3

Analyse à l'échelle du secteur

La position des traceurs du relevé S3 est représentée en Figure 23. L'analyse de la position des traceurs du relevé S3 permet de déduire la position de nombreux traceurs pour les relevés précédents (S1 et S2). Par exemple, si un traceur non identifié en S1 et S2 n'a pas parcouru une distance supérieure au seuil de mobilisation (17,6 m) entre S0 et S3, il sera considéré comme immobile, et sa position en S1 et en S2 sera ainsi déduite. De la sorte, 134 et 303 traceurs ont pu être déduits pour les relevés S1 et S2, respectivement. Ceci permet

d'augmenter considérablement le nombre d'éléments pris en compte dans l'analyse, comme l'ont montré précédemment Arnaud et al. (2017).

Le relevé S3 met en évidence une mobilité plus importante que pour les deux relevés précédents (S1 et S2), avec 16 % de traceurs mobiles parmi les traceurs communs avec le relevé S2 (Tableau 13). Les distances moyenne et maximale sont respectivement de 12,7 m et 230 m, ce qui est supérieur aux distances calculées pour les relevés précédents. Ceci est cohérent avec les caractéristiques de la période hydrologique correspondante.

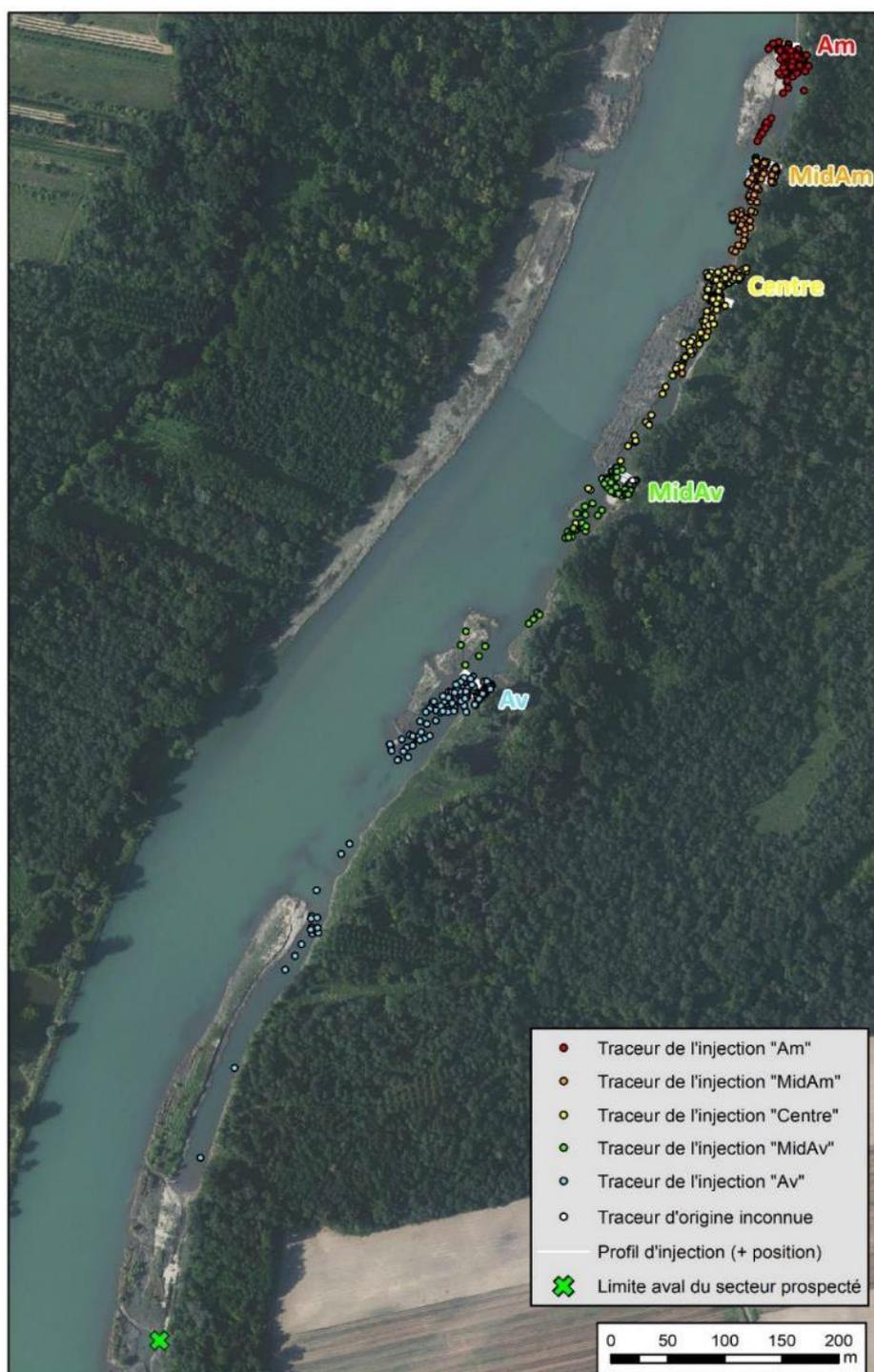


Figure 23. L'Île des Gravieres : localisation des traceurs pour le relevé S3

Tableau 13. L'Île des Graviers : synthèse des relevés RFID

n°	Nbre d'éléments déduits	Nbre total d'éléments	% de retour (avec éléments déduits)	Nombre d'éléments mobilisés / éléments communs avec levé précédent (%)	Dist. moy. (m)	Dist. max. (m)	D ₅₀ mob. (mm)	D ₉₀ mob. (mm)
S1	135	790	80	40/790 (5)	8.8	129	35	54
S2	304	557	56	31/539 (6)	5.6	93	34	54
S3	NA	634	63	79/500 (16)	12.5	230	41	73

D'une manière générale, ces trois relevés mettent en lumière un transport sédimentaire relativement faible, comparé aux autres RCC étudiés, dont celui du même secteur (cf. réinjection de la Platière, ci-dessous). Cette différence peut être attribuée à deux facteurs : (i) la position des traceurs en bordure du chenal, où ils sont soumis à des conditions hydrauliques locales probablement atténuées par rapport à celles s'exerçant au centre du chenal (effet de protection possible par les îlots végétalisés), et (ii) la présence d'un nombre inconnu de traceurs initialement injectés sur la berge et au-delà du sommet de la berge. Ces derniers ne semblent pas mobiles, comme l'indiquent les 125 traceurs retrouvés dans cette position en S3, ce qui entraîne une sous-estimation de la distance moyenne et, par conséquent, une sous-estimation de la vitesse de transport des sédiments.

Afin de s'affranchir de l'influence des traceurs immobiles situés au-delà du sommet de la berge, le calcul de la distance moyenne a été réitéré sans prendre en compte les 125 traceurs retrouvés sur les berges en S3 (Tableau 14). De la sorte, le relevé S3 présente une mobilité légèrement plus élevée, avec 21 % de particules mobilisées et 15,7 m de distance moyenne. En revanche, ces nouveaux calculs ne modifient presque pas les métriques de mobilité pour S1 et S2.

Tableau 14. L'Île des Graviers : synthèse des relevés RFID (en excluant les traceurs situés au-delà du sommet de la berge pour le relevé S3)

n°	Nbre total d'éléments	Nombre d'éléments mobilisés / éléments communs avec levé précédent (%)	Dist. moy. (m)	Dist. max. (m)
S1	666	40/666 (6)	8.7	129
S2	435	31/416 (7)	6.3	93
S3	509	80/378 (21)	15.7	230

Finalement, afin d'avoir une meilleure appréhension de la distance de transport sur le moyen terme (~3 ans), le relevé S3 a été comparé avec l'injection (S0). Ainsi, sur la base des 509 traceurs retrouvés en S3 (en excluant les traceurs situés au-delà du sommet de la berge), 244 traceurs ont effectué une distance supérieure à 17,6 m, ce qui correspond à 48 % d'éléments mobilisés. Sur la période de 3 ans, les traceurs ont donc parcouru une distance moyenne de

40,8 m et une distance maximale de 475 m (Tableau 15). Cette distance moyenne calculée pour la période de 3 ans correspond à une vitesse moyenne de 13,7 m/an.

Malgré cette faible mobilité, ces résultats démontrent que la remobilisation des galets est rendue possible par le démantèlement des ouvrages Girardon. Toutefois, les galets remobilisés n'ont jusqu'à présent pas rejoint le chenal principal. Au contraire, ils semblent rester dans le chenal secondaire formé par le démantèlement de la grande digue longitudinale (entre les îlots et la nouvelle berge). Bien qu'ils fournissent actuellement un habitat biogène dans le chenal secondaire, ces galets sont susceptibles à plus long terme de s'accumuler sur le banc de convexité en aval (au niveau de la fin du secteur restauré). La colonisation de ce banc par la végétation aurait probablement pour effet d'entraver la mobilité de ces galets. Ils ne constitueraient donc pas un apport sédimentaire au chenal principal. Le relevé des traceurs à plus long terme permettra d'éclaircir ce point.

Tableau 15. L'Île des Graviers : comparaison du dernier relevé RFID (S3) avec l'injection (S0) (en excluant les traceurs localisés sur la berge pour le relevé S3)

n°	Nbre total d'éléments	Nombre d'éléments mobilisés / éléments communs avec S0 (%)	Dist. moy. (m)	Dist. max. (m)
S3 vs. S0	509	244/509 (48)	40.8	475

Influence de la taille des particules sur les distances de transport

Cette section vise à (i) déterminer la compétence du Rhône court-circuité et à (ii) évaluer l'influence de la taille des particules sur les distances parcourues.

D'abord, la compétence peut être appréciée en identifiant les plus gros éléments mobilisés. Ainsi, sur la Figure 24, il apparaît qu'une particule de 80 mm a été déplacée sur près de 30 m pour le relevé S1 (Q_{max} : 1458 m³/s) et qu'une particule de 90 mm a parcouru 20 m pour le relevé S3 (Q_{max} : 2828 m³/s). En l'absence de traceurs de plus grosse dimension, il n'est pas possible de mieux cerner la compétence du Rhône court-circuité.

En outre, il apparaît que la taille des particules mobilisées est liée à l'intensité des crues. Ainsi, le relevé S3, consécutif à la crue la plus importante, présente des indices de taille D50 mobilisés et D90 mobilisés plus élevés que pour les relevés S1 et S2 (Tableau 13).

Enfin, ces relevés montrent que les distances de transport sont liées à (i) l'intensité des crues et (ii) à la taille des particules. Sur la Figure 25, le lien avec l'intensité des crues est surtout valable pour les classes granulométriques 18-32 mm et 32-45 mm, et dans une moindre mesure pour la classe granulométrique 64-80 mm. Quant à la relation entre les distances de transport et la taille des particules, elle est bien illustrée par les relevés S1 et S3 sur la Figure 24, où les distances montrent une diminution en fonction de la taille des particules.

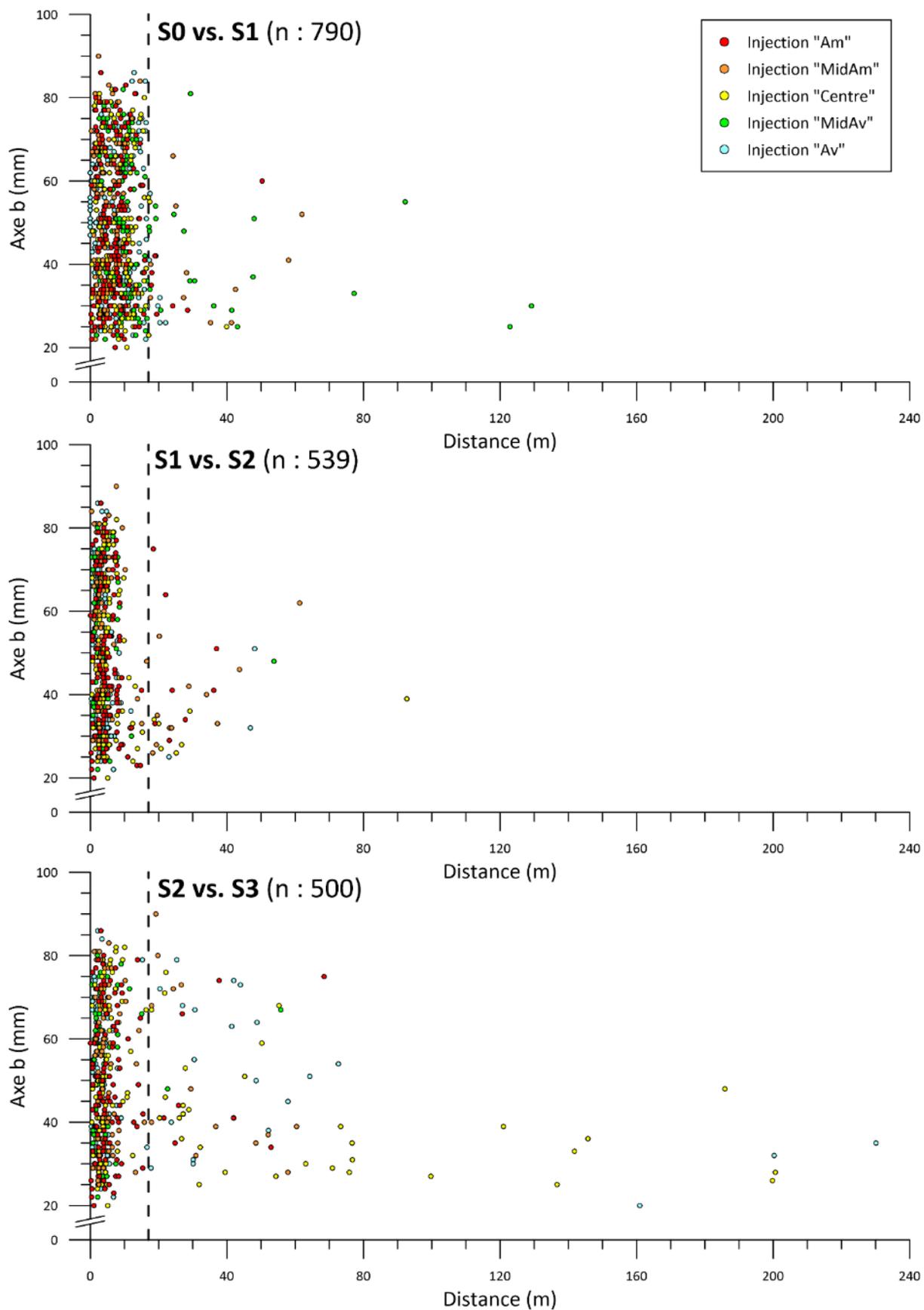


Figure 24. L'Île des Graviers : distances de transport en fonction de la taille des particules

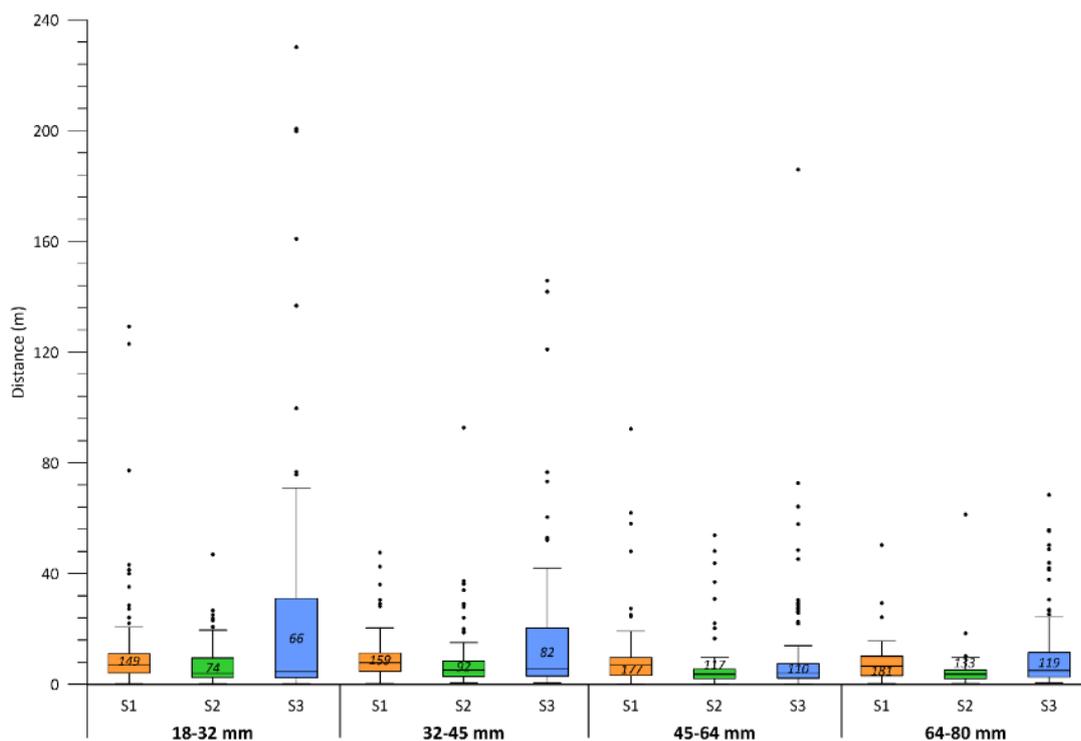


Figure 25. L'Île des Gravieres : distances de transport par classes granulométriques

Analyse à l'échelle des profils d'injection

La Figure 24 et la Figure 26 permettent d'observer une relative disparité des distances de transport entre les différentes zones d'injection. Ce sont les zones « Centr », « MidAv » et « Av » qui présentent les distances les plus importantes. Ceci est à mettre en relation avec les contextes hydrauliques locaux (zone de rétrécissement du chenal, position dans la courbure du méandre, etc.). Il faut toutefois rester prudent dans l'interprétation car certaines zones, trop profondes, n'ont pas été prospectées.

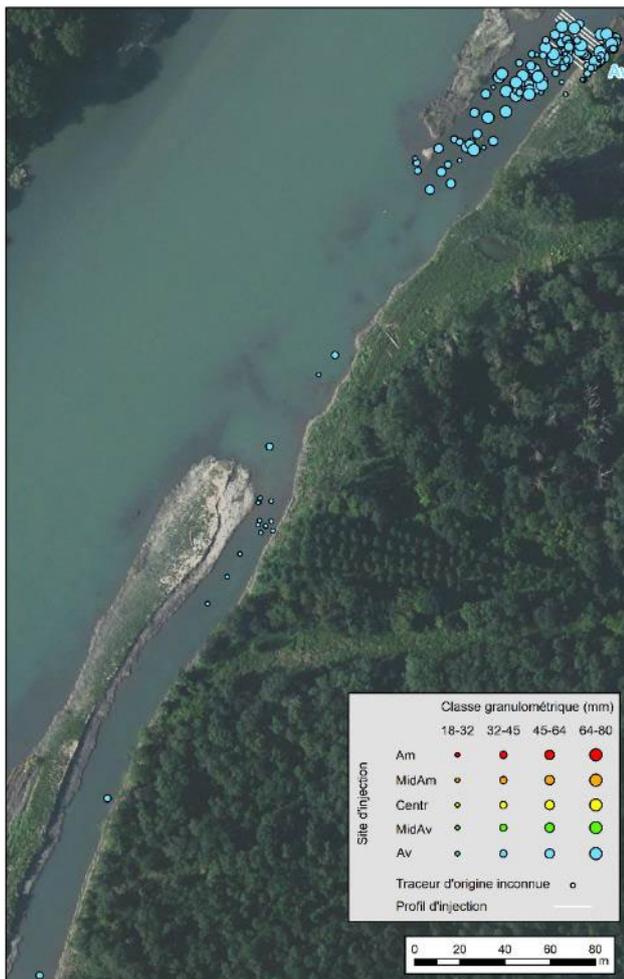
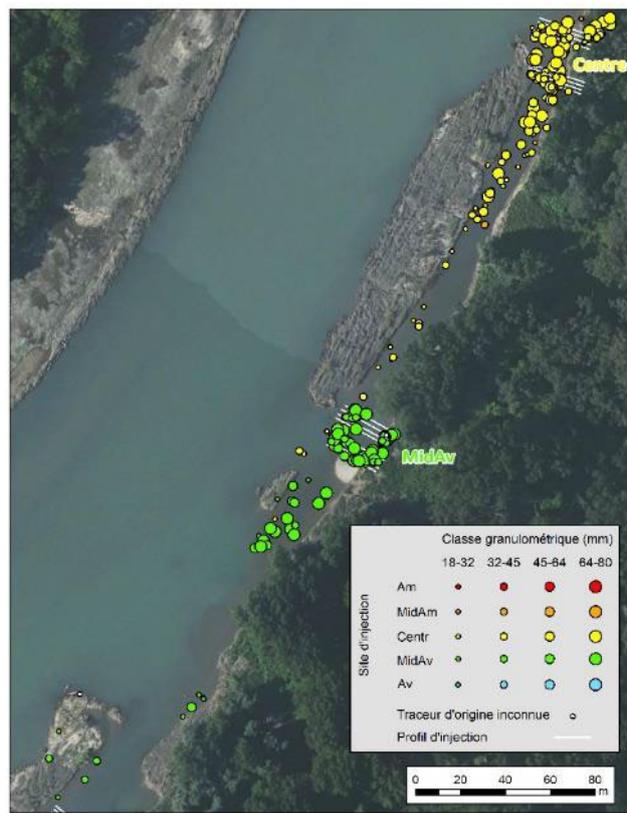
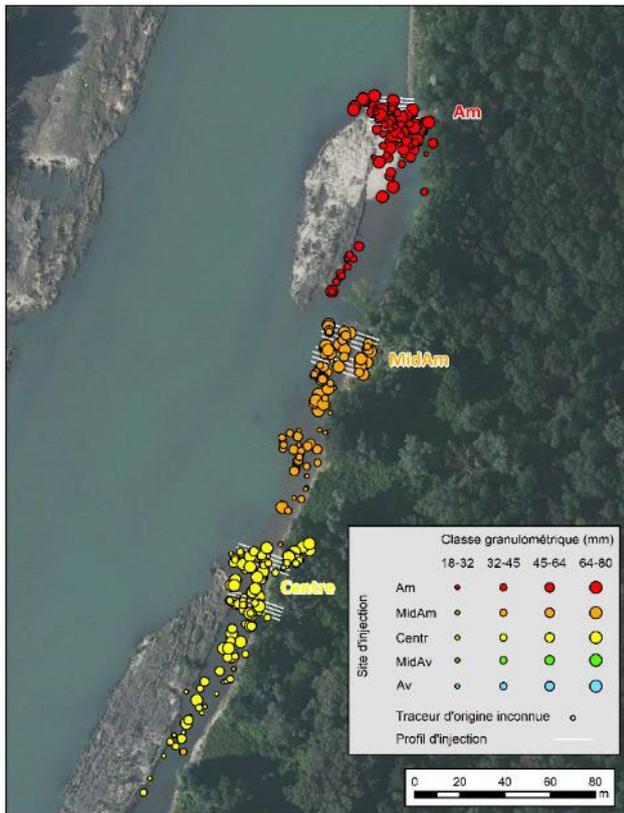


Figure 26. L'Île des Graviers : Position et taille (axe b) des traceurs pour le relevé S3 : injection « Am » et « MidAm » (haut gauche), injections « Centr » et « MidAv » (haut droit), injection « Av » (bas gauche)

2.4 Le Vieux Rhône de Péage-de-Roussillon : réinjection sédimentaire de la Platière

2.4.1 Action de restauration et premiers suivis RFID

Parallèlement à l'action de désartificialisation des berges sur le RCC de PDR, une opération de réinjection sédimentaire a été menée à partir d'une partie des matériaux grossiers extraits des casiers. Cette injection sédimentaire a été réalisée environ 1500 m en aval du barrage de Saint-Pierre-de-Bœuf (PK 52,4), en amont du grand banc de convexité de la rive gauche. Les 6885 m³ de sédiments ont été injectés sous la forme d'un merlon dans le chenal, sur à peu près la moitié gauche du lit mouillé. Afin d'évaluer l'efficacité et la durabilité de cette opération, un suivi de la dynamique sédimentaire par traceurs RFID a été entrepris à la suite des travaux.

Ce suivi a été mis en œuvre par le bureau d'étude GeoPeka (2019), qui a également réalisé les 2 premiers relevés de la position des traceurs sédimentaires (relevés S1 et S2). Ainsi, 991 traceurs (équipés de trois types de capsules : 12, 23 et 32 mm de long) ont été injectés le 14 avril 2017 (S0). Ils sont répartis en 5 classes granulométriques (Tableau 16). Environ 90 % de l'injection RFID a été effectué sur le merlon d'injection (15 clusters de ~60 traceurs), tandis que les 10 % restant ont été déployés dans le chenal (le long d'un profil en travers situé au droit du merlon d'injection ; Figure 27).

Tableau 16. Réinjection sédimentaire de la Platière : répartition par classes granulométriques des traceurs injectés

Classes granulométriques (mm)	8 - 16	16 - 32	32 - 45	45 - 64	64 - 80	Total
Nombre de traceurs	236	260	196	201	98	991
Part des traceurs	24 %	26%	20%	20%	10%	
Fréquences cumulées	0.24	0.50	0.70	0.90	1	



Figure 27. Réinjection sédimentaire de la Platière : localisation des sites d'injection des traceurs RFID et des zones prospectées en S3 (mars-mai 2022)

La position des traceurs a été relevée une première fois en août 2017 (S1). Malgré un faible taux de retour lié aux collisions de signaux entre PIT tags, ce relevé indique une faible mobilisation pour une crue dont le débit a à peine atteint le Q_c .

Par la suite, 3 relevés (S2a, S2b et S2c) se sont succédés de juillet 2018 à mai 2019. Les prospections liées aux relevés S2b et S2c n'ont pas été exhaustives car elles répondaient à des objectifs bien précis (voir GeoPeka, 2019). De plus, elles ne correspondent pas à des périodes marquées par des crues importantes. Dès lors, ces trois relevés ont été regroupés en un seul relevé S2. Ceci permet d'augmenter le nombre d'individus nécessaires au calcul des différentes métriques.

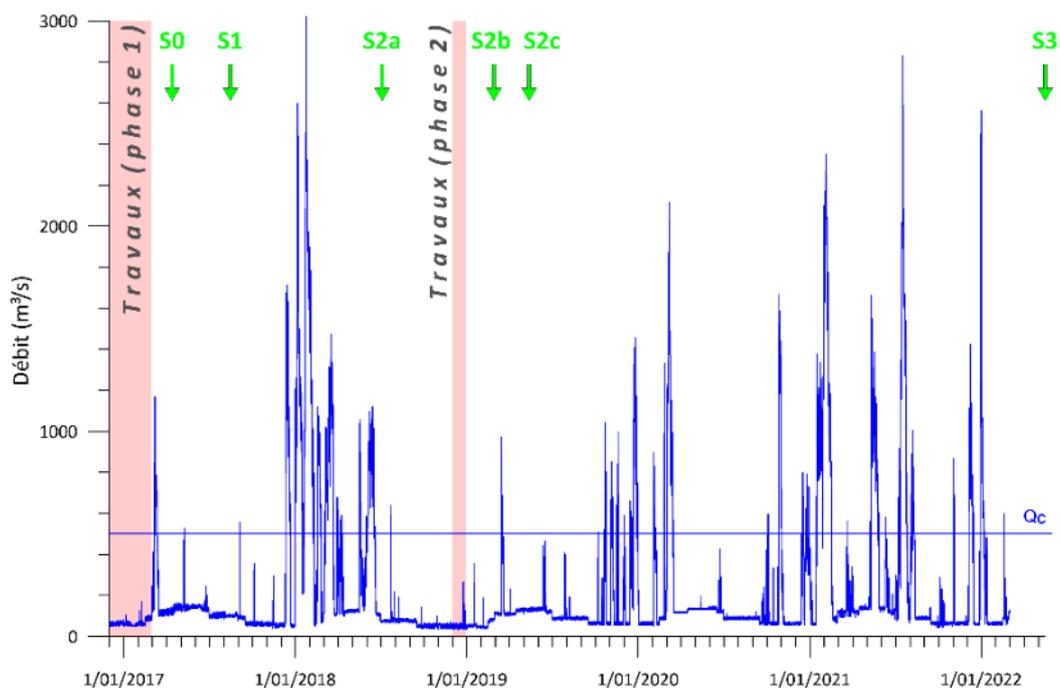


Figure 28. Réinjection sédimentaire de la Platière : hydrogramme et relevés RFID. Débits horaires bruts et non validés fournis par la CNR (station limnographique située en aval du barrage de Saint-Pierre-de-Bœuf)

Tableau 17. Réinjection sédimentaire de la Platière : caractéristiques des prospections et des périodes hydrologiques associées aux relevés RFID

n°	Date de fin de prospection	Temps de prospection (h)	Surface prospectée (ha)	Nbre d'éléments retrouvés	% de retour	Nbre d'événements > Q _c	Q _{max} (m³/s) + date du Q _{max}
S1	16/08/2017	10	2	82	8,3	1	526 (10/05/2017)
S2a	5/07/2018	50	18,6	354	35,7	5	3021 (24/01/2018)
S2b	28/02/2019	6	3,8	14	1,4	1	637 (24/07/2018)
S2c	14/05/2019	4	1,1	75	7,6	1	972 (16/03/2019)
S2 regroupé		60	25,5	385	38,8	7	3021 (24/01/2018)
S3	17/05/2022	53	19,2	317	32	19	2828 (17/07/2021)

2.4.2 Le nouveau relevé RFID

Prospection

Un nouveau relevé (S3) a été effectué entre mars et mai 2022 par EVS en collaboration avec le personnel de la Réserve Naturelle Nationale de la Platière. La période hydrologique qui lui est associée est caractérisée par 19 crues dont le débit a dépassé Q_c, la plus importante d'entre-elles ayant atteint un débit de 2828 m³/s (17/07/2021 ; Figure 28 et Tableau 17).

Le relevé a mobilisé entre 2 et 3 opérateurs durant 7 jours, ce qui correspond approximativement à 53 h de prospection. La superficie prospectée est quant à elle de

19,20 ha. Le matériel utilisé comprend le boîtier de lecture RFID couplé au système DATAMAX. Ici aussi, la grande antenne RFID (forme rectangulaire ; 2,1 m x 0,5 m) a été utilisée dans les zones en eau et sur la plupart des bancs émergés, alors que la petite antenne RFID (forme circulaire ; 0,5 m de diamètre) a été préférée pour prospecter les bancs végétalisés. Le pourcentage de retour pour ce relevé est de 32 % (Figure 29 et Tableau 18).

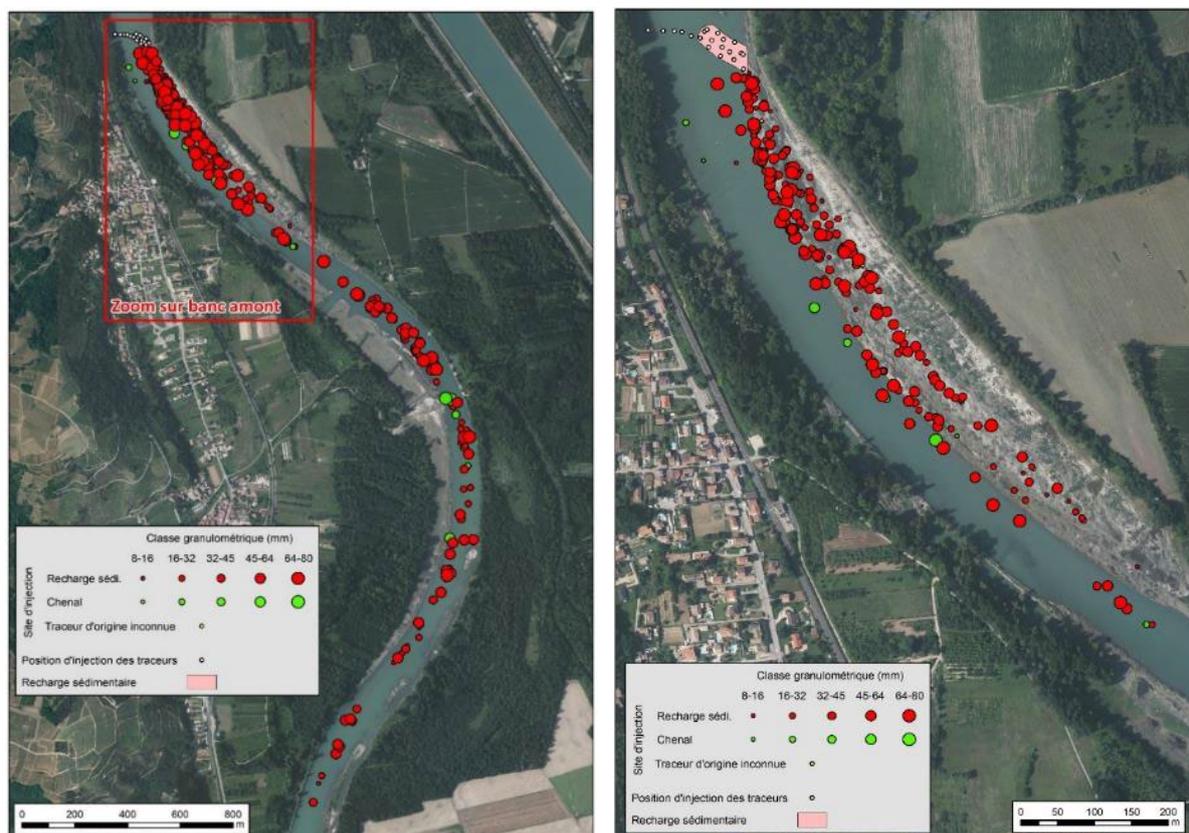


Figure 29. Réinjection sédimentaire de la Platière : localisation des traceurs pour le relevé S3 (à gauche) et zoom sur le banc amont (à droite)

Tableau 18. Réinjection sédimentaire de la Platière : synthèse des relevés RFID

n°	Nbre d'éléments déduits	Nbre total d'éléments	% de retour (avec éléments déduits)	Nombre d'éléments mobilisés / éléments communs avec levé précédent (%)	Dist. moy. (m)	Dist. max. (m)
S1	0	82	8,3	10/82 (12)	12	41
S2	0	385	38,8	38/38 (100)	386	976
S3	0	317	32	97/158 (61)	394	3045

2.4.3 Eléments de synthèse

Pourcentage de récupération

Le détail des pourcentages de récupération calculés selon la classe granulométrique et selon la taille de la capsule RFID utilisée est représenté en Figure 30. Il apparaît d'abord que, plus les éléments sont grossiers, meilleurs sont leurs pourcentages de récupération. De même, de meilleurs taux de retour sont observés pour les plus grandes tailles de capsule (32 mm et, dans une moindre mesure, 23 mm), les capsules de 12 mm présentant les moins bons taux de retour.

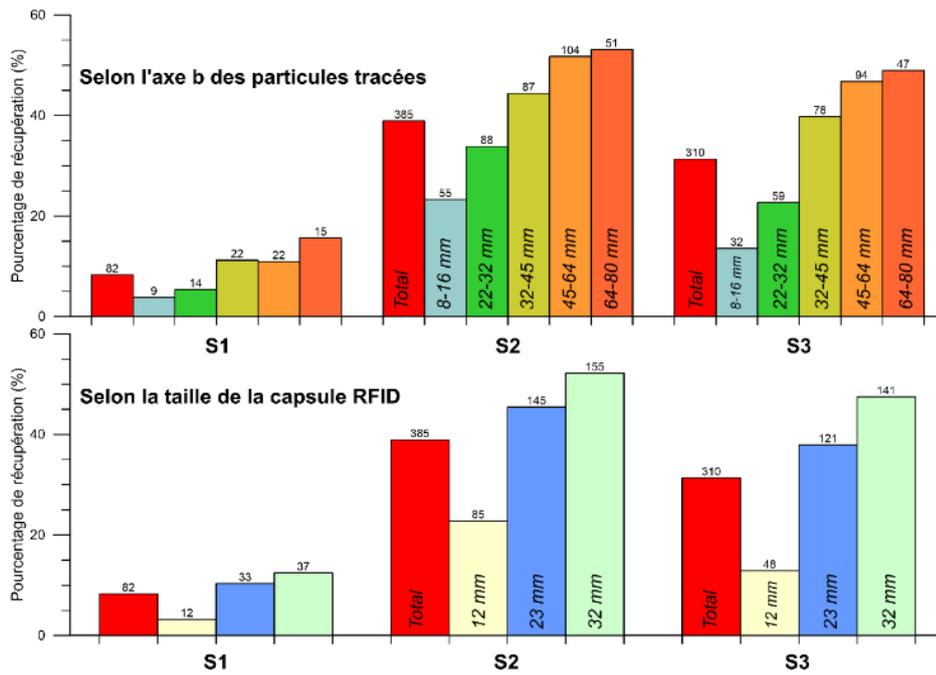


Figure 30. Réinjection sédimentaire de la Platière : pourcentages de récupération des 3 relevés RFID présentés selon l'axe b des particules tracées (en-haut) et selon la taille de la capsule RFID (en bas) (les numéros surmontant les histogrammes réfèrent aux nombres de particules retrouvées)

Détermination du débit critique de mise en mouvement

Plusieurs approches ont été utilisées pour déterminer le débit critique de mise en mouvement (Q_c). Tout d'abord, l'examen des déplacements des traceurs en fonction de l'intensité des événements hydrologiques a fourni une première approximation ($525 \text{ m}^3/\text{s}$). Ensuite, la relation établie entre le débit de pointe de la période comprise entre 2 relevés successifs (x) et la distance moyenne parcourue par les particules communes à ces 2 relevés (y) fournit une valeur de $468 \text{ m}^3/\text{s}$. Enfin, nous avons également estimé le débit critique en utilisant la formule de Recking (2013) de la contrainte critique de Shields (τ_c^*) pour les rivières à charge caillouteuse hétérogène :

$$\tau_c^* = 1.32 \cdot S + 0.037 \quad \text{Équation 1}$$

Avec S : la pente du fond du lit au droit de l'injection.

Cette approche fournit une valeur de $530 \text{ m}^3/\text{s}$.

Analyse à l'échelle du secteur

L'analyse du pourcentage de mobilisation et des distances moyennes et maximales pour les trois relevés est cohérente avec les caractéristiques des périodes hydrologiques associées aux relevés. Ainsi, malgré un faible taux de retour lié aux collisions de signaux entre PIT tags, le relevé S1 indique une faible mobilisation pour une crue dont le débit est légèrement supérieur au Qc. Le relevé S2 montre une mobilité plus élevée, malgré un nombre relativement faible de traceurs communs entre S1 et S2. Il en est de même, dans une moindre mesure, pour le relevé S3, qui met en évidence des distances moyenne et maximale plus importantes pour une période hydrologique marquée par de nombreuses crues. Néanmoins, le pourcentage de mobilisation (61 %) indique que la mobilisation n'était pas totale. Ceci est probablement lié au fait que de nombreux traceurs sont localisés sur le banc de la rive gauche (en aval du merlon d'injection) et que leur vitesse de déplacement est de ce fait réduite, voire nulle (Figure 29).

En 5 ans, les traceurs se sont dispersés sur près de 3700 m. Dans la partie amont du secteur étudié, une grosse partie d'entre eux a pris la direction du banc de convexité de la rive gauche (148 traceurs sur 317 en S3, soit 47 %), alors que peu de traceurs sont encore localisés dans le chenal (principalement à proximité immédiate du banc). Plus en aval (entre 1450 m et 3700 m en aval de l'injection), les traceurs sont dispersés dans le chenal de manière presque continue, sans zone de piégeage préférentielle, comme l'indique la Figure 31.

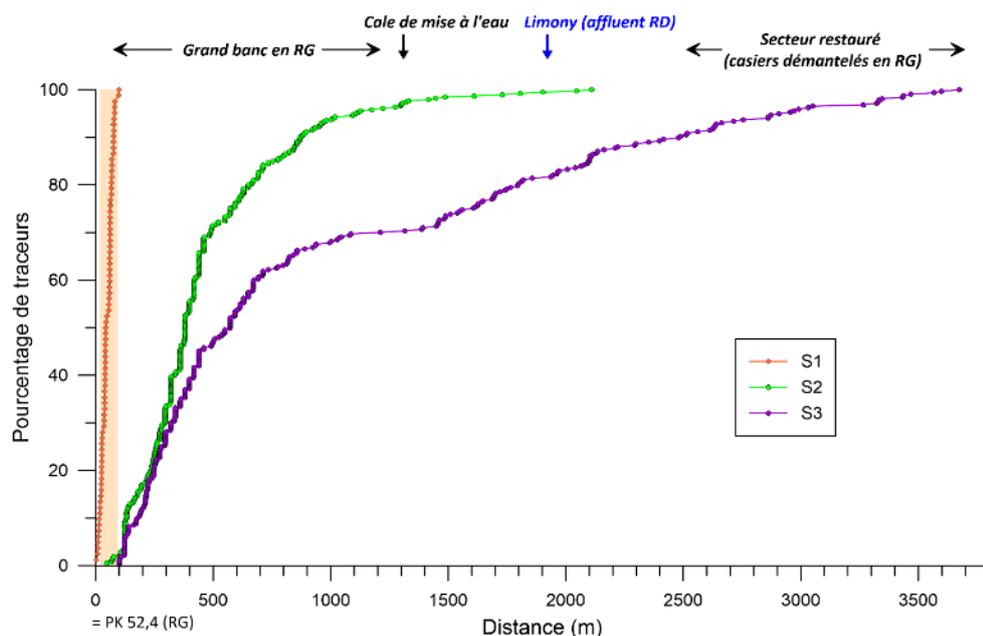


Figure 31. Réinjection sédimentaire de la Platière : localisation des traceurs pour le relevé S3 (à gauche) et zoom sur le banc amont (à droite)

Finalement, afin d'avoir une meilleure appréhension de la distance de transport sur le moyen terme, le relevé S3 peut être comparé avec l'injection (S0). Ainsi, sur la période de 5 ans qui suit l'injection, les traceurs ont parcouru une distance moyenne de 915 m (n : 317) et une distance maximale de 3652 m (Tableau 19). Cette distance moyenne calculée pour la période de 5 ans correspond à une vitesse moyenne de 179 m/an. Néanmoins, il apparaît que les traceurs qui avaient été injectés dans le chenal ont une mobilité plus prononcée (distance

moyenne : 1369 m ; n : 18) que ceux de la réinjection sédimentaire (distance moyenne : 901 m ; n : 292). Il faut toutefois rester prudent face à cette première valeur en raison du faible pourcentage de récupération (~ 18 %).

Tableau 19. Réinjection sédimentaire de la Platière : comparaison du dernier relevé RFID (S3) avec l'injection (S0) (en excluant les traceurs localisés sur la berge pour le relevé S3)

n°	Nbre total d'éléments	Nombre d'éléments mobilisés / éléments communs avec S0 (%)	Dist. moy. (m)	Dist. max. (m)
S1 vs. S0	82	10/82 (12)	12	41
S2 vs. S0	385	385/385 (100)	415	2080
S3 vs. S0	317	317/317 (100)	915	3652

Influence de la taille des particules sur les distances de transport

L'analyse des distances parcourues par classe granulométrique suggère une absence de contrôle de la taille des particules sur la distance, en particulier pour le relevé S3 (Figure 32). Il faut toutefois rester prudent car le nombre de traceurs pour certaines classes granulométriques est très faible, en particulier pour la classe 8-16 mm.

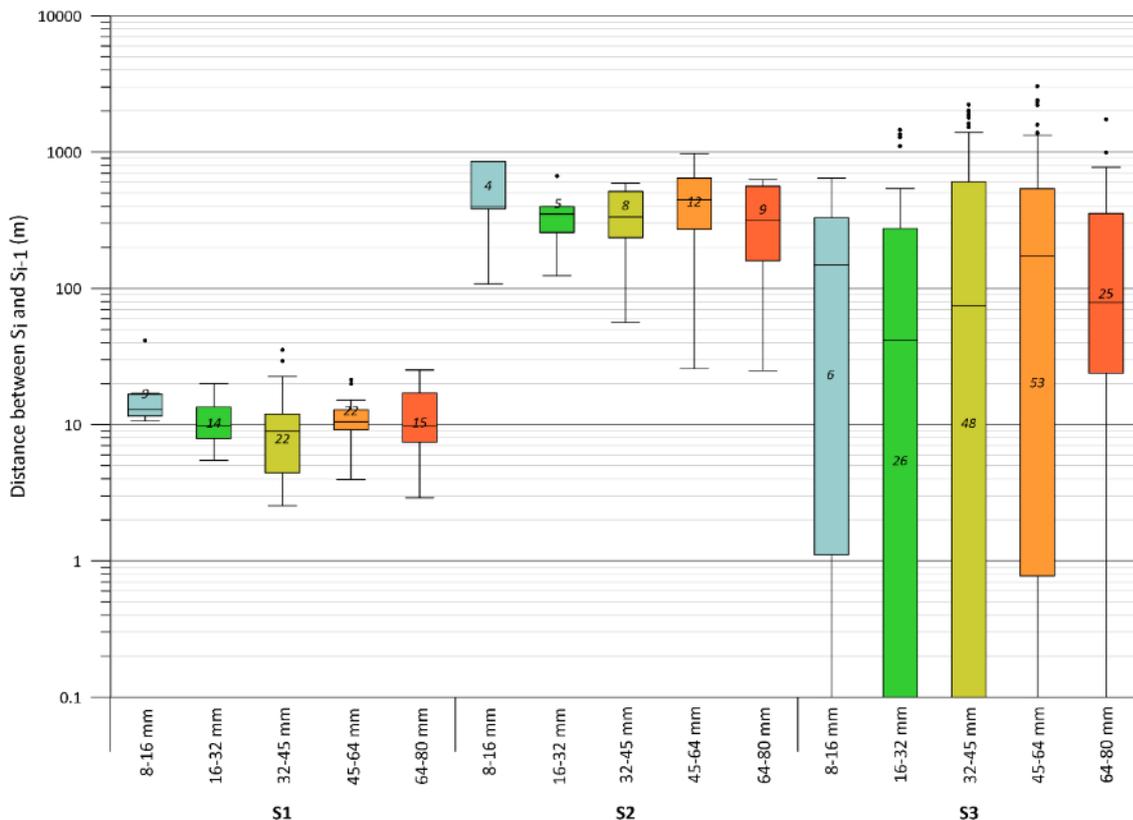


Figure 32. L'Île des Graviers : distances de transport par classes granulométriques

2.5 Le Vieux Rhône de Donzère-Mondragon : l'île des Dames

2.5.1 Action de restauration et premiers suivis RFID

Dans le Vieux Rhône de Donzère-Mondragon, deux lômes (Grange écrasée et Dames) ont fait l'objet d'un projet de restauration mené par la CNR en janvier 2019. L'objectif était de redynamiser les lômes et de restaurer leur processus d'auto-entretien. En outre, les matériaux issus du curage de ces deux bras secondaires (30000 m³) ont été réinjectés dans le Vieux Rhône et sur le banc situé immédiatement à l'aval de l'entrée de la lôme des Dames en rive droite.

Un suivi de ces interventions a été entrepris par la CNR avec l'appui du laboratoire EVS. Il concerne la dynamique sédimentaire du Vieux Rhône et des lômes. Ainsi, pour déterminer les débits seuil de mise en mouvement et évaluer le potentiel d'auto-entretien des lômes, près de 1500 traceurs ont été injectés en avril 2019 comme suit (Tableau 20) :

- 1099 particules dans le chenal principal, réparties le long de 5 profils espacés d'environ 200 m et dont le plus aval est localisé directement en amont de l'entrée de la lôme de la Grange écrasée (entre les PK175 et 176 ; Figure 33) ;
- 200 particules dans chaque lôme, quelques dizaines de mètres à l'aval de leur entrée respective.

Ces traceurs ont été déposés à la main sous la surface de l'eau, un à un, afin d'éviter une injection en amas. Ils sont équirépartis en 4 classes granulométriques (Vázquez Tarrío et al., 2021). La répartition des traceurs dans le Vieux Rhône par classe granulométrique et par profil d'injection est détaillée dans le Tableau 20.

Tableau 20. L'île des Dames : répartition par classes granulométriques des traceurs injectés

		Classes granulométriques (mm)				Total	%
		16-32	32-45	45-64	64-80		
Profil d'injection	R1	55	55	56	55	221	20
	R2	54	55	55	55	219	20
	R3	55	55	55	56	221	20
	R4	55	55	55	56	221	20
	R5	55	54	54	54	217	20
Total		274	274	275	276	1099	
%		25	25	25	25		100



Figure 33. L'île des Dames : localisation des sites d'injection des traceurs RFID (S0)

Ces traceurs ont fait l'objet de 3 relevés en 2019-2020. Seuls les relevés réalisés dans le Vieux Rhône sont traités dans ce rapport. Les relevés effectués sur les deux lônes ne font pas partie de ce travail. Certains résultats ont été présentés dans les rapports antérieurs (Cassel et al., 2019 ; Vázquez Tarrío et al., 2021) et leur synthèse sera réalisée dans le cadre de la thèse de Nicolas Tissot (en cours de rédaction - projet RhônEco).

Le premier relevé (S1), réalisé après un petit évènement hydrologique dont le pic a atteint $548 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figure 34 et Tableau 21), fait état d'une absence de mouvement, à l'exception d'une particule sur les 236 traceurs retrouvés (Vázquez Tarrío et al., 2021).

Le deuxième suivi (S2), réalisé quant à lui après deux pics dépassant le Q_c initialement estimé, a entraîné un transport partiel dans le chenal principal du Rhône (11 particules mobiles sur les 62 traceurs communs avec le relevé S1 ; Tableau 22). Malgré le faible nombre de traceurs mobilisés, un léger effet de la taille des traceurs semble contrôler la distance (sans tenir compte de la particule de 65 mm qui a parcouru plus de 250 m ; Figure 40). Néanmoins, il est plus vraisemblable ici que ces déplacements soient le résultat des effets locaux liés à la géométrie et la rugosité du chenal. En effet, plus de la moitié des traceurs mobiles provient des profils d'injection R3, qui se trouvent au niveau d'un banc de roche en place.

Le troisième suivi (S3) a également fait suite à trois pics de crue $> Q_c$ mais dont l'intensité était plus élevée que celle des pics de la période précédente. Il a permis de localiser 194 traceurs dans le vieux Rhône (18 % de récupération). Sur les 55 traceurs communs avec le relevé précédent, 13 d'entre eux ont parcouru une distance égale ou supérieure à 20 m (distance seuil de mobilisation). Ils ont parcouru des distances moyenne et maximale de 51 m et 775 m, respectivement.

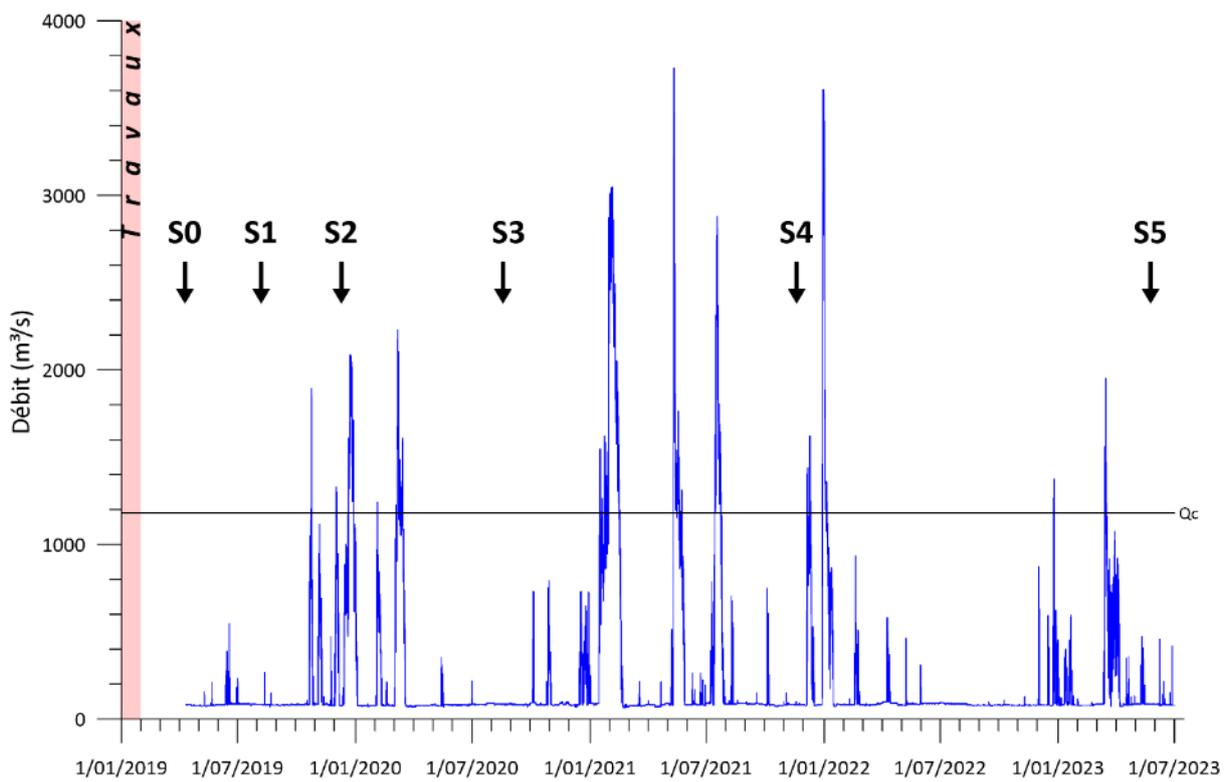


Figure 34. L'Île des Dames : hydrogramme et relevés RFID. Débits horaires bruts et non validés fournis par la CNR (station limnigraphique de Bourg-Saint-Andéol)

Tableau 21. L'Île des Dames : caractéristiques des prospections et des périodes hydrologiques associées aux relevés RFID

n°	Date de fin	Temps de prospection (h)	Surface prospectée (ha)	Nbre d'éléments retrouvés	% de retour	Nbre d'événements > Qc	Q _{max} (m ³ /s) + date du Q _{max}
S1	7/08/2019	60	12	236	21	0	548 (18/06/2019)
S2	10/12/2019	10	12	72	7	2	1894 (24/10/2019)
S3	20/08/2020	12	12	194	18	3	2227 (7/03/2020)
S4	19/11/2021	12	~12	74	7	3	3728 (11/05/2021)
S5	19/06/2023	68	16,2	166	15	4	3606 (30/12/2021)

Tableau 22. L'Île des Dames : synthèse des relevés RFID

n°	Nbre d'éléments déduits	Nbre total d'éléments	% de retour (avec éléments déduits)	Nombre d'éléments mobilisés / éléments communs avec levé précédent (%)	Dist. moy. (m)	Dist. max. (m)	D _{50 mob.} (mm)	D _{90 mob.} (mm)
S1	30	266	24	1/266 (0.4)	3.3	22	NA	NA
S2	43	115	10	11/62 (18)	18	269	38	65
S3	2	196	18	13/55 (24)	51	775	64	72
S4	1	74	7	14/17 (82)	475	1142	52	76
S5	NA	166	15	19/22 (86)	235	662	45	73

2.5.2 Les nouveaux relevés RFID

Prospection

Deux nouveaux relevés ont été réalisés dans le cadre du 6e programme de l'OSR.

Le relevé S4 a été réalisé les 18 et 19 novembre 2022 à la suite d'une période hydrologique caractérisée par 3 crues mobilisatrices, la plus importante d'entre elles ayant atteint un débit de 3728 m³/s (Figure 34 et Tableau 21). Le relevé sur le Rhône a été réalisé par deux opérateurs de la CNR, tandis que les îlons ont été prospectées par deux agents EVS. La durée totale de prospection sur le Rhône représente environ 12 h. Le matériel utilisé comprend le système d'identification et de géolocalisation DATAMAX, ainsi que la grande antenne de forme rectangulaire (2,1 m sur 0,5 m). La petite antenne n'a pas été utilisée lors de ce relevé. La zone prospectée (~12 ha) s'étend depuis l'aval de l'injection R1, en amont, jusqu'au grand

banc de rive droite, en aval (près de l'entrée de la lône des Dames ; Figure 38). Ce grand banc n'a pas été prospecté, faute de temps. Il en est de même pour le radier qui le jouxte car la navigation y est compliquée. Au final, seuls 74 traceurs ont été retrouvés, ce qui représente un faible pourcentage de retour (7 %).

Le relevé S5 a, quant à lui, été plus exhaustif. Pour ce faire, la prospection a nécessité une diversité de moyens : prospection du thalweg (zones profondes) à l'aide de 3 bateaux (2 grandes embarcations de la CNR et zodiac d'EVS) et prospection des zones émergées et peu profondes à pied (Tableau 23). Pour ces dernières, la grande et la petite antennes ont été employées en fonction du développement de la végétation arbustive des bancs. Le système de détection employé est également le système d'identification et de géolocalisation DATAMAX. A l'inverse du relevé S4, le grand banc de la rive droite a été prospecté (Figure 38). En revanche, seule une partie du radier qui le jouxte (la partie la moins profonde) a pu être prospectée à pied, le reste de ce radier n'étant pas prospectable en raison des fortes vitesses du courant.

Au total, 166 traceurs ont été localisés pour le relevé S5 (15 % de récupération). Comparé avec le relevé précédent (S4), ce relevé indique une mobilisation sur une distance moyenne et maximale de 235 m et 662 m, respectivement. 86 % des éléments communs aux deux relevés ont été mobilisés (Tableau 22).

Tableau 23. L'Île des Dames : détail de la prospection RFID pour le relevé S5

Date	Opérateur	Antenne	Type de prospection	Forme prospectée	Temps (h)	Linéaire (m)	Surface (ha)
25/04/2023	2 (EVS)	2 petites	A pied	Banc latéral + radiers	7,5	8857	
26/04/2023	2 (EVS)	2 petites	A pied	Banc latéral + radiers	3,5	6587	
24/05/2023	3 (EVS)	1 grande + 1 petite	A pied	Banc latéral + radiers	7	10018	
24/05/2023	4 (CNR)	2 grandes	En bateau	Thalweg	6	10512	
25/05/2023	2 (EVS)	1 grande	En bateau	Thalweg	7	10508	
25/05/2023	4 (CNR)	2 grandes	En bateau	Thalweg	3	5433	
19/06/2023 AM	2 (EVS)	1 petite	A pied	Banc latéral + radiers	3	4027	
19/06/2023 PM	2 (EVS)	1 grande	En bateau	Thalweg	3,5	4185	



Figure 35. L'île des Dames : prospection et position des traceurs localisés pour les relevés S4 et S5 (la couleur du symbole se réfère aux zones d'injection)

2.5.3 Éléments de synthèse

Pourcentage de récupération

Les pourcentages de récupération ont été calculés selon : (i) la classe granulométrique (axe b), (ii) la taille de la capsule RFID et (iii) le profil d'injection (Figure 38). Il apparaît que, pour les trois premiers relevés, ce sont les particules les plus grossières et les capsules de 32 mm qui présentent les taux de récupération les plus élevés. Ceci est probablement lié à la distance de détection plus élevée des capsules de 32 mm (comparée à celles de 23 mm) et au fait que ce sont les particules les plus grossières qui sont équipées de ces capsules. De même, lorsque plusieurs traceurs sont groupés et que des problèmes de collision de signaux affectent le levé, ce sont les capsules de 32 mm qui sont préférentiellement détectées. Cette tendance n'est plus observée pour les relevés S4 et S5 probablement en lien avec la dispersion des traceurs. Ceci indique aussi que la prospection a couvert un secteur suffisamment long (i.e, les *frontrunners* liés à un éventuel transport sélectif ont été détectés).

Quant à la comparaison des taux de récupération selon les profils d'injection, aucune tendance ne se marque. On note seulement que, pour le relevé S1, les profils 4 et 5 possèdent les meilleurs pourcentages de récupération, probablement en lien avec une meilleure dispersion des traceurs en fonction des conditions hydrauliques locales.

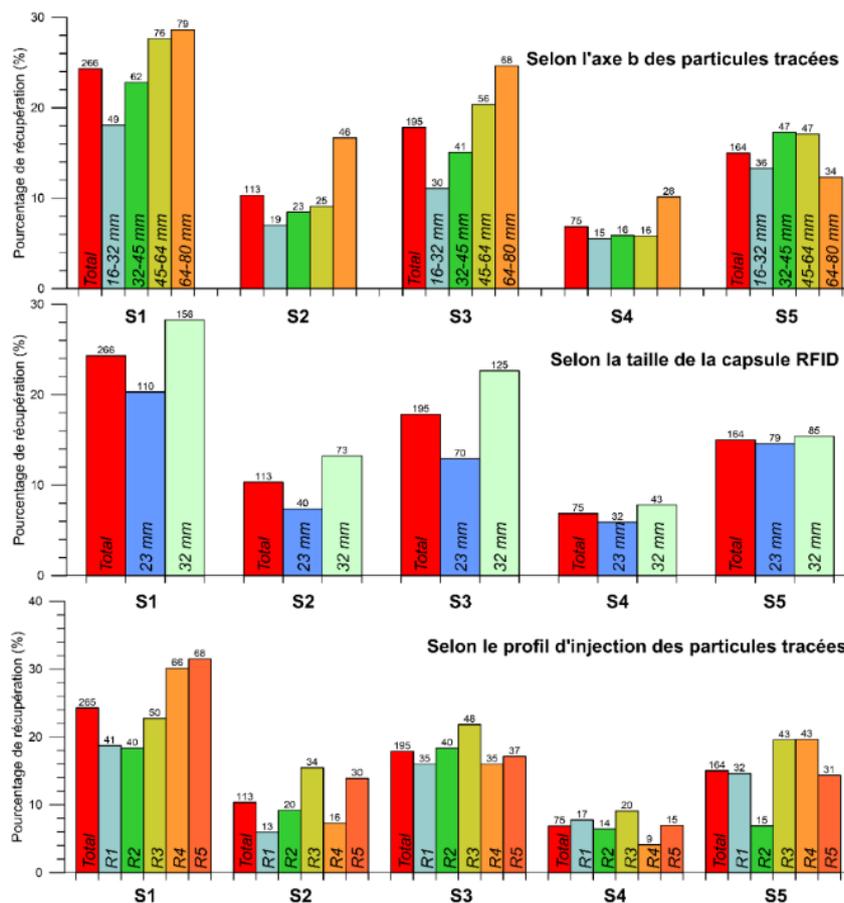


Figure 36. L'Île des Dames : pourcentages de récupération des 5 relevés RFID présentés selon l'axe b des particules tracées (en-haut), selon la taille de la capsule RFID (au milieu) et selon le profil d'injection des particules tracées (en-bas) (les numéros surmontant les histogrammes réfèrent aux nombres de particules retrouvées)

Détermination du débit critique de mise en mouvement

Le Q_c (débit critique de mise en mouvement) a été déterminé sur la base de la relation établie entre le débit de pointe de la période comprise entre 2 relevés successifs (x) et la distance moyenne parcourue par les particules communes à ces 2 relevés successifs (y). Ainsi, la relation de la droite de régression qui s'ajuste sur les cinq relevés RFID ($y = 0,1283x - 151,56$; $R^2 = 0,71$) fournit un Q_c égal à **1181 m³/s** (Figure 37). Bien que légèrement plus élevée, cette valeur reste proche des valeurs théoriques obtenues les formules de Schoklitsch et de Bathurst (880 m³/s et 955 m³/s, respectivement).

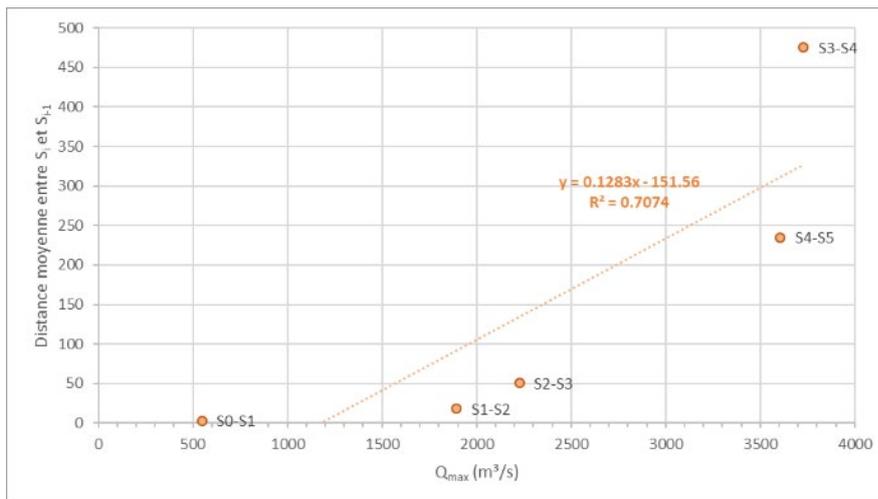


Figure 37. L'Île des Dames : relation établie entre le Q_{max} de la période comprise entre 2 relevés successifs ($S_{i-1} - S_i$) et la distance moyenne des traceurs durant cette période

Analyse à l'échelle du secteur

Rappelons que l'analyse basée sur la comparaison de couples de relevés successifs (S_i vs. S_{i-1}) est rendue délicate sur ce secteur car les pourcentages de récupération sont relativement faibles, en particulier pour le relevé S4 pour lequel la prospection n'a pas été complète. En effet, lorsque le nombre de particules communes entre deux relevés successifs est faible (seulement 17 traceurs communs entre S3 et S4), on peut considérer que le nombre d'individus devient insuffisant pour calculer avec robustesse des métriques représentatives de l'ensemble de la population de traceurs. Il apparaît néanmoins que le pourcentage de mobilisation, la distance moyenne et la distance maximale sont directement proportionnels à l'intensité des crues (Q_{max} de la période étudiée ; Tableau 22).

Pour rappel, lorsqu'on compare chaque relevé S_i avec l'injection S0, le nombre de particules pour calculer les métriques est plus important. Ainsi, la comparaison du relevé S5 avec l'injection S0 peut reposer sur 164 traceurs. De plus, cette approche fournit une évaluation du transport solide sur le moyen terme (~4 ans). Durant cette période, l'ensemble des traceurs a été mobilisé (100 % d'éléments mobilisés) et ce, sur une distance moyenne de 830 m et une distance maximale de 2486 m (Tableau 24). La valeur de l'écart-type (599 m) indique, quant à elle, que les traceurs sont relativement dispersés le long du secteur étudié. La Figure 38 illustre

bien la dispersion des traceurs, quelle que soit leur granulométrie (axe b), avec une plus grande concentration de traceurs au niveau du grand banc latéral de la rive droite et sur les radiers situés directement en amont de ce banc.

Tableau 24. L'Île des Dames : comparaison des relevés RFID (S_i) avec l'injection (S₀)

n°	Nombre d'éléments mobilisés / éléments communs avec S ₀ (%)	Dist. moy. (m)	Ecart-type (m)	Dist. max. (m)
S1 vs. S0	1/266 (0.4)	3.3	4	22
S2 vs. S0	42/113 (37)	41	70	283
S3 vs. S0	154/196 (79)	187	208	903
S4 vs. S0	72/75 (96)	541*	366	1270*
S5 vs. S0	164/164 (100)	830	599	2486

* Valeurs probablement sous-estimées car la prospection en S4 s'est limitée au secteur compris entre l'injection et l'entrée de la Lône des Dames.

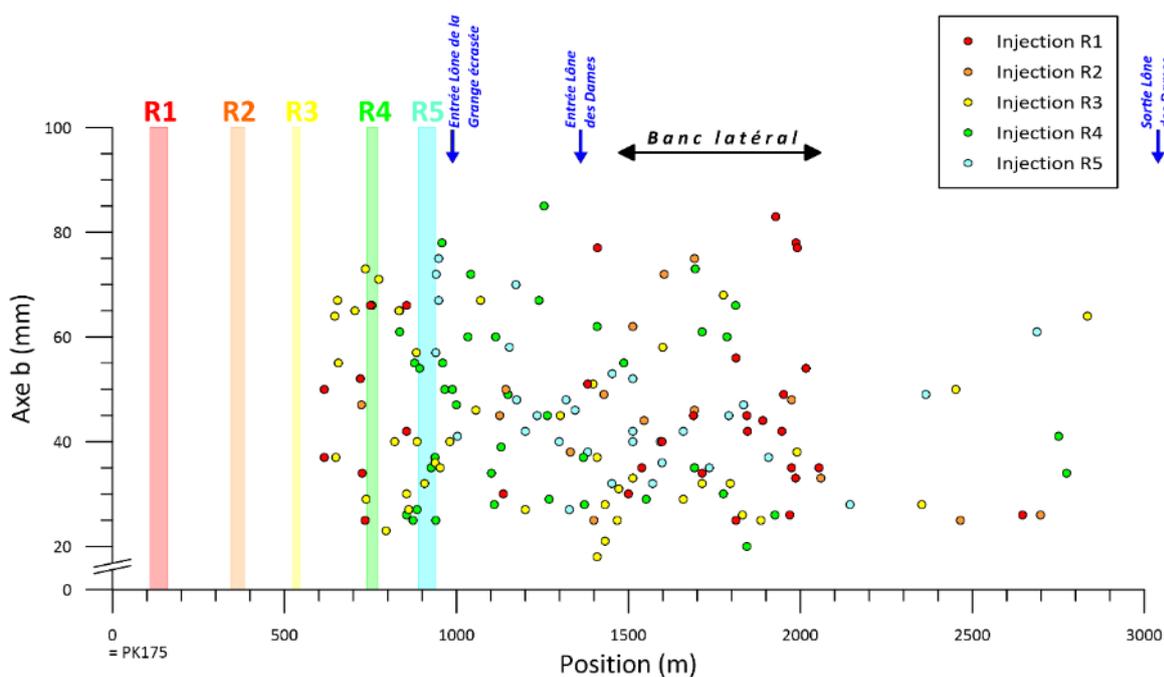


Figure 38. L'Île des Dames : Position et taille (axe b) des traceurs pour le relevé S5

Influence de la taille des particules sur les distances de transport

De nouveau, l'analyse des distances de transport par classe granulométrique doit être réalisée avec précaution car le nombre de particules par classe granulométrique est dans certains cas très faible, ce qui rend délicat la comparaison des indices granulométriques (médiane et percentiles ; Figure 39). Il apparaît toutefois que la taille des particules ne semble pas avoir d'influence sur les distances de transport, quel que soit le relevé étudié. La représentation des distances de transport en fonction de l'axe b des particules montre également une absence

d'effet de la taille des particules sur les distances parcourues (Figure 40). C'est particulièrement marqué pour les relevés S4 et S5, comme l'indiquent les figures 40 et 41. Il convient néanmoins de rappeler que les particules marquées les plus grossières sont comprises dans la classe granulométrique 64-80 mm. Ce marquage ne permet donc pas de déterminer la limite de compétence du Rhône sur ce secteur, ni une éventuelle influence du diamètre sur les distances de transport pour les particules supérieures à 80 mm. Seul un marquage comprenant des éléments plus grossiers permettrait de mieux cibler la limite de compétence du Rhône et de caractériser un éventuel effet de taille sur les distances parcourues.

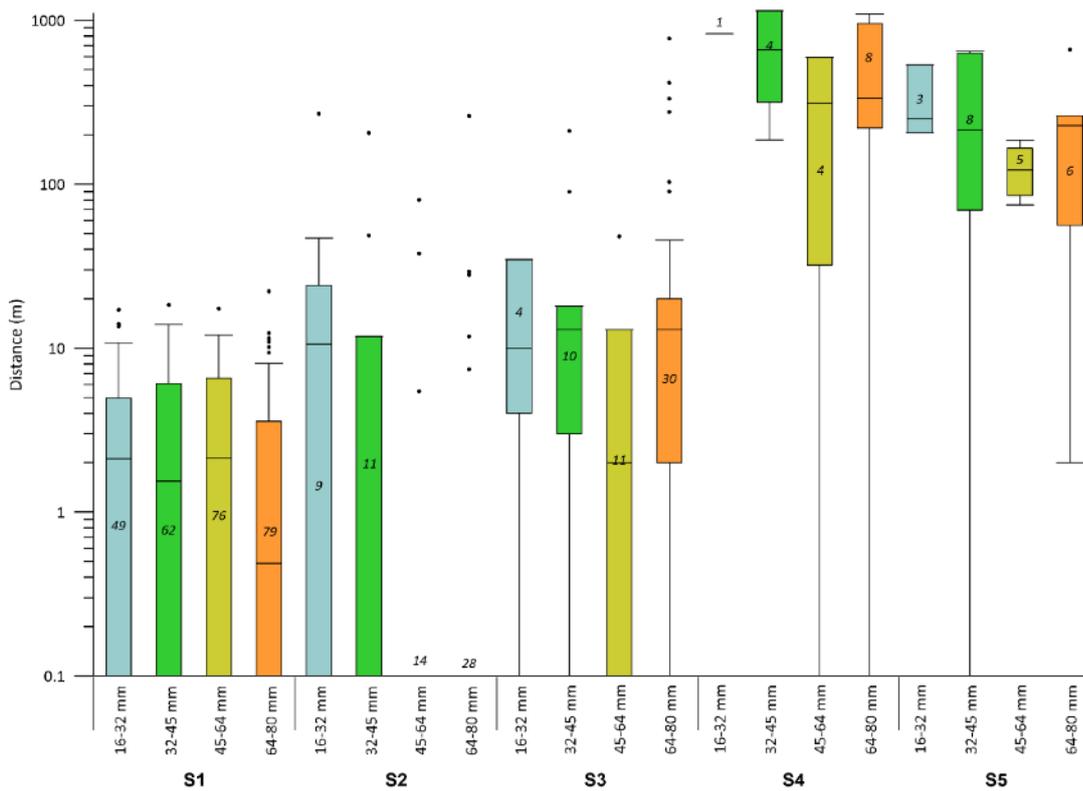


Figure 39. L'Île des Dames : distances de transport par classe granulométrique

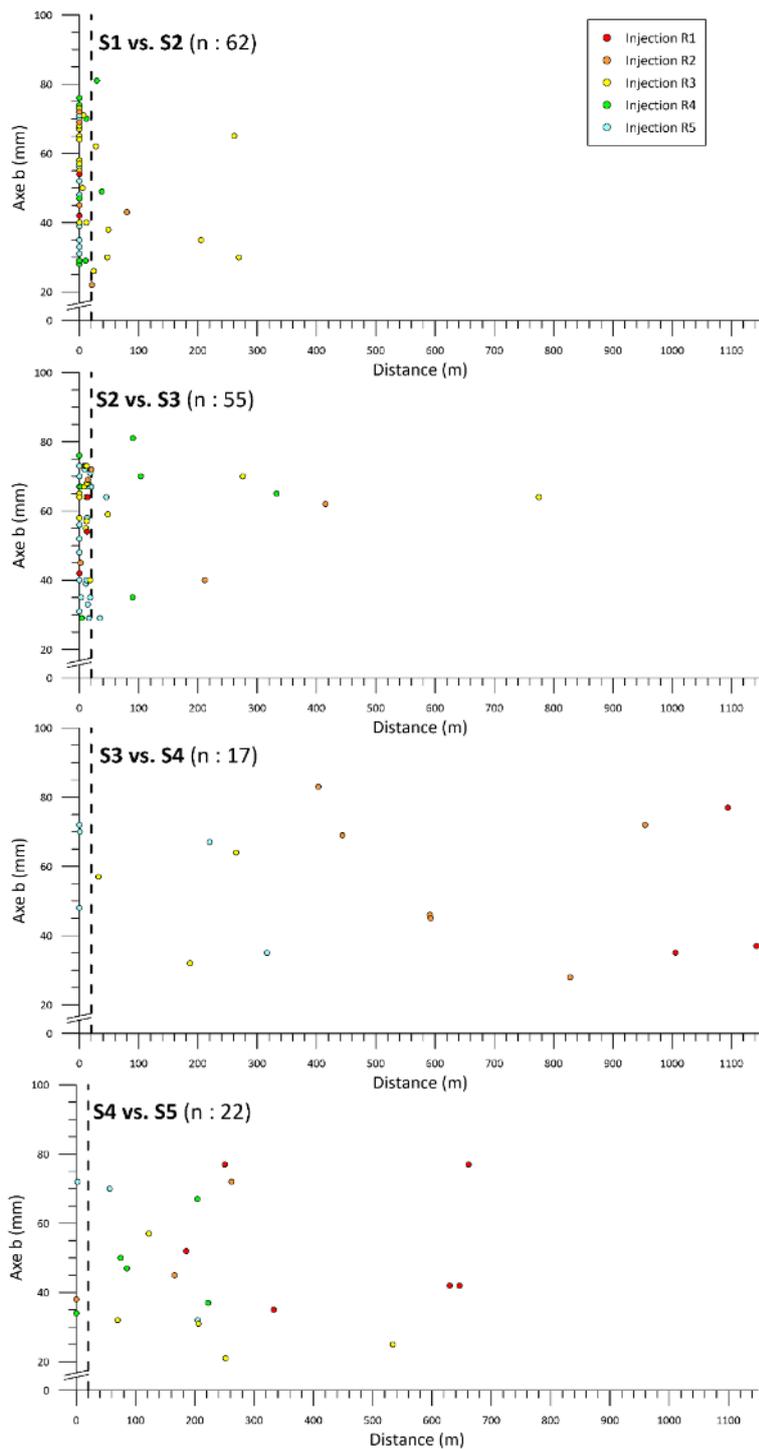


Figure 40. L'île des Dames : distances de transport en fonction de la taille des particules

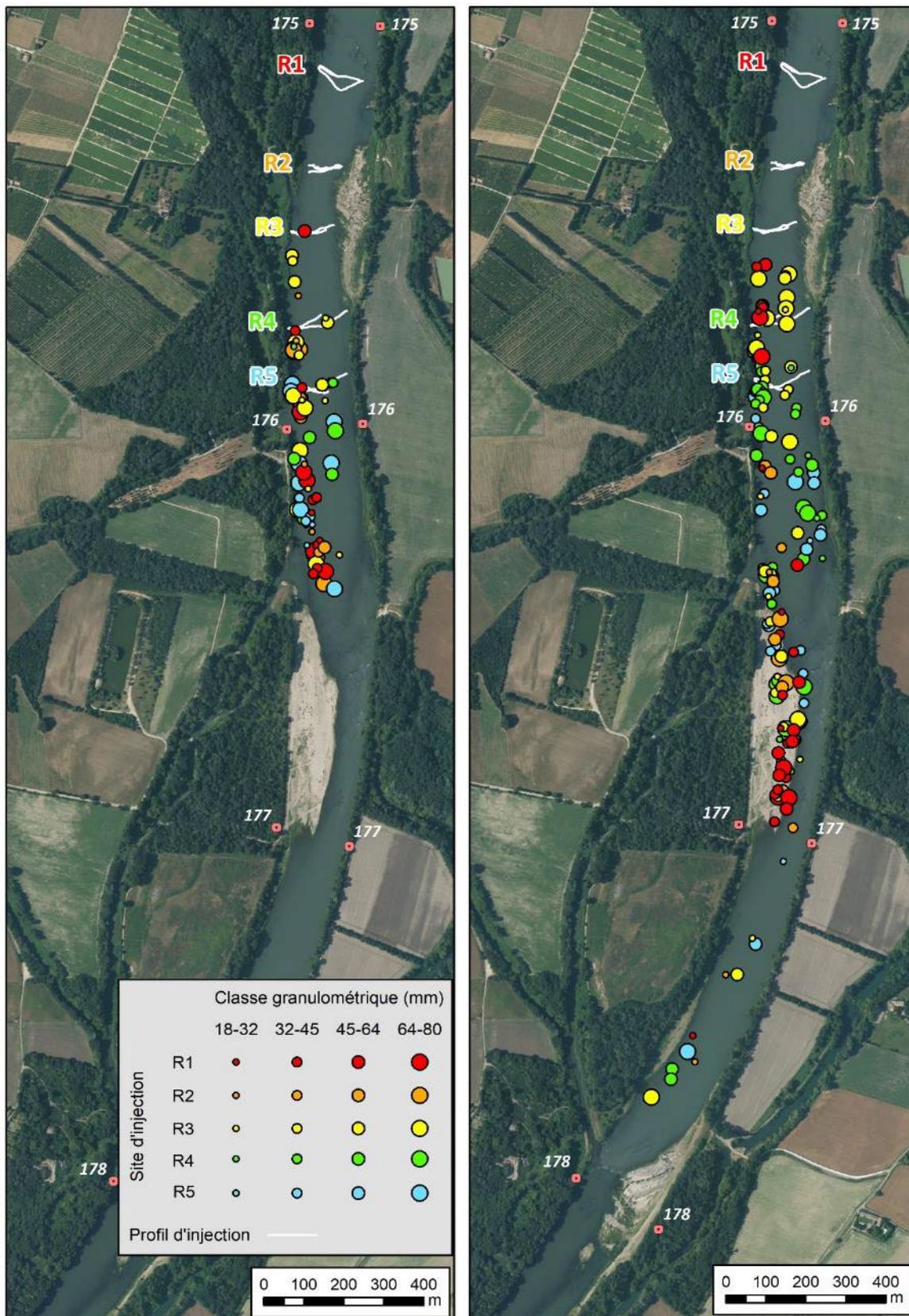


Figure 41. L'Île des Dames : localisation des traceurs pour les relevés S4 et S5 (la couleur des symboles indique le profil d'injection des traceurs et la taille des symboles désigne leur classe granulométrique)

2.6 Eléments de synthèse sur les traceurs RFID

Les objectifs de cette section sont : (i) de quantifier le charriage en termes de distance et de vitesse de transport pour les différents sites étudiés, (ii) de comparer ces métriques entre les différents types de sites (i.e, sites pavés soumis à une réinjection sédimentaire vs. sites dynamiques), et (iii) d'évaluer l'importance des variables qui contrôlent le transport sédimentaire (i.e., l'occurrence et l'intensité des crues, la taille des sédiments, la morphologie du chenal, la texture du lit et les conditions hydrauliques locales).

2.6.1 Comparaison inter-sites en termes de distance et vitesse de transport par charriage

Le Tableau 25 synthétise les distances de transport mises en évidence pour les sites étudiés dans ce travail. Les vitesses de transport y sont calculées selon le temps calendaire (i.e., en tenant compte des périodes d'activité et d'inactivité de transport par charriage). Bien que ce calcul porte sur plusieurs années (entre 3 et 6 ans selon les sites), cette comparaison reste néanmoins 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. C'est pourquoi il est préférable de réaliser ce travail de comparaison sur la base des vitesses virtuelles (Haschenburger et Church, 1998). Cette dernière est calculée en divisant la distance parcourue par la durée cumulée des pics de crues où $Q \geq Q_c$ (Tableau 26).

Tableau 25. Synthèse des vitesses de transport calculées selon le temps calendaire

	Durée suivi (année)	Distance moyenne (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	40.8	14	475	160
DZM	4.2	830	198	2486	593

La vitesse virtuelle peut être calculée à partir des métriques de distance calculées entre deux relevés successifs (S_i vs S_{i-1}) ou en comparant chaque relevé avec sa position d'injection (S_i vs. S_0). Cette dernière approche offre l'avantage de reposer sur de plus grands échantillons de traceurs (*cf. supra*). En effet, lorsqu'un suivi souffre d'un relevé caractérisé par un faible pourcentage de récupération lié à une prospection incomplète (comme pour le relevé S4 à CHA), cela affecte le travail de comparaison avec les autres relevés (approche S_i vs. S_{i-1}). Dans ce cas, il est donc préférable de privilégier l'approche S_i vs. S_0 .

Tableau 26. Synthèse des métriques hydrologiques et de distances et vitesses virtuelles pour l'ensemble des sites équipés de traceurs RFID sur le Rhône

Site	Relevé	Q _{max} (m ³ /s)	Q _{max} / Q _c	Pente pour Q _{max} (m/m)	Largeur pour Q _{max} (m)	Puissance spécifique de Q _{max} (W/m ²)	S _i vs S _{i-1}				S _i vs S ₀			
							Dist moy (m)	Vitesse virtuelle moy (m/h)	Dist max (m)	Vitesse virtuelle max (m/h)	Dist moy cumul (m)	Vitesse virtuelle moy (m/h)	Dist max cumul (m)	Vitesse virtuelle max (m/h)
CHA	S1	224	0.44	0.00032	107	7	10	0.00	79	0.00	10	0.00	79	0.00
CHA	S2	1926	3.78	0.00049	120	76	199	1.99	1076	10.76	327	3.27	1340	13.40
CHA	S3	728	1.43	0.00049	120	29	1	0.05	31	1.41	336	2.75	1679	13.76
CHA	S4	814	1.60	0.00049	120	32	5	0.09	259	4.47	325	1.81	1328	7.38
CHA	S5	1395	2.74	0.00049	120	55	85	0.64	598	4.53	701	2.25	2435	7.80
JONS	I1 S1	1021	2.32	0.00080	123	65	448	5.60	1066	13.33	448	5.60	1066	13.33
JONS	I2 S1	751	1.71	0.00082	97	62	22	0.23	104	1.08	22	0.24	104	1.08
JONS	I2 S2	2068	4.70	0.00091	142	129	735	1.53	2566	5.33	1086	1.88	2661	4.61
JONS	I2 S3	2048	4.65	0.00091	142	129	644	1.13	2432	4.28	1770	1.55	4932	4.31
JONS	I2 S4	2148	4.88	0.00091	145	133	486	0.94	2613	5.03	2359	1.42	5660	3.40
NEYR	S1	1021	2.32	0.00019	97	20	106	2.86	266	7.19	106	2.86	266	7.19
NEYR	S2	2322	5.28	0.00027	116	52	1316	1.31	2869	2.85	1343	1.29	2955	2.84
PDR_SC	S1	1458	3.12	0.00102	218	67	9	0.01	129	0.21	9	0.014	129	0.21
PDR_SC	S2	2117	4.52	0.00107	228	97	6	0.02	93	0.22	11	0.010	93.6	0.09
PDR_SC	S3	2828	6.04	0.00110	234	131	16	0.01	230	0.09	41	0.011	474.9	0.13
PDR_GA	S1	526	1.12	0.00080	174	24	12	1.29	32	3.56	12	1.29	32	3.56
PDR_GA	S2	3021	6.45	0.00110	234	140	386	0.16	976	0.39	415	0.17	2080	0.84
PDR_GA	S3	2828	6.04	0.00110	234	131	377	0.11	3045	0.86	915	0.15	3652	0.61
DZM	S1	548	0.46	0.00118	138	46	3.3	0.00	22	0	3.3	0	22	0
DZM	S2	1894	1.60	0.00157	173	169	18.0	0.32	269	4.80	41	0.73	283	5.05
DZM	S3	2227	1.89	0.00167	181	201	51.0	0.13	775	1.91	187	0.41	903	1.96
DZM	S4	3728	3.16	0.00211	219	352	475.0	0.49	1142	1.18	541	0.38	1270	0.89
DZM	S5	3606	3.05	0.00207	216	339	235.0	0.90	662	2.54	830	0.49	2486	1.47

2.6.2 Caractérisation des variables qui contrôlent le transport sédimentaire par charriage

D'après la littérature relative aux traçages sédimentaires, il est reconnu que l'intensité du débit de pointe est le paramètre principal qui contrôle la mobilité de la charge de fond (Vázquez-Tarrío et al., 2019 ; Liébault et al., 2023). Néanmoins, cette dernière dépend également, dans une certaine mesure, (i) du nombre et de la durée des crues de la période étudiée, (ii) de la taille des particules, (iii) de la configuration morphologique du chenal, (iv) de la texture du lit et (v) des conditions hydrauliques locales (Vázquez-Tarrío et al., 2019 ; Peeters et al., 2021 ; Liébault et al., 2023).

Contrôle hydraulique sur les distances de transport

Afin d'explorer le lien entre les distances de propagation et l'intensité des crues à partir des données obtenues sur le Rhône, plusieurs tests de corrélation ont été réalisés avec différentes métriques couramment utilisées dans les précédentes études sur le Rhône (Vázquez-Tarrío et al., 2021) ou par ailleurs (Papangelakis et al., 2022). Alors que les métriques qui permettent de définir le déplacement des traceurs (e.g., distance moyenne de tous les traceurs ou par classe granulométrique, vitesse virtuelle) sont bien identifiées, il n'existe pas de consensus en ce qui concerne les métriques qui caractérisent les conditions hydrauliques de transport (e.g., débit de pointe, contrainte de cisaillement, puissance brute, spécifique ou adimensionnelle).

Une métrique couramment utilisée pour caractériser l'énergie du cours d'eau à l'échelle du secteur est la puissance spécifique. Elle représente la capacité de travail qu'un cours d'eau peut effectuer et constitue de ce fait un bon indicateur du transport de la charge de fond (compétence effective, distance parcourue) (Petit et al., 2005). Comme elle se calcule à partir de variables simples (i.e., débit, pente de la ligne d'énergie et largeur du lit mouillé), la puissance spécifique est un paramètre plus facile à calculer que d'autres métriques hydrauliques, comme la contrainte de cisaillement par exemple. La puissance spécifique (ω exprimée en W/m^2) est déterminée par :

$$\omega = \frac{g \cdot \rho \cdot S \cdot Q}{w} \quad \text{Équation 2}$$

avec g l'accélération de la pesanteur (en m/s^2), ρ la masse volumique du fluide (en kg/m^3), Q le débit (en m^3/s), S la pente longitudinale (en m/m) et w la largeur du lit (en m).

La Figure 42 A met en relation la distance moyenne entre deux relevés successifs des traceurs (S_i vs S_{i-1}), d'une part, et la puissance spécifique du débit de pointe de la période comprise entre ces deux relevés successifs, d'autre part. Il apparaît que deux sites présentent une droite de régression avec un bon coefficient de détermination (R^2) : DZM et PDR_GA (GA pour "gravel augmentation" ; réinjection sédimentaire) ; bien que, pour ce dernier, la droite repose sur peu de points regroupés en deux pôles (pas de valeurs intermédiaires de puissance spécifique). Par contre, les autres sites possèdent de moins bonnes relations (R^2 entre 0,43 et 0,57) : CHA, LYM et PDR_SC (SC pour "side channel" ; bras latéral à l'emplacement des anciens casiers). Dans le cas de CHA, la relation n'est pas vraiment satisfaisante ($n : 5 ; R^2 : 0,57$) à cause du point associé au premier relevé post-injection (S_1) qui montre une distance moyenne de

déplacement de 10 m en l'absence d'évènements mobilisateurs. En retirant le relevé S1 du jeu de données, la relation s'améliore ($n : 4 ; R^2 : 0,90$). Ceci montre l'intérêt de faire la distinction, dans ce type d'analyse, entre le premier relevé après injection et les autres relevés (comme l'ont souligné Houbrechts et al., 2015 ; et Vázquez-Tarrío et Batalla, 2019). En effet, le premier relevé après injection concerne des particules qui sont susceptibles d'avoir été mobilisées pour des débits inférieurs au Q_c car ces éléments ne reposaient pas sur le lit dans des conditions naturelles d'imbrication. Les relevés suivants concerneront des traceurs qui se seront réorganisés dans des conditions naturelles d'imbrication.

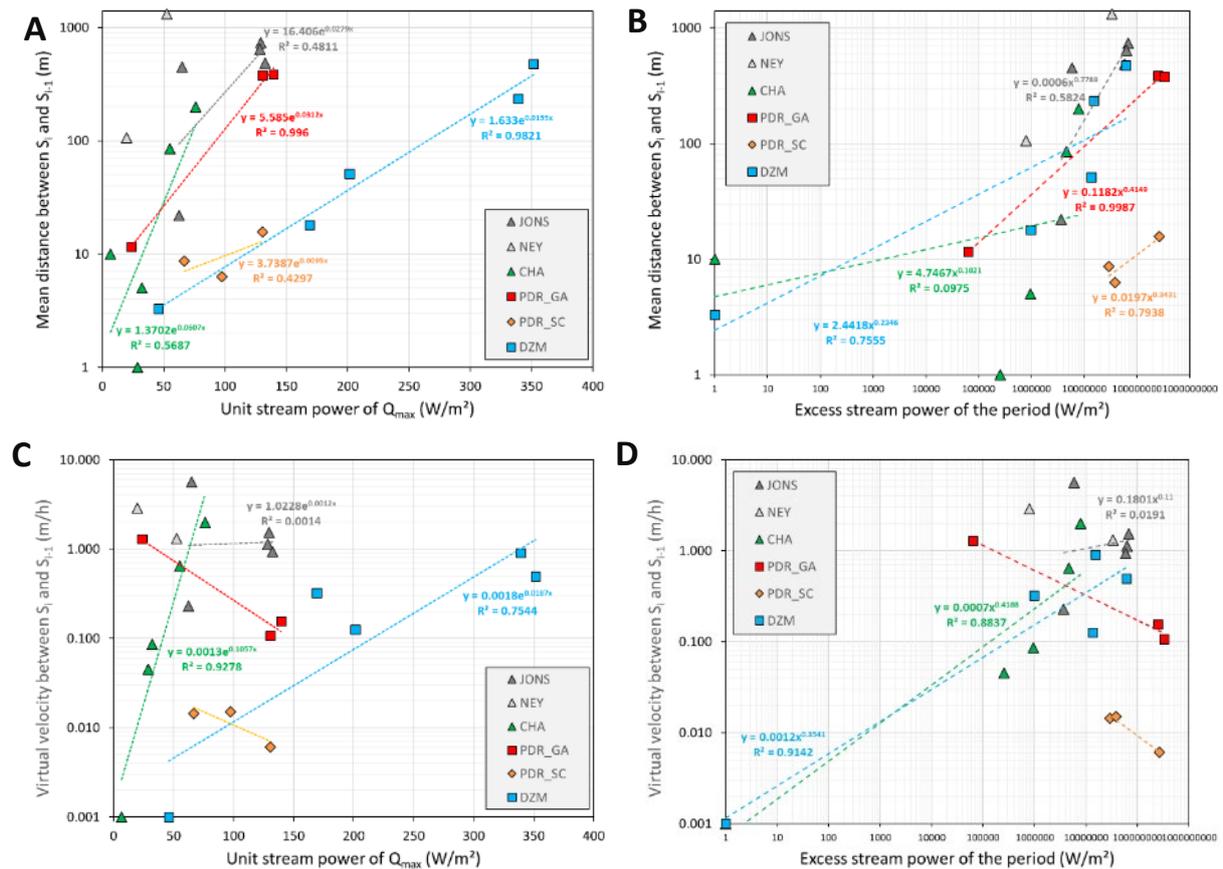


Figure 42. Relation entre les métriques hydrauliques (puissance spécifique et excès de puissance par période) et les métriques de transport (distance et vitesse virtuelle) calculées entre deux relevés successifs (S_i vs S_{i-1})

Les distances de transport ont également été comparées avec d'autres métriques décrivant les conditions hydrauliques, notamment avec l'excès de puissance spécifique de la période considérée. L'excès de puissance se définit comme la différence entre la puissance spécifique du débit de pointe d'une crue donnée et la puissance spécifique critique ($\omega_t - \omega_c$), c'est-à-dire la puissance nécessaire pour mobiliser un grain de taille D_i (Hassan *et al.*, 1992). Le calcul de puissance spécifique critique nécessite dès lors de connaître le débit de mobilisation de la charge de fond (Q_c), qui a été déterminé grâce aux relevés RFID (*cf.* §2.1 à §2.5). Dans notre cas, l'excès de puissance a été calculé pour chaque valeur de débit horaire de la période où $Q > Q_c$ (période t délimitée par t_s et t_e) :

$$\sum_{t_s}^{t_e} (\omega_t - \omega_c) = \sum_{t_s}^{t_e} \frac{\rho \cdot g \cdot S \cdot (Q_t - Q_c)}{w} \Delta t \quad \text{Équation 3}$$

L'avantage de travailler avec l'excès de puissance cumulé de la période $S_i - S_{i-1}$ est de tenir compte de l'ensemble des événements hydrologiques de la période étudiée (et pas seulement de la crue la plus importante). Dans le cas du site de Jons, où plusieurs crues morphogènes caractérisent certaines périodes, la relation est améliorée (Figure 42 B). C'est également le cas pour PDR_SC. En revanche, cette approche n'améliore pas les relations pour les autres sites.

Ces deux métriques hydrauliques ont également été mises en relation avec la vitesse virtuelle des traceurs (Figure 42 C et D). De la sorte, seuls les sites de CHA et de DZM montrent de bonnes relations (R^2 entre 0,75 et 0,93), les autres sites présentant de mauvaises relations, voire des relations négatives. Les relations négatives observées à PDR_GA et PDR_SC s'expliquent par (i) le faible nombre de points sur lesquels la relation est basée et (ii) par des vitesses virtuelles surestimées pour les relevés S1 (distances proportionnellement plus élevées pour les relevés S1 en lien avec les conditions d'imbrication).

Ces métriques ont également été calculées en comparant chaque relevé S_i avec son injection S_0 (période entre S_i et S_0 ; Figure 43). La distance $S_i - S_0$ correspond à la distance parcourue par le centre du nuage de traceurs entre deux relevés (le *tracer cloud centroid* d'après Arnaud et al., 2017). Les relations pour chaque site semblent relativement bonnes en utilisant la distance moyenne entre S_i et S_0 . Rappelons que cette approche est plus robuste car elle repose sur de plus grands échantillons de traceurs. En revanche, l'utilisation de la vitesse virtuelle ne fonctionne bien que pour CHA et DZM.

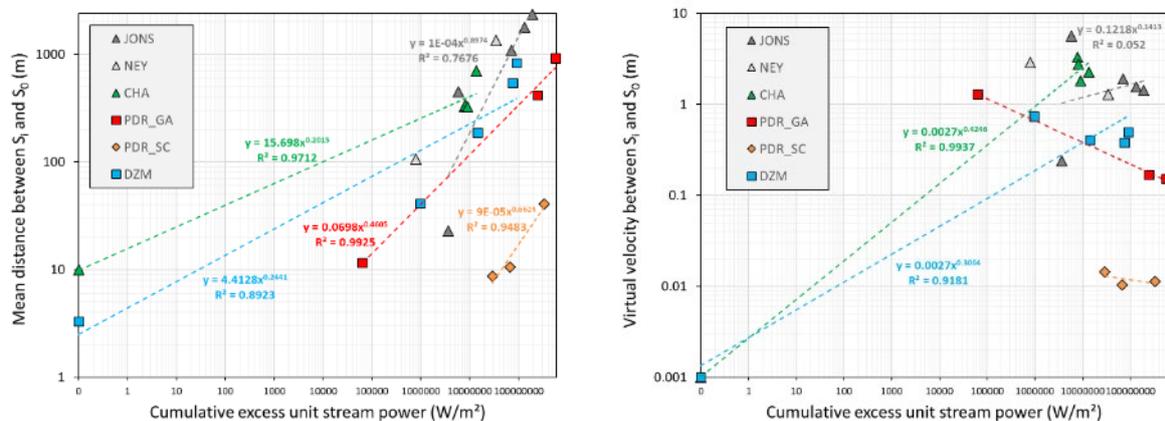


Figure 43. Relation entre l'excès de puissance spécifique cumulée et les métriques de transport (distance et vitesse virtuelle) calculées entre chaque relevé (S_i) et l'injection des traceurs (S_0)

Le fait que les relations établies pour chaque site ne présentent pas la même pente s'explique par les effets des autres variables que sont la taille des traceurs et les différences locales des secteurs étudiés (i.e., en termes de configuration morphologique du chenal, de texture du lit et d'hydraulique locale). Il apparaît ainsi que, à puissance spécifique égale, les distances de déplacement sont plus importantes pour les secteurs dynamiques (JONS, NEYR et CHA) que pour les secteurs pavés (PDR_GA, PDR_SC et DZM). Le secteur réinjecté à PDR (PDR_GA) fait figure d'exception mais ceci est probablement lié à un sous-dimensionnement des traceurs

pour ce site (i.e., pas de particules marquées supérieures à 80 mm). De même, le site des marges de PDR (PDR_SC) montre de faibles distances de transport mais c'est davantage lié à sa position particulière entre la berge et le cordon d'îlots (i.e., conditions hydrauliques locales différentes des conditions hydrauliques moyennes que l'on calcule ici).

Effet de la taille des particules sur les distances de transport

L'analyse détaillée réalisée par site 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). Il faut néanmoins préciser que 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.

Afin d'isoler les effets de taille d'autres effets susceptibles de masquer les variations entre les différentes classes de taille, plusieurs auteurs ont établi des relations taille vs. distance en normalisant ces deux variables. Ainsi, Church et Hassan (1992) ont observé, à partir d'une large base de données de terrain, que le rapport « Distance moyenne pour chaque classe de taille/Distance pour la classe médiane » (L^*) est en général corrélé avec le rapport « Classe de taille/Taille médiane du lit » (D^*). La courbe de tendance qui s'ajuste sur leur jeu de données possède une relation du type :

$$L^* = 1.77 \cdot (1 - \log_{10} D^*)^{1.35} \quad \text{Équation 4}$$

Par la suite, Milan (2013) et Vázquez-Tarrío et al. (2019) ont proposé des relations similaires à partir de données de terrain et d'une compilation des données de la littérature, respectivement.

A partir de l'ensemble des données de traçage réalisées sur le Rhône, une relation similaire a pu être établie (Figure 44). Bien que les points sur lesquels elle s'ajuste soient fort dispersés ($n : 96 ; R^2 : 0,28$), cette courbe suit globalement la courbe décrite par Vázquez-Tarrío et al. (2019) de par sa forme convexe et sa position. Elle indique que les traceurs qui possèdent un diamètre inférieur au D50 du lit ($D^* < 1$) parcourent des distances similaires. Par contre, les distances de transport diminuent rapidement au fur et à mesure que la taille des traceurs s'éloigne de celle du D50 du lit ($D^* > 1$).

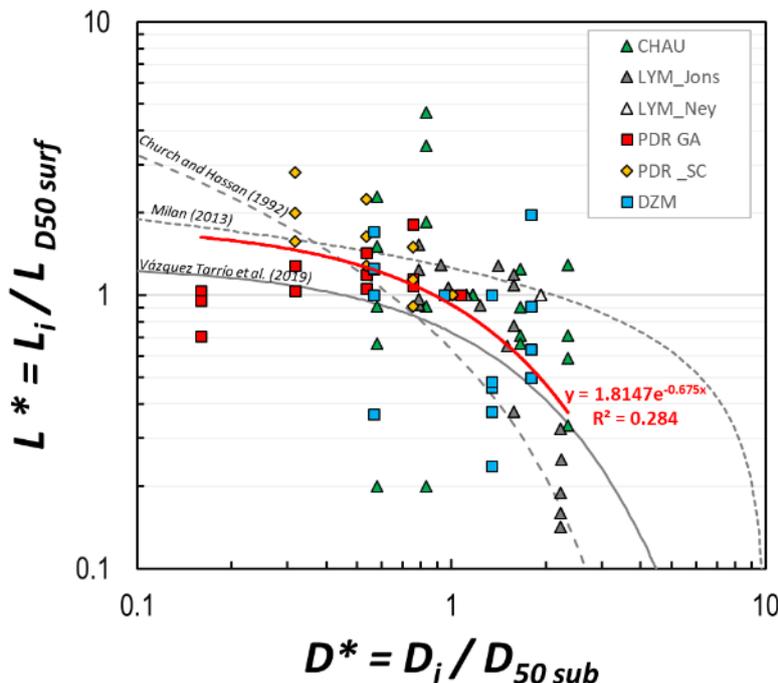


Figure 44. Relation entre le diamètre normalisé des particules et la distance normalisée calculés entre deux relevés successifs (S_i vs S_{i-1})

Cette analyse pourrait être en partie biaisée par la prise en compte du premier relevé après injection (S_1). En effet, on considère que, pour ce relevé, les traceurs ne sont pas encore imbriqués naturellement dans le lit (conditions dites *unconstrained exp.*) et qu'ils peuvent par conséquent être mobilisés et parcourir des distances plus importantes que s'ils étaient déjà imbriqués dans le lit (conditions dites *constrained exp.*). Afin de vérifier cet éventuel biais, les points relatifs aux relevés S_1 ont été retirés. Il apparaît cependant que la courbe issue de la régression est très similaire à celle obtenue avec les points S_1 ($n : 67 ; R^2 : 0,25$).

Effet de la morphologie du lit sur les distances de transport

Afin de mettre en évidence l'influence des autres variables de contrôle sur les distances de transport, la puissance hydraulique non dimensionnelle au pic de crue a été utilisée (Eaton et Church, 2011). La puissance hydraulique non dimensionnelle (ω^*) représente la puissance hydraulique brute normalisée par le poids submergé de la particule :

$$\omega^* = \frac{g \cdot S \cdot Q}{w \cdot (1.65 \cdot g \cdot D_{50})^{3/2}} \quad \text{Équation 5}$$

où S est la pente, Q le débit au pic de crue, w la largeur du chenal et D_{50} la taille médiane du sédiment du lit (dans ce cas-ci, la taille médiane des traceurs).

Cette métrique permet de normaliser le forcing hydraulique par le poids de la particule. De la sorte, différentes études ont mis en évidence des patrons de covariation entre distances et débits (Lajeunesse et al., 2010 ; Phillips et al., 2013). Cette métrique permet de mettre en évidence l'effet morphologique du lit (taille du chenal, macro-formes, rugosité du lit) sur les distances de transport. Sur la base d'une méta-analyse de données tirées de la littérature, Vázquez-Tarrío et al. (2019) sont parvenus à distinguer différents types morphologiques de cours d'eau (*SP : step pool ; RP : riffle pool ; PB : plane bed ;* sur la Figure 45). Leur travail a

également permis de distinguer les conditions d'imbrication des traceurs dans le chenal, en distinguant le premier relevé après injection (*unconstrained exp.*) des autres relevés (*constrained exp.*).

En superposant les données calculées pour le Rhône à celles de la littérature, il apparaît que, à puissance adimensionnelle égale, la distance moyenne est plus importante dans les Vieux-Rhône qui possèdent un contexte actif (JONS, NEYR, CHA) que dans ceux qui présentent un contexte pavé (PDR, MARGE, DZM). De plus, les points des Vieux-Rhône en contexte actif se positionnent, dans l'ensemble, près des types morphologiques "seuil/mouille" (RP), tandis que les Vieux-Rhône en contexte pavé sont plus proches des types "lit plat" (PB) et "en escalier" (SP).

Par ailleurs, les conditions d'imbrication se marquent également en faisant la distinction entre le premier relevé après injection (*unconstrained exp.* ; forme avec un liseré rouge) et les autres relevés (*constrained exp.* ; forme avec un liseré noir).

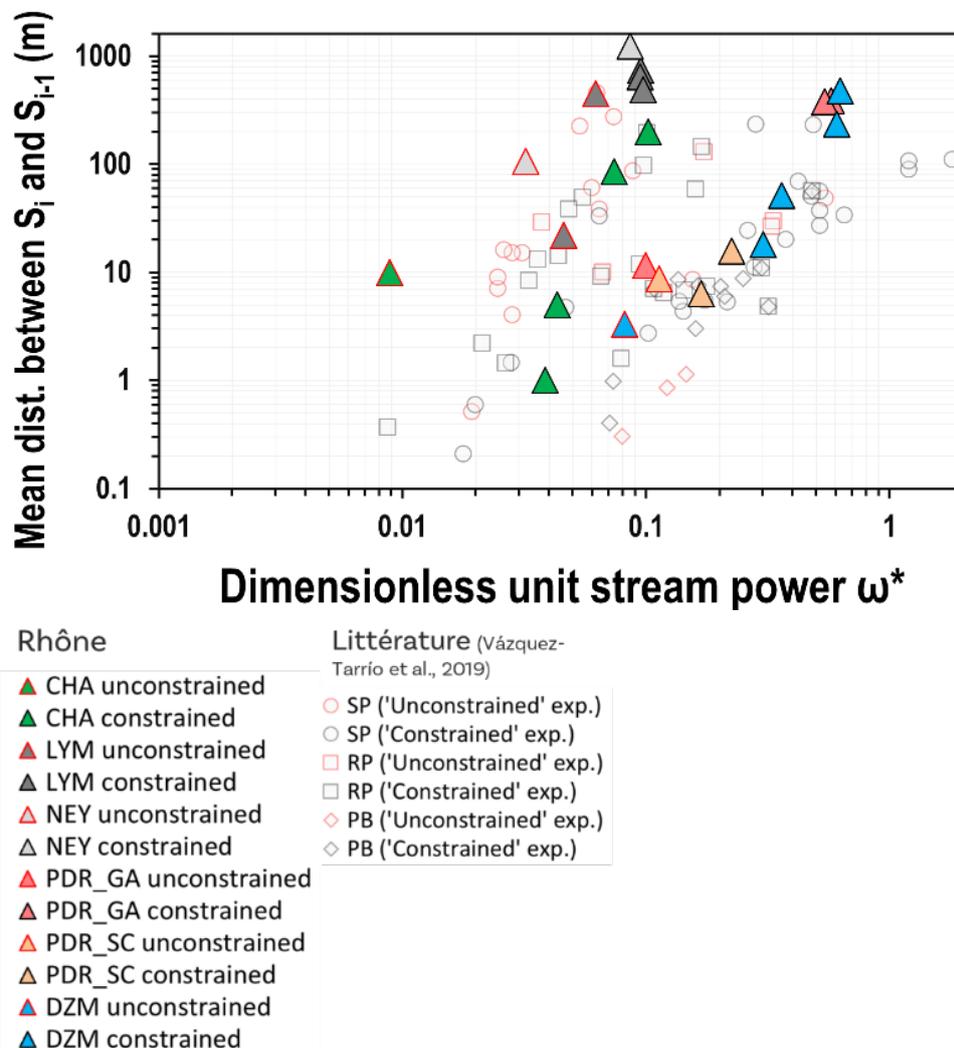


Figure 45. Rapport entre la distance moyenne et la puissance adimensionnelle pour le Rhône et un ensemble de données de traçage rassemblé par Vázquez-Tarrío et al. (2019) (SP : lit en escaliers, *step pool* ; RP : lit avec alternance seuil/mouille, *riffle pool* ; PB : lit plat, *plane bed*).

Enfin, pour également mettre en évidence l'effet de la morphologie du lit sur les distances de transport, l'indice "Energy Expenditure Index" (EEI ; défini par Vázquez-Tarrío et Batalla, 2019) a été calculé selon :

$$EEI = \frac{(\omega - \omega_c) \cdot t}{L} \quad \text{Équation 6}$$

où ω (W/m^2) est la puissance spécifique de la crue maximale de la période $S_i - S_{i-1}$, ω_c (W/m^2) le débit critique de mise en mouvement des particules, t (en secondes) le temps durant lequel $Q > Q_c$ durant la période $S_i - S_{i-1}$, et L la distance moyenne parcourue par les traceurs entre S_i et S_{i-1} .

Cet indice permet de quantifier la quantité d'énergie nécessaire pour déplacer les traceurs par unité de longueur (i.e., 1 m). Il a été calculé avec la puissance spécifique (Figure 46 à gauche) mais aussi avec la puissance spécifique adimensionnelle (Figure 46 à droite), ce qui permet de s'affranchir de l'effet de la taille des traceurs. De la sorte, seuls les effets liés à la texture du fond du lit (phénomènes d'imbrications) et à l'hydraulique locale sont conservés.

Calculé pour les relevés réalisés sur le Rhône, il met bien en évidence des effets contrastés entre les différents types de secteurs. Ainsi, les sites pavés nécessitent plus d'énergie que les sites dynamiques pour mobiliser la charge de fond (différence d'un ordre de grandeur). Le site de PDR_SC (site avec réinjection granulométrique passive) possède, quant à lui, la plus grande valeur d'EEI (différence de deux ordres de grandeur par rapport aux sites dynamiques). Pour ce dernier, ces différences s'expliquent par l'hydraulique locale, à savoir la position des traceurs entre le pied de berge et le cordon d'îlots (marges alluviales).

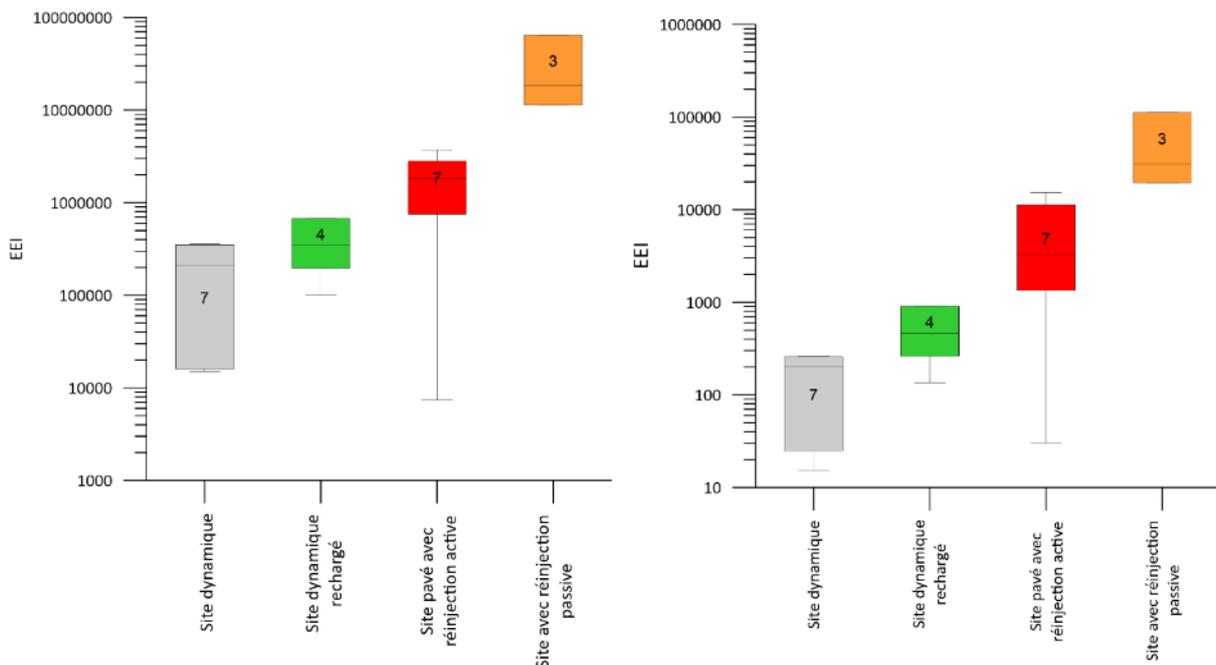


Figure 46. Classification des différents sites étudiés selon l'"Energy Expenditure Index" (EEI ; d'après Vázquez-Tarrío et Batalla, 2019) calculé avec la puissance spécifique (ω ; à gauche) et la puissance spécifique adimensionnelle (ω^* ; à droite)

2.6.3 Synthèse pour le Vieux Rhône de PDR

Le suivi du transport sédimentaire consécutif aux deux actions de restauration réalisées dans le RCC de PDR a permis de mettre en évidence des vitesses de déplacement de la charge de fond pour différentes unités fluviales au sein d'un même tronçon court-circuité (Tableau 27). Comme les deux suivis des traçages sédimentaires effectués dans le RCC de PDR présentent des périodes hydrologiques légèrement différentes, la comparaison des vitesses de transport pour les différentes unités fluviales nécessite de calculer les vitesses virtuelles (Haschenburger et Church, 1998). De la sorte, il apparaît que les sédiments issus de la réinjection sédimentaire (vitesse de 0,15 m/h) enregistrent des vitesses beaucoup plus importantes que celles des sédiments remobilisés depuis les sites de démantèlement des casiers (vitesse de 0,01 m/h). Cet écart d'un ordre de grandeur s'explique principalement par la position des particules dans le chenal et par les contraintes hydrauliques locales auxquelles elles sont soumises (merlon d'injection dans le chenal principal vs. marge). En outre, des différences apparaissent également au sein des sédiments issus de la réinjection selon qu'ils se déplacent dans le thalweg principal (vitesse de 0,23 m/h) ou sur le grand banc de convexité (vitesse de 0,06 m/h).

Tableau 27. 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



Par ailleurs, la restauration de la dynamique sédimentaire a permis de diversifier les habitats aquatiques et de les améliorer localement. C'est notamment le cas dans la partie amont du secteur où les casiers ont été démantelés. Ce secteur a bénéficié d'un apport de galets issus de la réinjection sédimentaire réalisée 2,2 km en amont, comme l'indique la présence d'un

traceur issu du site « réinjection sédimentaire ». Ces galets se sont déposés dans le chenal secondaire sous la forme d'un dépôt (accolé à l'îlot), qui se prolonge par un radier qui fournit un habitat potentiellement attractif pour la faune aquatique (substrat et vitesses propices aux invertébrés et aux poissons lithophiles ; Figure 47). Ceci souligne la complémentarité de ces deux actions de restauration. De plus, compte tenu de la mobilité mise en évidence dans ce travail, les secteurs restaurés devraient continuer à bénéficier à moyen terme des effets positifs de la redynamisation sur les habitats benthiques. La poursuite des suivis permettra de préciser les échelles temporelles de la persistance des effets de ces deux types d'action sur les milieux restaurés. Bien que la réponse biologique consécutive à l'amélioration des habitats ne soit pas traitée dans le cadre de ce travail, un suivi de l'évolution des communautés aquatiques et riveraines permettrait d'établir des liens entre les habitats et la biologie, ce qui fournirait une évaluation plus globale des opérations de restauration. A ce titre, davantage de liens devraient être tissés entre les programmes OSR7 et RhônEco (programmation 2024-2028), ainsi qu'avec les suivis effectués par la RNN de la Platière.



Figure 47. Bras secondaire réhabilité dans la partie amont du secteur de démantèlement des casiers 5 ans après travaux (vue vers l'aval, 1/03/2022)

3. Modélisation hydro-sédimentaire

3.1 Rappels théoriques

Dans le cadre des actions de réinjection sédimentaire opérées sur différents secteurs du Rhône, il importe de déterminer le temps de transfert des sédiments réinjectés pour quitter le RCC et pour atteindre la retenue de barrage localisée à l'aval des points d'injection. Outre l'enjeu écologique (durée des effets des actions de restauration), ce type d'actions représente aussi un enjeu de sécurité des biens et des personnes, notamment en ce qui concerne la sûreté hydraulique des barrages. C'est pourquoi ce travail de modélisation répond aux questions opérationnelles telles que le temps de transfert jusqu'aux zones potentiellement sensibles et la répartition des dépôts sur le continuum.

La démarche méthodologique avait déjà été décrite dans le rapport du programme OSR5 (action A.2.4 ; Vázquez-Tarrío et al., 2021). Elle consiste à combiner l'estimation des volumes de sédiment mobilisés (à partir des calculs de transport par charriage par des équations de transport solide) avec la distribution des distances de propagation des particules sédimentaires (déduites à partir des données de traçage obtenues sur le terrain). Plus spécifiquement, le protocole que nous proposons suit quatre grandes étapes de travail (Figure 48) :

1. Définir une grille de modélisation 1D (maille de 50 m) pour laquelle le nœud le plus à l'amont correspond au point d'injection de la réinjection sédimentaire et le nœud le plus à l'aval au barrage aval du secteur d'étude ;
2. Associer à chaque nœud une valeur de capacité annuelle de transport par charriage, estimée avec l'équation de Recking (Recking et al., 2016) ;
3. Associer à chaque nœud une valeur de distance moyenne de propagation des particules injectées et une distribution de probabilité des distances de déplacement autour de cette moyenne (à l'aide des données de traçage sédimentaire RFID) ;
4. Réaliser la simulation, avec une injection du volume de sédiment dans le nœud amont et une remobilisation ensuite du sédiment injecté au cours du temps.

La description détaillée de ces étapes peut être consultée dans l'article qui a été consacré à cette méthode (Vázquez-Tarrío et al., 2023).

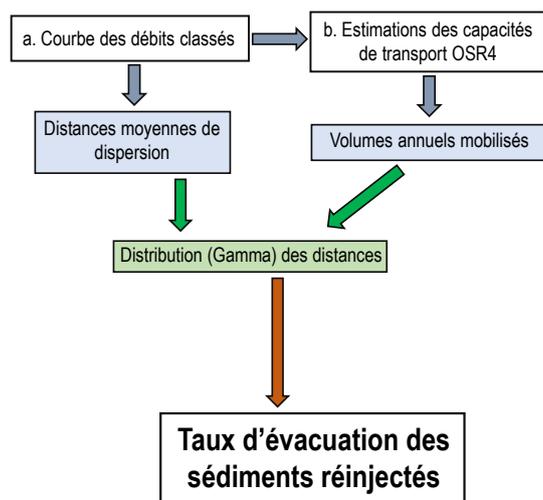


Figure 48. Schéma méthodologique suivi pour l'estimation des temps de propagation des injections ponctuelles de sédiment grossier.

3.2 Le Vieux Rhône de Péage-de-Roussillon

La démarche méthodologique a été appliquée au RCC de Péage-de-Roussillon, où 6885 m³ de sédiments grossiers avaient été injectés dans la partie amont de ce Vieux Rhône en 2017 (soit 1,3 km en aval du barrage de Saint-Pierre-de-Boëuf ; détails sur le contexte des travaux au §2.3.1.). Les enjeux liés à la sûreté hydraulique des aménagements du barrage d'Arras (localisé 28 km en aval du site d'injection sédimentaire) nécessitent d'évaluer le temps de propagation de ces sédiments pour atteindre la retenue de ce barrage. C'est pourquoi, le comportement de la réinjection à Péage-de-Roussillon a été modélisée sur une période de 50 ans (Figure 49).

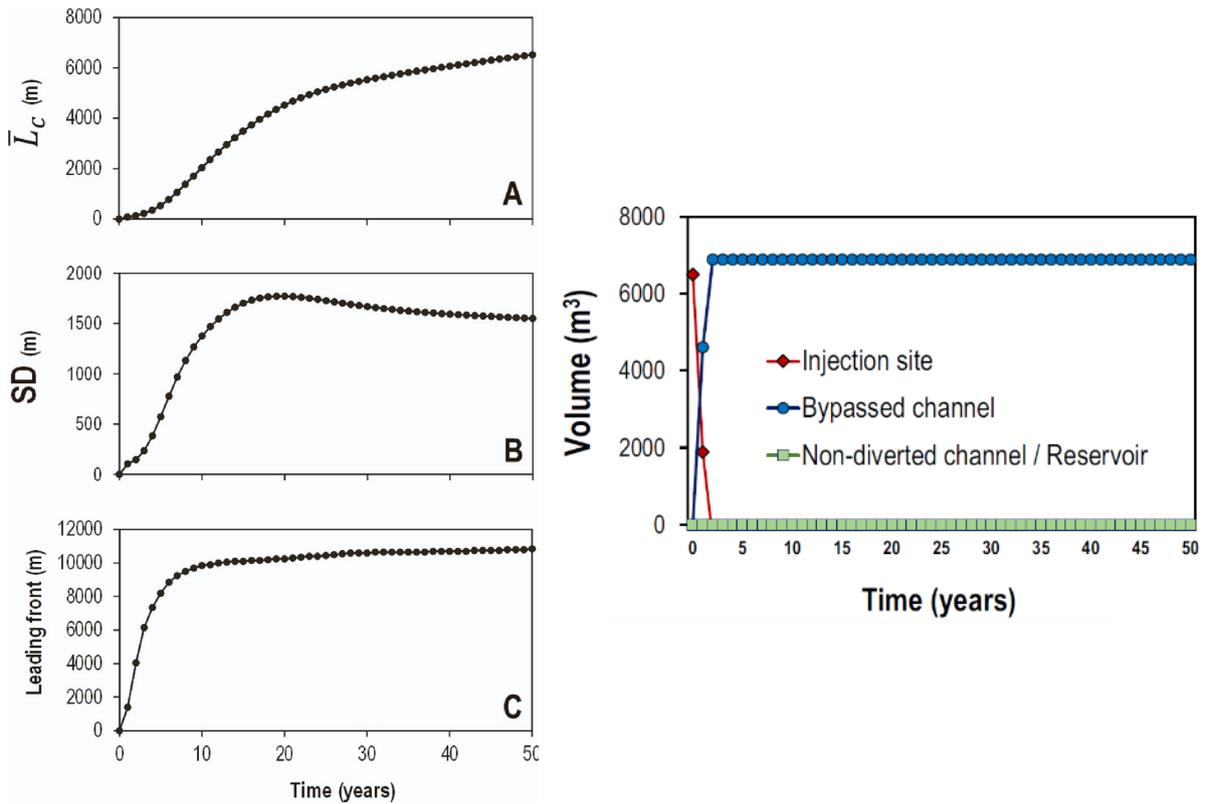


Figure 49. Réinjection sédimentaire de la Platière : évolution au cours du temps de la position du centroïde du panache sédimentaire (\bar{L}_C ; en m), de l'écart-type (SD ; en m), de la position du front de propagation (en m), et du volume de sédiment au niveau du site d'injection, dans le RCC et dans le Rhône Total.

Le modèle montre une augmentation linéaire de la position du centroïde du panache sédimentaire au cours des 10 à 20 premières années (Figure 49 A). Après 10 ans, le front de progression de la vague sédimentaire s'arrête de progresser vers l'aval, ce qui suggère que les sédiments qui se trouvent à l'avant du panache sont arrivés à des positions stables dans le chenal (Figure 49 C). La composante dispersive du déplacement de sédiments se marque, quant à elle, par l'évolution de l'écart-type qui augmente de manière linéaire au cours des 10 premières années, indiquant que le panache s'étend en migrant vers l'aval (Figure 49 B). Entre 10 et 20 ans, la dispersion des sédiments commence à ralentir. Puis, à partir de ~ 20 ans, la composante advective du panache sédimentaire commence à ralentir, ce qui se marque par un changement de pente, le changement de comportement se poursuit et l'écart-type tend même à diminuer, ce qui suggère que le déplacement du panache sédimentaire commence à être dominé par la translation plutôt que par la dispersion. Ceci est clairement attribué à l'arrivée du front de propagation de la vague sédimentaire dans la retenue du seuil-déversoir de Peyraud (seuil installé dans les années 1970 afin de maintenir le niveau de la nappe phréatique dans la plaine alluviale), où la diminution soudaine de la pente entraîne une chute de la capacité de charriage.

La modélisation indique que la répartition longitudinale du volume de sédiment le long du secteur étudié évolue dans le temps à la manière d'un mouvement d'accordéon (Figure 50). C'est au cours des premières années qui suivent l'injection que le front de progression va migrer vers l'aval beaucoup plus rapidement que les sédiments situés à la queue du panache,

ce qui se marque par un étalement du panache (Figure 49 A). Par la suite, lorsque les sédiments du front de progression atteignent la retenue du déversoir, ils trouvent une position stable dans le chenal. La progression vers l'aval des sédiments se poursuit à l'arrière de la vague sédimentaire et les sédiments s'accumulent progressivement dans la retenue du déversoir, ce qui se marque par une diminution de la dispersion du panache.

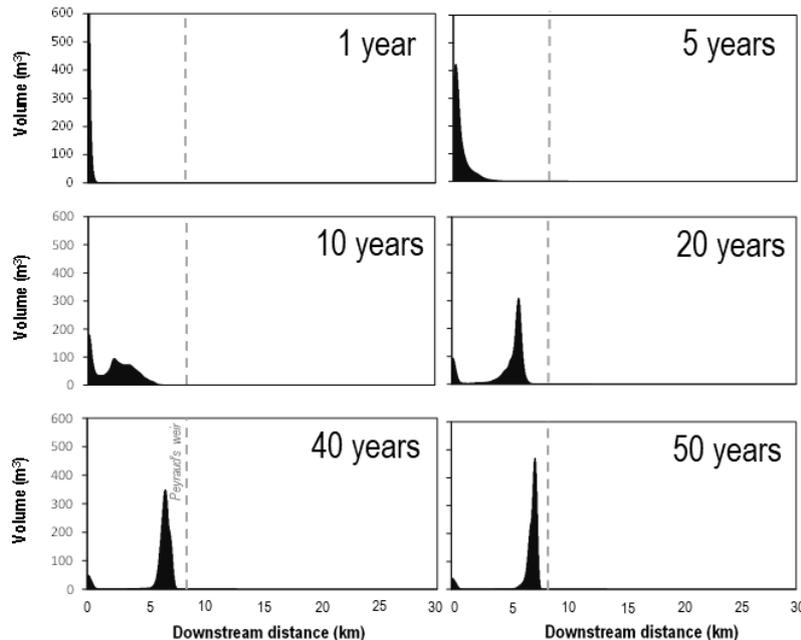


Figure 50. Réinjection sédimentaire de la Platière : répartition longitudinale du volume de sédiment depuis le site de réinjection sédimentaire (= 0 km) après 1 an, 5 ans, 10 ans, 20 ans, 40 ans et 50 ans.

Au final, ces résultats mettent en évidence une fragmentation progressive du panache sédimentaire au cours du temps. Une quantité importante de sédiment injecté va être encore en transit dans le RCC et stockée dans la retenue du seuil de Peyraud durant les 50 prochaines années. D'ici là, ces sédiments n'atteindront donc pas le Rhône Total et la retenue du barrage d'Arras.

3.3 Le Vieux Rhône de Chautagne

La même démarche méthodologique a été appliquée au RCC de Chautagne, où 15 000 m³ de sédiment avaient été déversés dans la partie amont de ce Vieux Rhône en décembre 2016 (soit entre 350 et 680 m en aval du barrage de Motz ; détails sur le contexte des travaux au §2.1.1.). Ici aussi, ce sont les enjeux écologiques et ceux liés à la sûreté hydraulique du barrage en aval (barrage de Lavours, localisé 14 km en aval du site d'injection sédimentaire) qui ont nécessité d'évaluer le temps de propagation de ces sédiments. La modélisation s'est également focalisée sur la période de 50 ans après la réinjection (Figure 2).

A l'inverse de la modélisation réalisée sur le RCC de Péage-de-Roussillon, le modèle appliqué à Chautagne montre un déplacement du panache sédimentaire beaucoup plus progressif et constant dans le temps, comme l'indique l'évolution de la position du centroïde du panache sédimentaire (ruptures de pente moins prononcées sur la courbe de la Figure 51 A). Un

ralentissement se marque néanmoins aux alentours de 15 ans après injection (changement de pente de la courbe de la Figure 51 A). Par ailleurs, le front de progression de la vague sédimentaire atteint très vite (~2 ans) la retenue du barrage de Lavours. Ceci se marque également par l'évolution de l'écart-type qui augmente fortement durant cette première période, ce qui suggère une dispersion prononcée. Cette composante dispersive va ensuite continuer à augmenter jusqu'à ~20 ans après l'injection, ce qui indique que le panache s'étend en migrant vers l'aval. Par la suite (> 20 ans après injection), la dispersion des sédiments diminue (écart-type stabilisé) en lien avec l'arrivée du front de propagation de la vague sédimentaire dans la retenue du barrage de Lavours, où les capacités de charriage sont moindres. A ce moment-là, le déplacement du panache sédimentaire est dominé par la translation plutôt que par la dispersion.

L'analyse de l'évolution du volume de sédiment au niveau du site d'injection indique que les sédiments réinjectés ont tendance à rester sur ce site. La diminution du volume du stock de sédiment est très lente (comparée à celle du RCC de Péage-de-Roussillon). Ainsi, d'après le modèle, 5500 m³ sont toujours présents au site d'injection après 50 ans. Ce constat est cohérent avec les capacités de charriage calculées au droit du site d'injection, où les contraintes de cisaillement sont très faibles, de l'ordre de 10 N/m² (Figure 53). Etant donné ces apports limités depuis le site d'injection, les volumes transitant dans le RCC et puis dans le Rhône Total sont également limités (de l'ordre de 5000 m³ dans chacun de ces deux secteurs après 50 ans).

La répartition longitudinale du volume de sédiment le long du secteur suit une logique fort différente que celle identifiée pour le RCC de Péage-de-Roussillon (Figure 52). Elle est caractérisée par deux panaches sédimentaires : le premier correspond à un lent déplacement du stock principal de sédiment sur le premier kilomètre en aval de l'injection, tandis que le second concerne les sédiments qui traversent rapidement le RCC et le Rhône Total, jusqu'à la retenue du barrage de Lavours. Cette logique peut être mise en relation avec les capacités de charriage. Il apparaît d'ailleurs, en comparant les Figure 52 et Figure 53, que les sites de stockage de sédiments correspondent aux sites où les contraintes de cisaillement sont les plus faibles. Outre le site d'injection, il s'agit du confluent entre les deux Rhône (au niveau du Pont de la Loi) et de la retenue du barrage de Lavours.

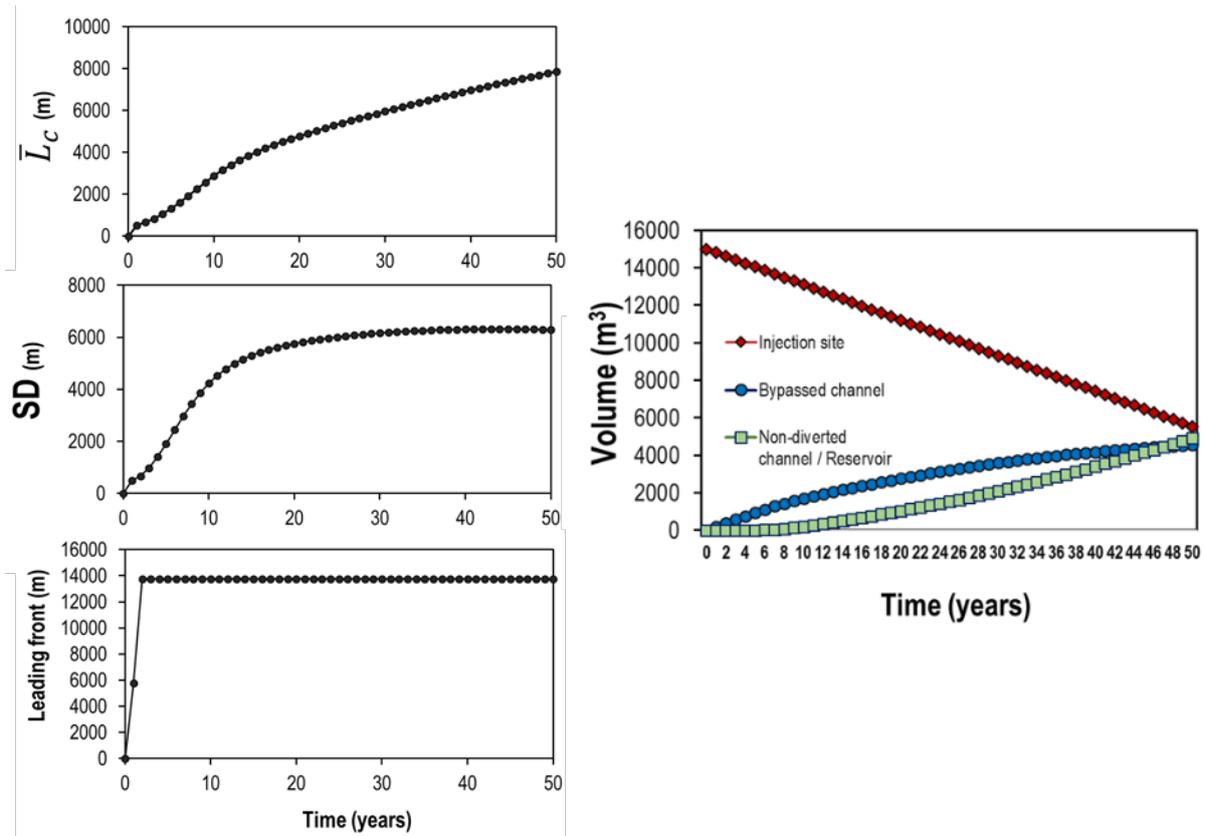


Figure 51. Réinjection sédimentaire de Motz : évolution au cours du temps de la distance moyenne (\bar{L}_C ; en m), de l'écart-type (SD ; en m), de la position du front de propagation (en m), et du volume de sédiment au niveau du site d'injection, dans le RCC et dans le Rhône Total.

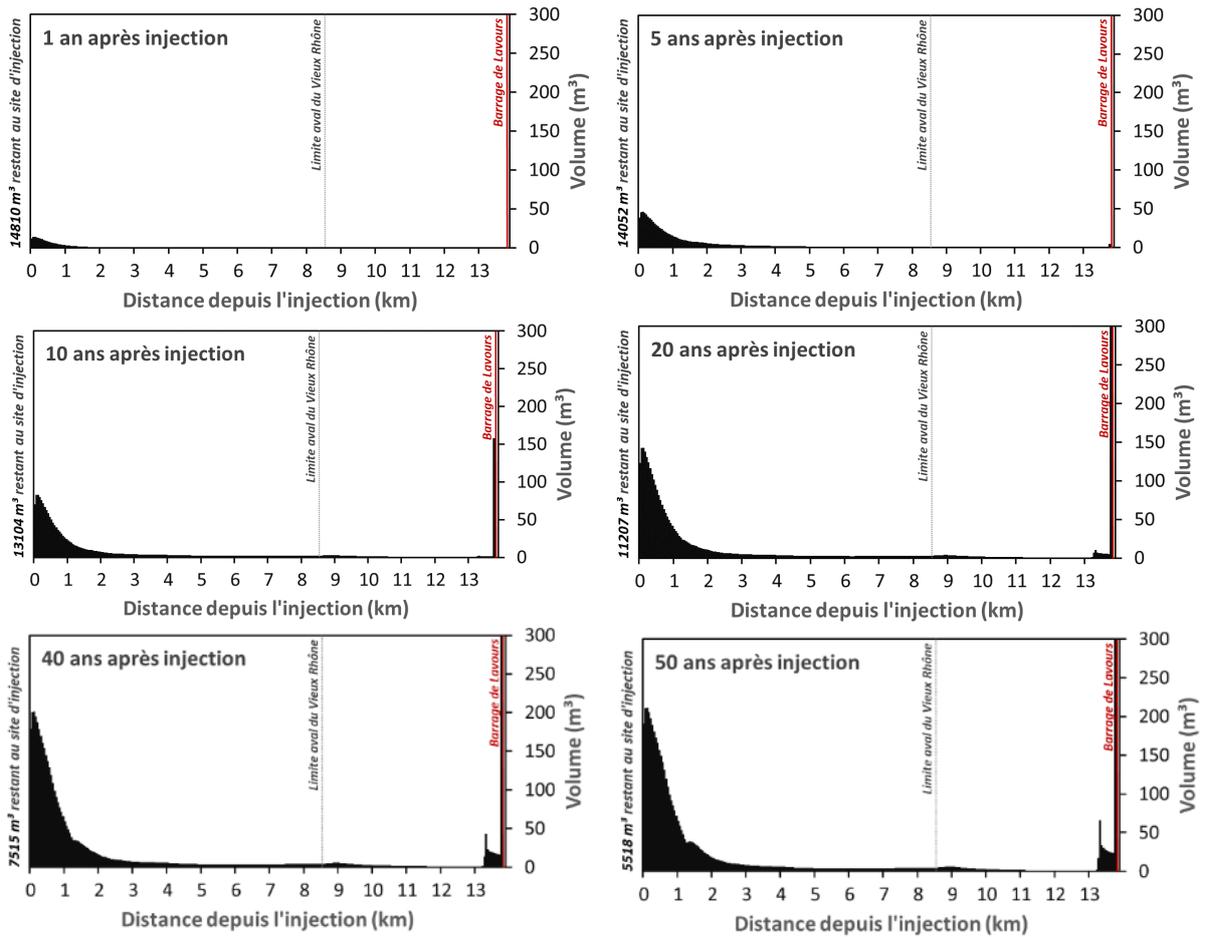


Figure 52. Réinjection sédimentaire de Motz : répartition longitudinale du volume de sédiment depuis le site de réinjection sédimentaire (= 0 km) après 1 an, 5 ans, 10 ans, 20 ans, 40 ans et 50 ans.

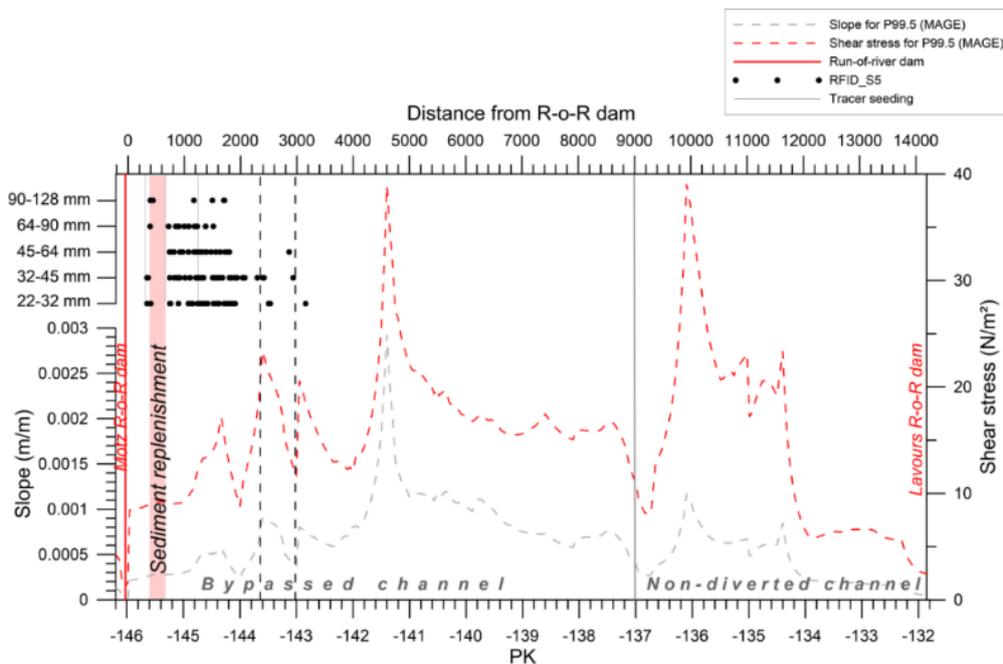


Figure 53. Réinjection sédimentaire de Motz : évolution longitudinale de la pente et des contraintes de cisaillement, et position des traceurs RFID pour le dernier relevé (S5).

3.4 Discussion et limites de la méthode

L'approche de modélisation proposée dans ce travail est très prometteuse pour évaluer la propagation des sédiments grossiers au cours du temps. Elle a notamment été validée par une analyse de son degré de sensibilité en lien avec les choix des paramètres utilisés lors des différentes étapes du processus de modélisation. Ainsi, en faisant varier ces paramètres et en analysant leur influence sur le modèle, Vázquez-Tarrío et al. (2023) ont identifié les valeurs optimales de ces paramètres. Par exemple, une inter-distance de 50 m entre deux nœuds a été considérée comme un choix optimal pour établir la grille du modèle (i.e., compromis entre précision et durée de calcul). Pour l'estimation de la distance moyenne de déplacement des particules, le choix s'est porté sur l'utilisation d'une régression linéaire entre la distance (en m) et l'excès de puissance brute cumulée (en N). C'est ensuite grâce à une loi gamma à deux paramètres que la distribution complète des déplacements de particules autour de cette valeur moyenne a pu être définie. De même, différents tests ont été réalisés pour estimer la probabilité annuelle d'enfouissement des sédiments. Le choix s'est porté sur une valeur de 0,65, déterminée sur la base de la perte moyenne de traceurs dans les suivis. Il s'agit d'une estimation maximale dans la mesure où la perte de traceurs ne s'explique pas uniquement par l'enfouissement mais également pour d'autres raisons (i.e., non détection des traceurs les plus distants, collision de signaux, relevé imparfait). Quoi qu'il en soit, au-delà de 0,25 de probabilité d'enfouissement, ce paramètre semble avoir peu d'influence sur les résultats du modèle.

Malgré cela, il reste un certain nombre de limites à ce travail de modélisation. (i) D'abord, cette démarche ne prend pas en considération les interactions entre le matériel réinjecté et le sédiment du lit. Néanmoins, dans le cas d'étude du Rhône, ces interactions doivent être faibles car les tronçons sont relativement pavés. Toutefois, cette limite est à considérer dans des tronçons présentant un transport solide plus actif, ce qui est le cas de Chautagne. (ii) Ensuite, ce modèle repose sur une simplification des capacités de charriage au droit du site de réinjection sédimentaire (modèle 1D ne tenant pas compte des conditions bidimensionnelles des écoulements). (iii) Aussi, il ne tient pas compte de l'effet de piégeage potentiel des seuils/barrages le long du secteur modélisé. (iv) Enfin, ce modèle nécessite d'avoir de bonnes données de terrain pour valider ce type de prédiction à ces longues échelles de temps, ce qui est encore rarement le cas.

4. Suivi par géophone

4.1 Rappel contextuel

Appliqués dans le domaine de la dynamique fluviale, les suivis sismiques par géophone permettent de mesurer le transport solide par charriage en continu en un point donné (Bakker et al., 2020). De la sorte, ils peuvent fournir une estimation de la valeur seuil de transport par charriage et de sa variabilité au cours du temps.

Les stations de mesure géophone installées dans le cadre du programme OSR sont celles utilisées par la plateforme OMEAA. Initialement développées pour suivre la propagation des laves torrentielles (en partenariat avec l'Inrae de Grenoble ; cf. Navratil et al., 2011, 2013 ; Bel et al., 2017), ces stations ont ensuite été déployées dans d'autres contextes hydro-sédimentaires (e.g. la Séveraise, la Fontaulière, la Bienne) (Figure 54). L'objectif était double : (i) valider leur capacité à mesurer du charriage en dehors des systèmes torrentiels à lave, et (ii) adapter leur fonctionnement pour simplifier l'analyse des données, assurer leur communication, renforcer la robustesse des systèmes et viser une autonomie énergétique (alimentation électrique par petite batterie et panneau solaire) (Misset et al., 2020).

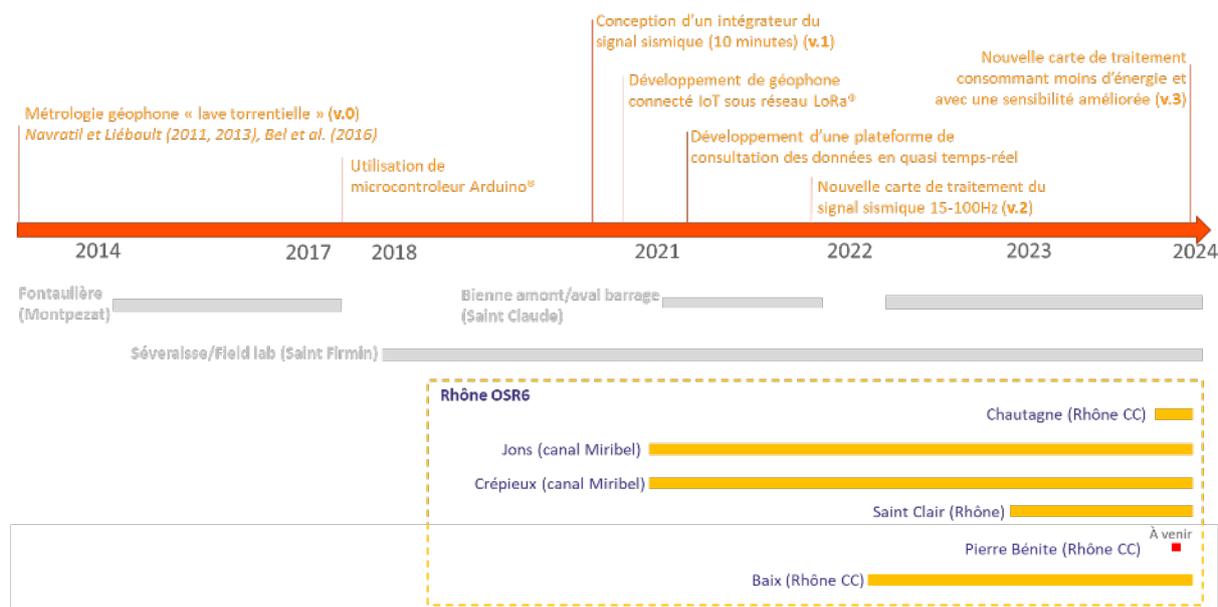


Figure 54. Frise chronologique des développements métrologiques réalisés sur les géophones utilisés par la plateforme OMEAA.

Plus récemment, de nouveaux développements ont été apportés au niveau de la synthèse de la mesure (Cassel et al., 2022) :

- une simplification des signaux sismiques en les filtrant dans la gamme de fréquences reconnue actuellement comme reflétant les processus de charriage, soit 15-100 Hz ;
- une simplification de toute la chaîne d'acquisition du signal à 10 minutes en utilisant une métrologie « low-cost », « open-source » avec notamment la plateforme de prototypage IDE Arduino® ;

- le développement de ces signaux sismiques dans le cadre de l'Internet of Things (IoT). Ainsi, les technologies de communication utilisées, Lora® ou Sigfox®, sont des protocoles de télécommunication qui permettent la communication à bas débit, par radio, d'objets à faible consommation électrique, communiquants et connectés à l'Internet via des passerelles, participant ainsi à l'Internet des objets (IoT) ;
- le développement d'une plateforme de consultation des données en quasi temps réel (OpenDataEau.org) développée dans le cadre du projet Cheap'Eau (OTHU/Agence de l'Eau RMC). Elle permet de surveiller (i) l'état de la station de mesure (niveau de batterie, vandalisme et autres dysfonctionnements) et (ii) le signal enregistré (e.g., en lien avec les événements de crue, le fonctionnement des ouvrages hydro-électriques). De la sorte, ces technologies permettent de vérifier le bon fonctionnement des systèmes à distance, ce qui minimise les coûts liés à leur gestion (déplacements de maintenance/récupération des données, diminution du temps d'analyse).

Afin de tester ces géophones sur des rivières plus larges, à pente et à granulométrie plus faible, il a été décidé d'en installer sur différents secteurs du Rhône à titre expérimental dans le cadre de l'OSR6 (synthèse et localisation au Tableau 28 et à la Figure 1).

Tableau 28. Synthèse des géophones installés sur le Rhône

Site (secteur)	Contexte	Projet	Date d'installation	Nbre de stations	Autres données
Rhône à Motz (CHA)	Réinjection sédimentaire	OSR6	13/10/2023	1	RFID
Canal de Miribel à Jons (LYM)	Quantification charriage + évaluation transparence barrage	Greendam / OHM Vieux Rhône	Mai 2020	1	RFID, hauteur d'eau
Canal de Miribel à Crépieux (LYM)	Quantification charriage + comparaison métrologique	OHM Vieux Rhône	Mai 2020	1	Autre géophone (BURGEAP), hauteur d'eau
Rhône à Saint-Clair (LYM)	Quantification charriage à l'entrée de Lyon	OSR6	13/01/2023	1	NA
Rhône à Pierre-Bénite (PBN)	Future réinjection sédimentaire/état initial	OSR6	Prévu en mai 2024	1	NA
Rhône à Baix (BLN)	Quantification charriage + réinjection sédimentaire + transfert	OSR6	5/05/2022	3	RFID, hauteur d'eau

4.1 Secteurs et sites d'étude

4.1.1 Le canal de Miribel et le Rhône en amont de Lyon

Deux géophones (version v.1 ; signal non filtré) ont été installés le long du canal de Miribel à Jons et à Crépieux en mai 2020 dans le but de réaliser des premiers essais d'enregistrement des signaux sismiques du charriage du Rhône (localisation à la Figure 8).

Une première station est installée à Jons, à 460 m en aval du barrage de Jons (illustrations à la Figure 55). Cette position a pour but d'enregistrer le signal sismique lié au charriage au niveau du canal, mais également de mieux comprendre le transport sédimentaire au travers du barrage de Jons, en fonction des opérations de gestion des cinq vannes qui le composent (vannes abaissées/relevées, position des vannes manœuvrées). De plus, ce site est équipé de traceurs RFID, ce qui permet de confirmer si le signal enregistré est bien dû au charriage.



Figure 55. Le canal de Miribel : détails des composants de la station géophone (à gauche), son installation en rive gauche (au centre) et en rive droite (à droite) (Cassel et al., 2022)

Le second géophone, installé en mai 2020, se trouve en rive droite du Canal de Miribel à Crépieux, soit 16,2 km en aval du barrage de Jons. Il a également pour objectif d'enregistrer le signal du charriage dans le canal. Il constitue un point de comparaison exempt de l'effet direct des opérations des vannes de barrage à la station de Jons. Il se trouve également à proximité d'une autre station géophone (avec une métrologie plus traditionnelle haute-fréquence) installée dans la conduite sous-fluviale et gérée par Ginger-Burgeap pour le compte de la Métropole de Lyon. Nos données pourront être comparées prochainement avec celui-ci.

Les résultats issus de ces premières installations sont décrits et analysés dans le cadre du projet GreenDam (Cassel et al., 2022). Bien qu'ils fassent état de difficultés métrologiques et techniques inhérentes aux approches de développement et de terrain, ces résultats ont mis en lumière des éléments intéressants, avec notamment une corrélation du signal sismique avec le débit, une signature sismique du fonctionnement des vannes du barrage, et l'impact du bruit environnant (extraction de granulats, voie ferrée). De plus, ils ont permis d'améliorer considérablement les systèmes de mesure, de les fiabiliser et d'optimiser leur fonctionnement. A partir de cette première expérience, le suivi et l'analyse des données de ces deux géophones sur le canal de Miribel se sont poursuivis dans le cadre du programme OSR6.

Par la suite, ces deux géophones ont été doublés pour comparaison par une version améliorée (version v.2). Cette v.2 permet de filtrer le signal sismique dans la bande de fréquences du charriage (15-100 Hz) estimée par une revue de la littérature. Leur installation a eu lieu le 09/12/2022 (Jons) et le 23/11/2022 (Crépieux).

Enfin, un troisième géophone (v.2 ; signal filtré 15-100 Hz) a été installé le 13/11/2022 en aval, sur le Rhône total à Saint-Clair (Caluire), soit en aval de la confluence entre le canal de Miribel et le canal de Jonage (1 km en aval du seuil de la Feyssine). Sa position en rive droite, 700 m en aval du grand banc de la rive droite, devrait permettre de vérifier si du charriage a lieu sur ce secteur en entrée de la Métropole de Lyon ou si le charriage est entravé par la fosse de la Feyssine située seulement environ 800 m en amont.

4.1.2 *Le Vieux Rhône de Baix-le-Logis-Neuf*

Un second site a été équipé de trois géophones (v.1) le 03/05/2022. Il s'agit du site de Baix situé sur le Vieux Rhône de Baix-le-Logis-Neuf. Des travaux de restauration y ont été menés en novembre 2021 par la CNR. Ils consistent en un démantèlement des digues sur un linéaire total de 880 m et en la reconnexion d'une lône de 1 800 m de long. Une partie des matériaux excavés a été réinjectée dans le Vieux Rhône. Ainsi, 12 000 m³ de graviers ont été placés dans le secteur situé en aval du barrage du Pouzin (Figure 56 et Figure 57). Deux autres injections d'environ 4 000-5 000 m³ ont été réalisées à proximité de l'entrée et de la sortie de la lône réhabilitée.

Ce secteur convient bien pour le suivi par géophone car les travaux de réinjection sédimentaire y ont été réalisés très récemment. Ceci augmente les chances d'enregistrer le signal du charriage lié au passage des matériaux réinjectés, ce qui n'aurait peut-être pas été le cas pour les autres sites présentés dans ce travail, où les matériaux ont été injectés il y a plusieurs années et se sont dispersés en aval depuis lors. Ces éléments nous ont conduits à installer trois géophones sur ce secteur, à savoir un géophone pour chacune des injections sédimentaires (Figure 57). Le géophone amont a été installé en rive gauche du Rhône, tandis que les deux autres ont été mis en place en rive droite.



Figure 56. Le Vieux Rhône de Baix-le-Logis-Neuf : travaux de réinjection sédimentaire sur le site amont en novembre 2021 (photo de Nedjma Salhi, CNR)



Figure 57. Le Vieux Rhône de Baix-le-Logis-Neuf : localisation des sites de réinjection sédimentaire et des stations sismiques

4.1.3 Le Vieux Rhône de Chautagne

Un géophone (v.2) a également été installé sur le Vieux-Rhône de Chautagne le 13/10/2023. Il est positionné en rive gauche, au niveau d'un rétrécissement du lit, 5,6 km en aval du barrage de Motz. Il se trouve à l'aval d'un secteur dynamique du point de vue du charriage, avec des changements morphologiques réguliers tels que des érosions de berge, des aggradations de bancs. Un travail de quantification de ces modifications morphologiques par analyse topobathymétrique est actuellement réalisé par la CNR.

Ce site a été équipé dans le but de caractériser le signal du charriage sur un Vieux-Rhône dynamique. De la sorte, il pourra servir de référentiel pour comparer le signal sur des Vieux-Rhône qui ont fait l'objet d'une réinjection sédimentaire.



Figure 58. Le Vieux Rhône de Chautagne : localisation de la station sismique

4.2 Résultats issus des premières acquisitions

4.2.1 Sensibilité aux bruits environnants et filtration du signal

L'analyse des signaux enregistrés pour l'ensemble des sites montre que le signal sismique est très sensible aux bruits anthropiques environnants. Dans le cas du géophone installé à Jons, la présence d'une carrière située à 500 m du site d'étude entraîne des pics de signal durant les heures d'activité de la carrière (Figure 59 haut). Pour le géophone mis en place à Crépieux, c'est le trafic ferroviaire de la voie ferrée qui provoque un bruit presque continu (Figure 59 bas).

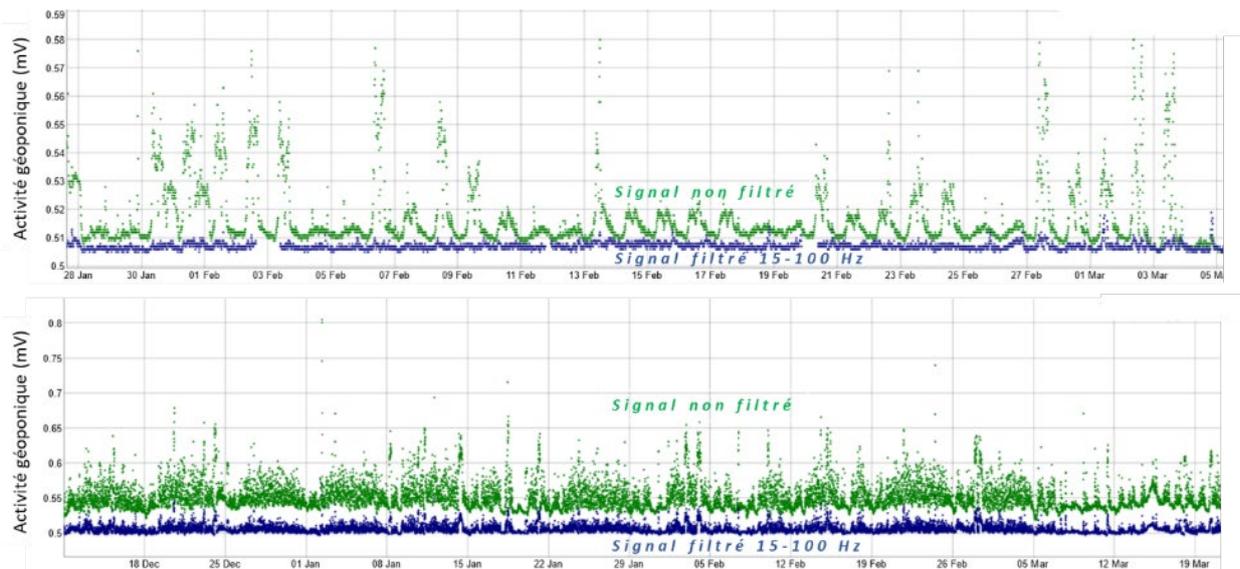


Figure 59. Activité sismique pour les sites de Jons (en haut) et de Crépieux (en bas) : comparaison entre le signal non filtré (carte de traitement v.1 ; en vert) et le signal filtré sur la fréquence du charriage (15-100 Hz ; carte de traitement v.2 ; en bleu)

Quant aux 3 géophones installés le long du Vieux Rhône de Baix-le-Logis-Neuf, ils présentent également des pics d'activité prononcés à des horaires fixes (entre 5h et 7h, et entre 22h30 et 00h00). L'exemple de la Figure 60 montre que ces pics réguliers sont indépendants de l'hydrologie car le débit dans le RCC ne varie presque pas (i.e., faibles variations autour du débit réservé). L'origine de ces pics n'est pas déterminée mais pourrait concerner un transport ferroviaire (voie ferrée de marchandise en rive droite du Rhône).

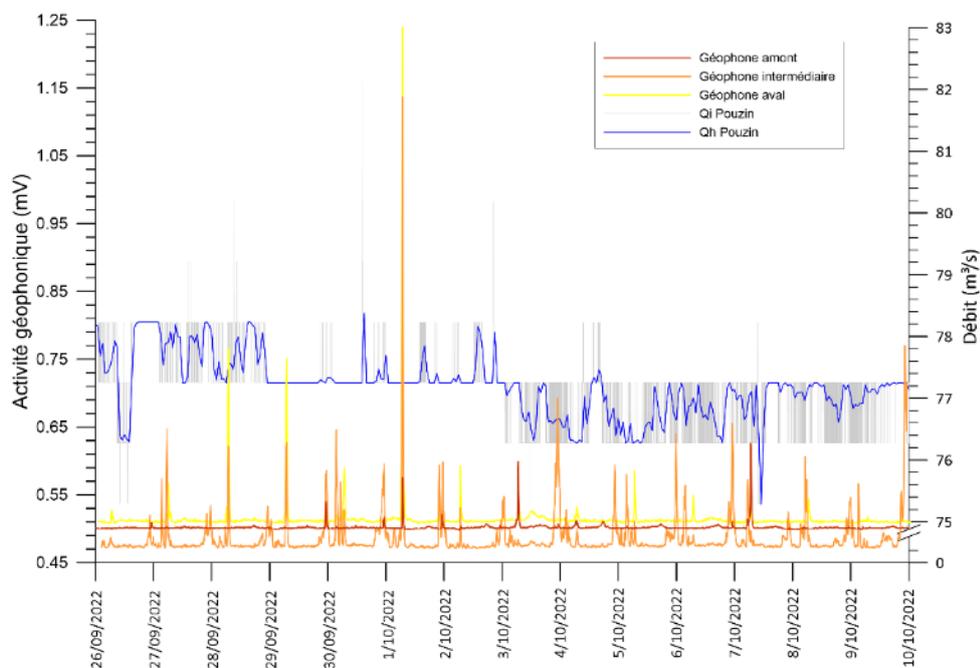


Figure 60. Activité sismique et débit enregistrés pour les 3 géophones (v.1, carte avec signal non filtré) mis en place le long du Vieux Rhône de Baix-le-Logis-Neuf entre le 26/09/2022 et le 10/10/2022. Débits horaires (Qh) et débits instantanés (Qi) bruts et non validés fournis par la CNR (station limnigraphique du Pouzin)

Sur la base de ces premiers résultats, une nouvelle carte de traitement (v.2) a été développée pour optimiser le rapport signal sismique/bruit. Elle permet de filtrer le signal enregistré sur la bande de fréquence comprise entre 15 et 100 Hz, soit l'intervalle qui englobe les fréquences attendues pour le transport de la charge de fond (e.g., Tsai et al. 2012 ; Gimbert et al., 2019). Pour ce faire, le signal du géophone est reconditionné avec une interface électronique en trois étapes (Navratil et al., 2013) : i) le signal est redressé ; ii) un filtre passe-bas de 15 Hz à 100 Hz est ensuite appliqué ; iii) le signal est amplifié, puis iv) intégré électroniquement (pas de temps de 10 minutes), v) pour enfin être enregistré toutes les 10 minutes avec un microcontrôleur Arduino®, et vi) envoyé sur le site OpenDataEau.org via un protocole LoraWAN®. L'amplitude du signal (en mV) est ainsi directement proportionnelle à puissance sismique intégrée dans la bande de fréquence 15-100 Hz toutes les 10 minutes.

Les sites de Jons et Crépieux ont été ré-équipés avec cette nouvelle carte de traitement (v.2) avec un doublement de l'instrumentation (cartes de traitement v.1 et v.2). Il apparaît que le bruit lié à l'activité de la carrière à Jons est relativement bien filtré (Figure 59 haut). C'est également le cas mais dans une moindre mesure pour le bruit du trafic ferroviaire à Crépieux (Figure 59 bas).

4.2.2 Effet d'hystérésis entre le débit et le signal sismique, et détermination du débit critique de mise en mouvement

L'hiver 2023-2024 a été caractérisé par une période hydrologique marquée par un débit soutenu sur l'ensemble du Rhône, avec notamment l'occurrence de trois pics de crues (15-16/11/2023, 2-3/12/2023 et 13-14/12/2023), le plus important ayant atteint localement une récurrence d'environ 10 ans sur le Bas-Rhône (maximum par sites dans le Tableau 29).

Tableau 29. Caractéristiques des crues de l'hiver 2023-2024 au niveau des sites équipés de géophones

Site d'étude (RCC)	Station limini	Q_{max} ($m^3.s^{-1}$)	T (an^{-1})
Motz (CHA)	Barrage de Motz (CNR)	1787	Légèrement inf. à 10
Canal de Miribel (LYM)	Barrage de Jons (EDF)	1973	Entre 2 et 5
Baix (BLN)	Barrage du Pouzin (CNR)	3318	~10

Le charriage provoqué par ces crues morphogènes a pu être mis en lumière grâce à l'enregistrement des données sismiques par les géophones. D'une manière générale, l'analyse du signal montre une corrélation entre le débit et l'activité sismique lors de la phase de crue (montée d'eau). Par contre, une décorrélation entre ces deux variables est observée lors des phases de décrue (exemple sur le Vieux Rhône de Chautagne à la Figure 60). Cette hystérésis indique que le signal sismique est effectivement lié au charriage (et non à l'hydraulique).

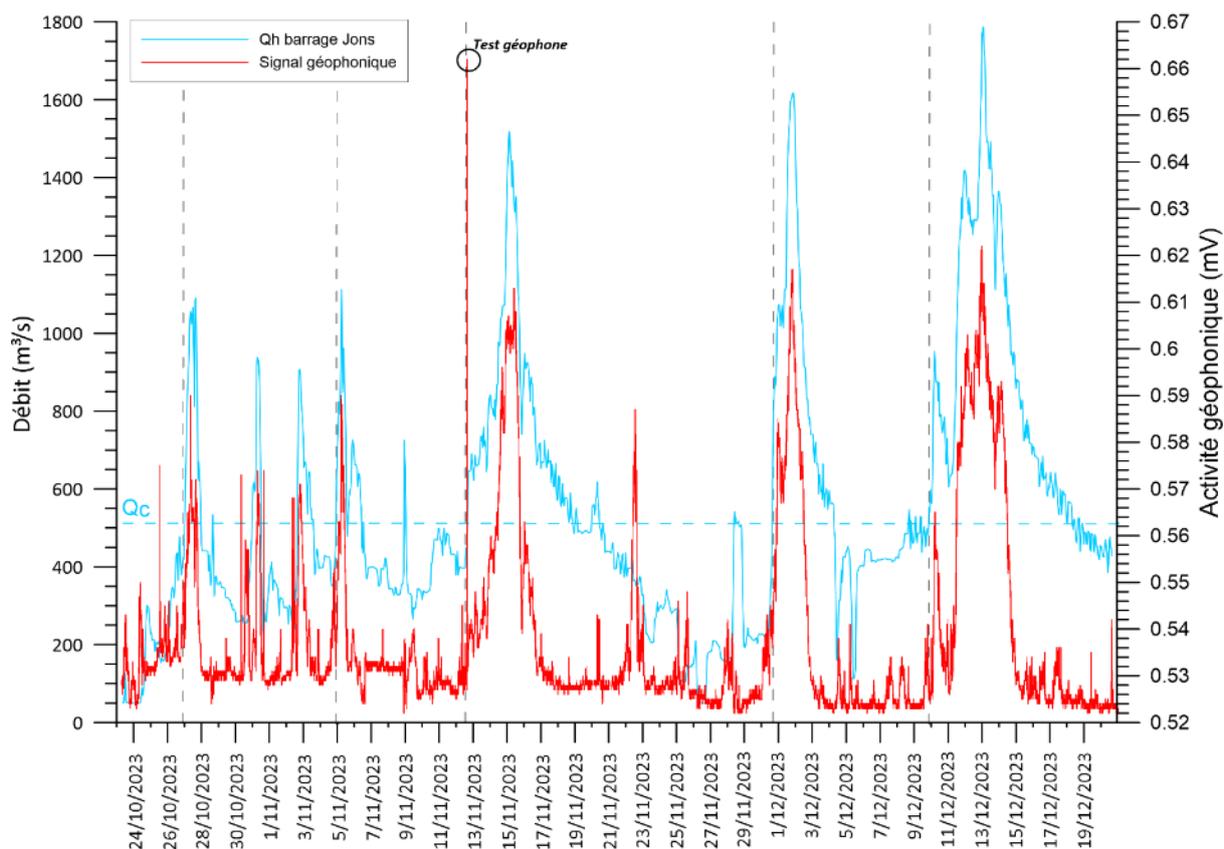


Figure 61. Activité sismique et débit enregistrés pour le géophone (v.2) mis en place sur le Vieux Rhône de Chautagne entre le 24/10/2023 et le 21/12/2023 (carte avec signal filtré). Débits horaires (Qh) bruts non validés fournis par la CNR (station limnigraphique du barrage de Motz) (le trait tireté bleu indique la valeur du Qc déterminée à l'aide des RFID)

En outre, pour l'ensemble des sites étudiés, ces analyses ont permis de mieux préciser, voire de confirmer, les valeurs du débit critique de mise en mouvement des particules (Qc), estimées initialement de manière théorique ou grâce aux marquages sédimentaires, selon les sites étudiés. Par exemple, sur le Vieux Rhône de Chautagne (Figure 61), il apparaît que le début de la montée du signal sismique (rupture de pente de la courbe d'évolution du signal) se produit au moment où le débit de la station dépasse la valeur seuil de Qc (env. 500 m³/s).

4.2.3 *Prise en compte des opérations du barrage de Jons pour interpréter le signal sismique*

Formulation des hypothèses et description du phénomène

Pour le site de Jons, l'analyse du signal, et plus particulièrement l'interprétation des pics d'intensité, sont complexes en raison des opérations d'ouverture/fermeture des vannes du barrage situé environ 460 m en amont. En période de crue, ces vannes sont progressivement ouvertes afin d'augmenter la part de débit du Rhône total vers le canal de Miribel (et donc de maintenir un débit inférieur au seuil de fonctionnement de l'usine hydro-électrique de Cusset dans le canal de Jonage). Elles peuvent être ouvertes de deux manières. Leur volet supérieur est généralement baissé dans un premier temps, ce qui augmente le débit par surverse (Figure

62). Elles sont ensuite relevées dans un second temps de manière à laisser passer un débit plus important par dessous. Ces deux manœuvres sont susceptibles d'entraîner une augmentation du signal sismique. Nous écartons rapidement l'hypothèse selon laquelle c'est le bruit mécanique qui induit le signal sismique compte tenu de la durée de ce signal (bien plus long que la durée des manœuvres).

Nous pouvons ainsi formuler quatre hypothèses quant à l'origine de ce signal sismique :

- i. Hypothèse 1 : le signal sismique est directement induit par l'hydraulique de la rivière (macro-turbulence) ;
- ii. Hypothèse 2 : le signal sismique est lié au charriage provoqué par l'augmentation du débit ($Q > Q_c$) au niveau des bancs situés entre le barrage et le géophone ;
- iii. Hypothèse 3 : lors de l'abaissement de la partie supérieure des vannes, le signal sismique est lié aux vibrations induites par la chute d'eau de surverse ;
- iv. Hypothèse 4 : dans le second cas (vannes relevées), le signal sismique est induit par la vidange de la charge grossière piégée juste en amont, dans la retenue du barrage et/ou plus tardivement, le transfert de sédiment venant de l'amont du barrage.



Figure 62. Barrage de Jons composé de cinq vannes (à gauche) et profil type d'une vanne à segment d'un barrage (à droite)

Sur la Figure 63 (en haut), l'activité sismique pour le géophone de Jons montre une augmentation qui peut être liée à la montée concomitante du débit dans le canal de Miribel. Par contre, à partir du 29/12/2021, le signal sismique diminue alors que le débit augmente toujours. Cette décorrélation observée entre le débit et l'activité sismique indique que le signal sismique est très probablement associé au charriage (et non au bruit hydraulique). L'hypothèse 2 serait la plus réaliste (charriage) ; l'hypothèse 1 serait alors la moins probable (hydraulique de la rivière). Dans ce contexte de cours d'eau, il semble peu probable que cette hystérésis soit liée à un changement de la nature du fond du chenal (granulométrie grossière peu variable d'une crue à l'autre).

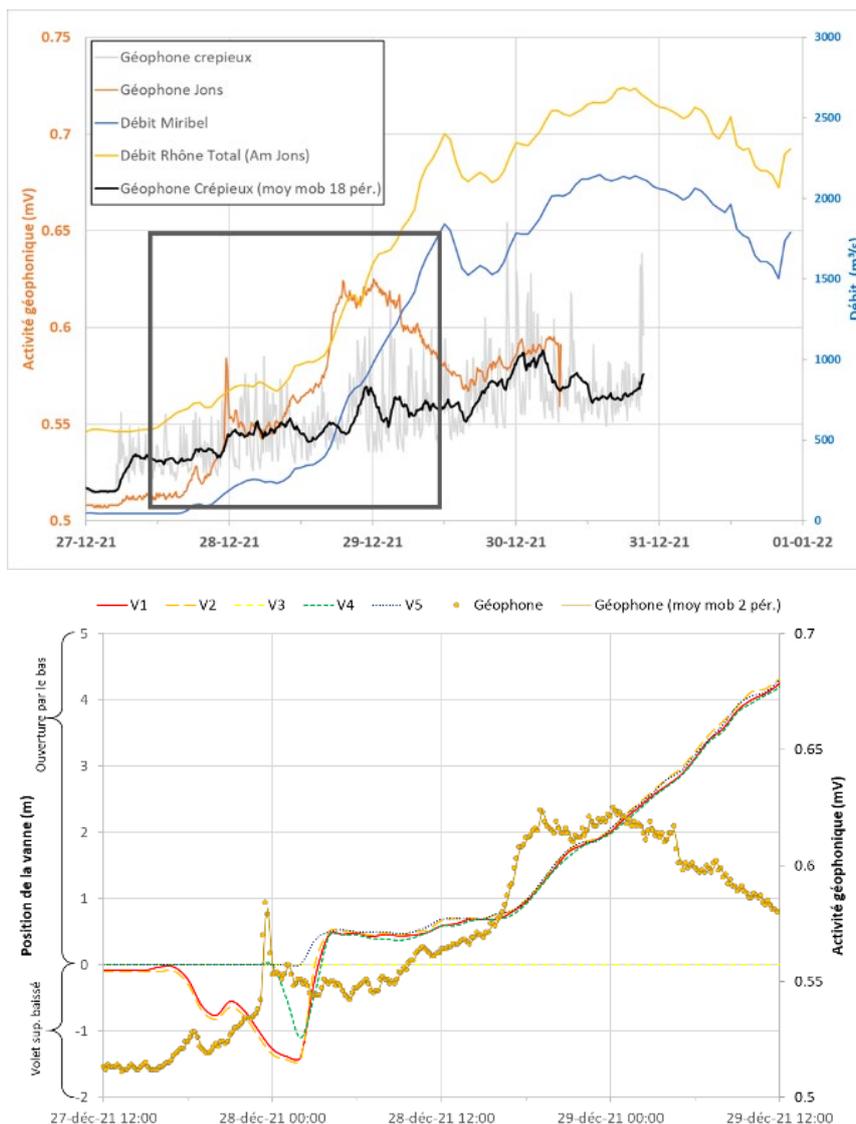


Figure 63. Activité sismique et débit enregistrés sur le site de Jons entre le 27/12/2021 et le 1/01/2022 (en haut) et détail de la période 27-29/12/2022 avec la position des vannes du barrage (en bas ; les numéros et codes de couleur des vannes sont associés à ceux de la Figure 62). Débits horaires et hauteur de la position des vannes du barrage de Jons fournis par EDF.

Notre analyse a également porté sur la gestion des vannes du barrage, à partir des données de débit et de hauteur de vanne fournies par EDF, nous permettant alors de tester l'hypothèse 3. Sur la Figure 63 (en bas), un premier pic d'activité sismique est observé le 27/12/2021 vers 23h au moment où les volets des deux vannes de la rive droite (V1 et V2) sont abaissés. Ce pic pourrait être attribué au bruit hydraulique lié à l'écoulement au droit du géophone ou de la surverse (hypothèses 1 et 3). Toutefois, le signal sismique s'atténue par la suite, alors que ces deux vannes sont maintenues ouvertes. Ce pic de signal géophonique ne peut donc pas être lié à la surverse ni à l'hydraulique locale. Il pourrait par contre être lié à une remobilisation du banc de galets stockés en amont du géophone (et en aval barrage), que l'augmentation de débit arrive à remobiliser (hypothèse 2). Enfin, le pic d'activité géophonique le plus prononcé (entre le 28/12/2021 à 18h et le 29/12/2021 à 16h) a lieu au moment où quatre des cinq vannes du barrage commencent à être relevées. Par la suite, le signal géophonique diminue

malgré la poursuite de l'ouverture des vannes et l'augmentation du débit. Ceci confirme que le pic d'activité observé peut être associé au transit de sédiments par charriage stockés en amont des vannes, et probablement consécutive à l'ouverture des vannes de fond du barrage (hypothèse 4).

Il en est de même pour les crues du 18/02/2022, du 8/04/2022 et du 24/12/2022, cette dernière ayant atteint un débit de pointe de 1487 m³/s (Figure 64). Le pic d'activité sismique présente une temporalité similaire à celle de la crue du 30/12/2021. Une montée du signal géophonique coïncide 1) avec l'abaissement des vannes supérieures (hypothèse 2, i.e. chasse du banc situé à l'aval du barrage), 2) puis la montée des vannes de fond et la montée inhérente du débit (crue) entraînant la chasse rapide des sédiments stockés en amont immédiat de l'ouvrage (hypothèse 4). Une décorrélation entre le débit et l'activité sismique est ensuite observée laissant alors penser à un transport des sédiments et une transparence de l'ouvrage (hypothèses 2 et 4).

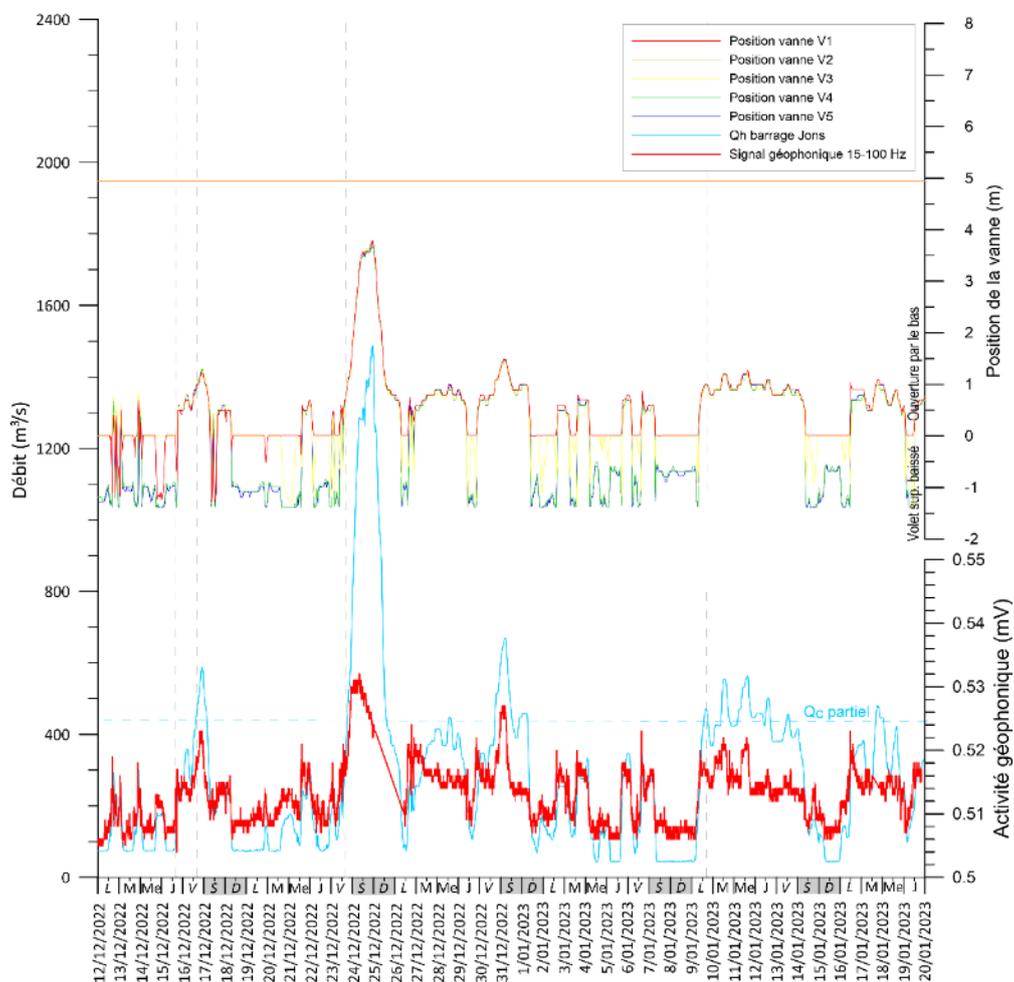


Figure 64. Activité sismique et débit enregistrés sur le site de Jons entre le 27/12/2021 et le 1/01/2022 (à gauche) et détail de la période 27-29/12/2022 avec la position des vannes du barrage (à droite ; les numéros et codes de couleur des vannes sont associés à ceux de la Figure 62). Débits horaires et hauteur de la position des vannes du barrage de Jons fournis par EDF.

Comparaison du signal sismique des trois stations installées sur et en aval du canal de Miribel

La Figure 65 illustre l'évolution du signal sismique au niveau des trois stations installées sur et en aval du canal de Miribel durant l'automne-hiver 2023-2024. Pour la station de Jons (à gauche), l'analyse du signal confirme les éléments mis en lumière auparavant, à savoir que l'activité sismique est liée, non seulement aux crues, mais aussi aux manœuvres des vannes du barrage. A ce titre, le pic d'activité sismique le plus élevé de la période représentée a lieu le 27/10/2023 pour une crue relativement modeste ($\sim 1250 \text{ m}^3/\text{s}$), alors que les autres crues (plus fortes) ont entraîné des montées de signal sismique moins importantes. Ceci s'explique par le fait qu'il s'agit de la première crue de la série et qu'elle a fait suite à une période d'environ cinq mois sans ouverture des vannes (dernière ouverture le 11/05/2023 ; $Q_{\text{max}} : 617 \text{ m}^3$). Il est donc probable que les matériaux accumulés durant cette période au droit des vannes du barrage aient été remobilisés à la suite de cette ouverture, ce qui a entraîné un pic d'activité sismique et donc de charriage plus important que pour les crues suivantes. En outre, l'absence de pic de signal sismique à la station de Crépieux pour cette même crue du 27/10/2023 (Figure 65, milieu) confirme bien cette hypothèse.

Bien que fortement bruité, le signal sismique à la station de Crépieux présente une évolution similaire au signal enregistré à la station de Jons (à l'exception de la crue du 27/10/2023). Les montées de signal coïncident avec le dépassement du débit critique de mise en mouvement des particules. En revanche, ça n'est pas le cas pour la station de St-Clair (Figure 65, droite). Malgré l'occurrence des crues, le signal ne présente pas d'évolution marquée, ce qui indiquerait un charriage peu prononcé, probablement en lien avec le piégeage d'une partie de la charge de fond dans la fosse de la Feysine. Ceci reste à confirmer par des enregistrements complémentaires et une analyse topo-bathymétrique détaillée du secteur.

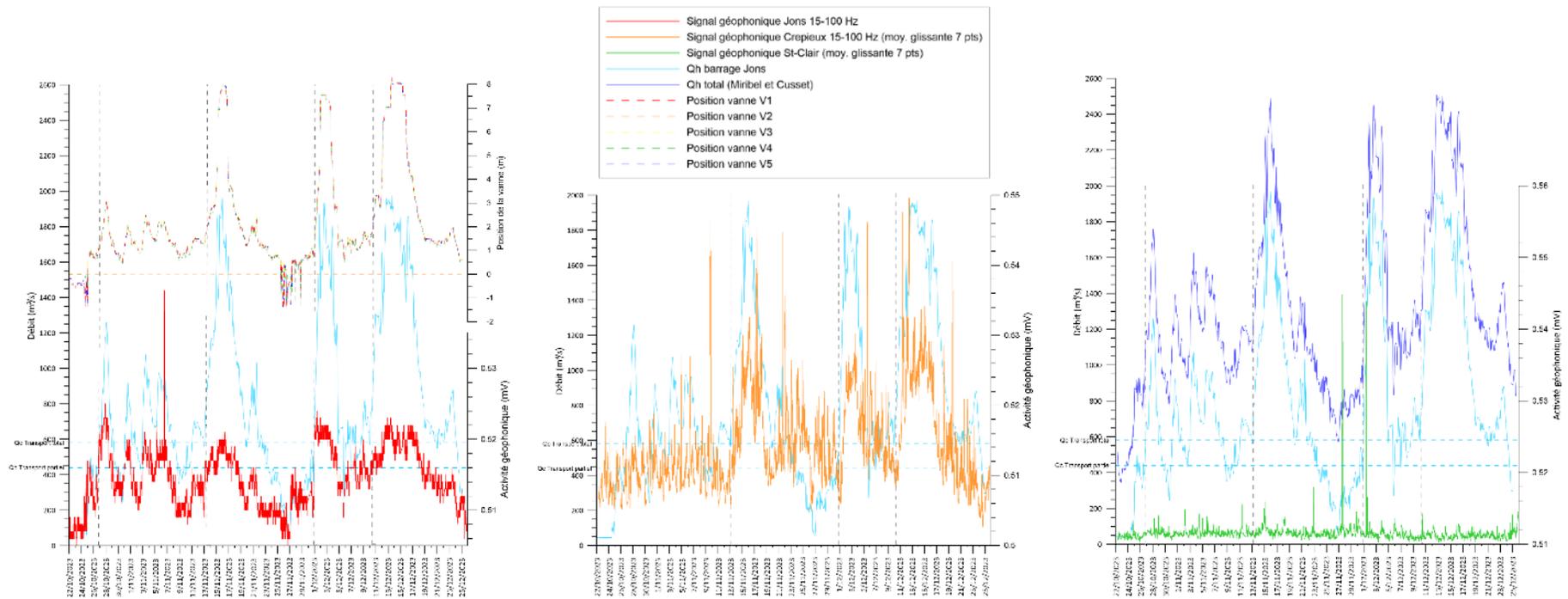


Figure 65. Activité sismique des trois stations géophoniques installées sur et en aval du canal de Miribel, débit enregistré sur le site de Jons et dans le Rhône total entre le 22/10/2023 et le 26/12/2023, et position des vannes du barrage de Jons (les numéros et codes de couleur des vannes sont associés à ceux de la Figure 62). Débits horaires et hauteur de la position des vannes du barrage de Jons fournis par EDF.

4.2.4 Vieux-Rhône de Baix-le-Logis-Neuf : une variabilité des signaux sismiques en fonction des conditions environnementales

Pour les géophones installés à Baix (v.1), le signal est relativement bruité (Figure 66, à gauche). Néanmoins, la signature des pics liés au charriage (pics longs de grande amplitude) contraste avec celle du bruit (pics courts de très grande amplitude). De manière à réduire l'effet bruité et faciliter l'analyse du signal, une moyenne glissante (sur 21 points, soit 210 minutes) a été appliquée sur l'ensemble des données (Figure 66, à droite). Comme pour les autres sites, l'effet d'hystérésis entre le débit et le signal sismique est bien visible (en particulier pour les stations amont et aval). En revanche, il ressort de cette analyse que l'amplitude du signal sismique est fort variable d'une station à l'autre (elle est nettement plus prononcée pour la station intermédiaire). Cette variabilité pourrait s'expliquer par des différences d'intensités du charriage (associée aux trois zones de réinjection sédimentaire différentes). Cependant, il est également probable que ces différences soient liées aux conditions environnementales de terrain (e.g., nature de la berge, distance entre le capteur et le secteur soumis au charriage). Ceci démontre la nécessité d'un calibrage de terrain et/ou d'une normalisation du signal entre stations, et ce afin de permettre la comparaison des signaux entre eux.

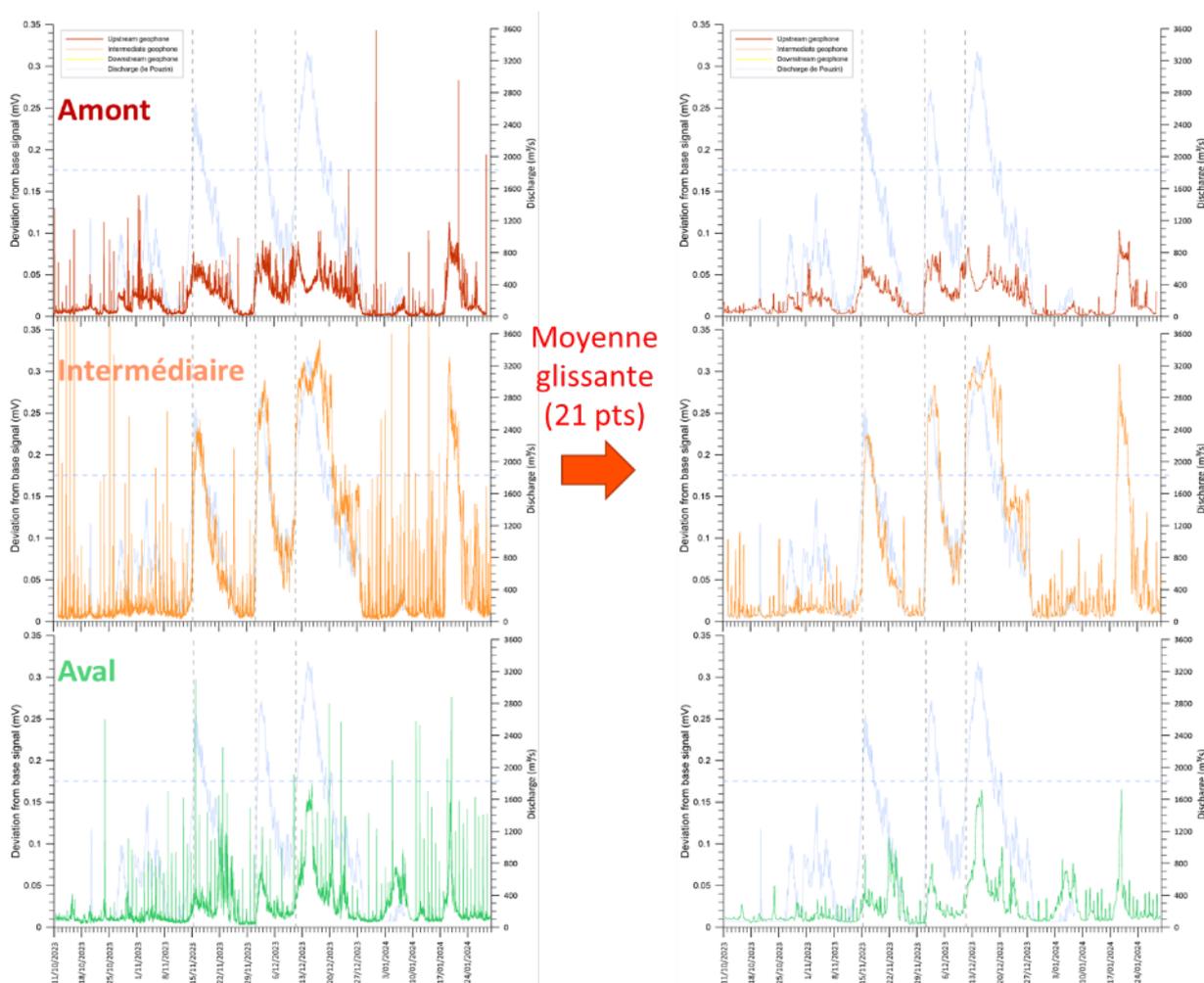


Figure 66. Activité sismique et débit enregistrés pour les 3 géophones mis en place le long du Vieux Rhône de Baix-le-Logis-Neuf entre le 11/10/2023 et le 1/02/2024 (carte avec signal non filtré). Débits horaires bruts et non validés fournis par la CNR (station limnigraphique du Pouzin)

4.3 Nouvelles améliorations

Du point de vue métrologique, de nouvelles améliorations technologiques ont été apportées aux géophones. Ainsi, une nouvelle version de la carte de traitement (v.3) a été réalisée. Elle consomme moins d'énergie et possède une meilleure sensibilité (comparée aux versions précédentes). Cette nouvelle amélioration s'ajoute à celles déjà réalisées auparavant : i) conception d'un intégrateur analogique du signal sismique (pas de temps 10 minutes), ii) développement de géophones connectés IoT sous réseau LoRa® (réseau communautaire low-cost pour l'internet des objets), iii) intégration de ces capteurs au sein d'une plateforme de consultation des données en quasi temps-réel (OpenDataEau), et iv) nouvelle carte de traitement filtrant le signal sur la bande de fréquence du charriage 15-100 Hz.

5. Conclusions et perspectives

Durant les trois années du programme OSR6, neuf relevés RFID ont été effectués et huit géophones ont été installés et suivis (y compris deux géophones mis en place précédemment dans le cadre d'autres projets) dans le cadre de l'action C.3. D'une manière générale, les résultats issus de ces relevés ont permis d'améliorer les connaissances sur le transport sédimentaire (charriage) du Rhône en termes (i) de quantification du transport solide (i.e., compétence, distance et de vitesse de transport) par type de secteur (pavé, dynamique, marges), (ii) de caractérisation des variables qui contrôlent le charriage, et (iii) de modalité de transfert des sédiments grossiers au travers des barrages.

Ainsi, les données fournies par les traceurs RFID ont permis de mieux comprendre les facteurs qui contrôlent le charriage, 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 des crues est le principal facteur permettant de caractériser l'intensité du charriage, les autres facteurs jouent également un rôle. C'est notamment le cas de la texture du lit dont dépendent les phénomènes d'imbrications. Ainsi, il apparaît que le transport est plus efficace sur les secteurs dynamiques que sur les secteurs pavés qui ont subi des actions de réinjection sédimentaire. De même, les conditions hydrauliques locales sont déterminantes, comme l'exemple du bras latéral de Péage-de-Roussillon (PDR_SC) a pu le démontrer (i.e., transport plus limité dans le chenal délimité par le pied de berge et le cordon d'îlots). Si les effets de plusieurs facteurs sur le transport sédimentaire ont pu être identifiés, les effets des conditions hydrauliques locales ne sont pas encore bien caractérisés. C'est pourquoi il serait pertinent d'intégrer à cette étude une analyse fine des contraintes de cisaillement locales, par exemple au travers d'une modélisation hydrologique 2D des sites d'injection car les conditions hydrauliques moyennes que l'on retient actuellement ne sont bien souvent pas pertinentes pour bien caractériser le contexte hydraulique local.

Ces données quantifiées de transport par charriage permettent d'alimenter les calculs de modélisation du transport sédimentaire. Ainsi, pour évaluer la durabilité des actions de réinjection sédimentaire et le temps de transfert des sédiments jusqu'au réservoir aval, une modélisation morphodynamique a été conduite par le CEREGE (Serlet *et al.*, 2022). De plus, un modèle de propagation hydro-sédimentaire de sédiments réinjectés a été réalisé pour les secteurs de Chautagne (CHA) et de Péage-de-Roussillon (PDR_GA). Il fournit des informations sur les modalités de propagation du panache de sédiments issus des sites de réinjection (i.e., vitesse de transfert, volume, répartition le long du secteur).

L'utilisation des traceurs RFID a également fourni des éléments de connaissance sur les conditions de transfert de la charge de fond au niveau du barrage de Jons. Il apparaît que le transport de la charge de fond est peu affecté par le barrage de Jons, du moins pour les 700 premiers mètres de la retenue à l'amont immédiat du barrage (à savoir le secteur étudié par traçage sédimentaire). Ces résultats doivent toutefois être confirmés par de nouveaux relevés des traceurs RFID et par une analyse topo-bathymétrique et sédimentologique du secteur.

En ce qui concerne les géophones, l'analyse du signal sismique a permis : (i) de confirmer les valeurs de débit critique de mise en mouvement de la charge de fond (Q_c), (ii) d'identifier des effets d'hystérésis entre le débit et le signal sismique (démonstrant que le signal enregistré est

effectivement associé au charriage), et (iii) de mieux comprendre les impacts des ouvertures de vannes du barrage de Jons sur le charriage.

Par ailleurs, du point de vue métrologique, de nouvelles améliorations technologiques sont régulièrement apportées aux géophones, dont notamment la conception d'un intégrateur analogique du signal sismique (pas de temps 10 minutes) et la conception d'une nouvelle carte de traitement filtrant le signal sur la bande de fréquence du charriage 15-100 Hz.

Au final, le suivi par géophone semble assez prometteur pour étudier le charriage du fleuve Rhône. Parmi les perspectives offertes par ces premiers résultats, on notera la nécessité de calibrer les géophones. En effet, l'amplitude du signal enregistré est assez variable selon les stations suivies en fonction des conditions environnementales locales (nature de la berge, taux d'humidité, distance à la zone de charriage, etc.). A ce stade, il n'est pas possible de comparer les signaux sismiques entre deux stations. Une calibration réalisée sur le terrain permettrait une meilleure comparaison des signaux des différents sites. De plus, la comparaison avec les données issues d'autres instruments d'un même site (e.g. géophone dans la conduite de Crépieux ; BURGEAP) faciliterait cette calibration.

Une autre question porte sur la variabilité latérale (entre rive gauche et rive droite) du signal sismique et de son atténuation avec la distance entre la source et le capteur. Des expérimentations ponctuelles sur des rivières glacières et sur une station OSR nous permettrait d'estimer i) cette atténuation transversale de signal et l'éventuelle nécessité de placer des capteurs sur les deux rives ; ii) la longueur de tronçon de cours d'eau mesurée par un géophone situé sur une rive.

Il apparaît également nécessaire d'évaluer et d'enlever la composante anthropique du signal sismique enregistré en effectuant une analyse de signal plus approfondie (transformée de Fourier ou ondelettes). Ceci permettrait d'identifier et d'extraire les composantes bruitées d'origine anthropique. L'ajout d'une station de référence (secteur sans charriage) permettrait également de mieux caractériser les composantes bruitée et hydraulique du signal. Mais ceci soulève la difficile question de la limite de détection des sédiments déplacés à l'aide des techniques sismiques en berge. Cette question pourrait être approchée à l'aide du géophone situé à l'entrée de Lyon (Saint Clair) à l'aide de prélèvements en crue ou de prospections plongées avec des prises photo et une granulométrie du fond du lit.

Enfin, pour coupler l'approche géophone avec les suivis RFID, davantage de points de calage sont nécessaires pour établir des relations entre la distance moyenne des traceurs et l'activité géophonique cumulée par période. A ce stade, seuls trois points sont disponibles (à Jons, à Crépieux et à BLN). Néanmoins, avec les crues survenues durant l'hiver 2023-2024 et les relevés RFID planifiés dans le cadre du programme OSR7, davantage de points fourniront les premières bases pour établir une relation (un point en plus à Jons, un point en plus sur le Vieux-Rhône de BLN et un nouveau point sur le Vieux-Rhône de CHA).

6. Bibliographie

- 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>
- Bakker M., Gimbert F., Geay T., Misset C., Zanker S., Recking A. (2020). Field Application and Validation of a Seismic Bedload Transport Model. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 125 DOI: 10.1029/2019JF005416
- Bel C., Liébault F., Navratil O., Eckert N., Bellot H., Fontaine F., Laigle D. (2017). Rainfall control of debris-flow triggering in the Réal Torrent, Southern French Prealps. *Geomorphology* 291 : 17–32. DOI: 10.1016/j.geomorph.2016.04.004
- Cassel M, Dépret T, Piégay H. (2017). Assessment of a new solution for tracking pebbles in rivers based on active RFID: a new solution for tracking pebbles in rivers based on active RFID. *Earth Surface Processes and Landforms* 42 : 1938–1951. DOI: 10.1002/esp.4152 <https://hal.science/OSR/hal-01618580v1>
- Cassel M., Navratil O., Perret F., Piégay H. (2022). Évaluation de la transparence sédimentaire des ouvrages hydro-électriques : Éléments opérationnels pour promouvoir une énergie hydraulique vertueuse. *Rapport Final*. GreenDam.
- Cassel M., Piégay H., Dépret T., Arnaud F., Mouquet-Noppe C., Michel K., Noirot B., Vaudor L., Mora C., Meric L. (2019). *Suivi de l'effet morphologique du démantèlement des marges: Validation des estimations de charriage par des observations in situ*. Rapport intermédiaire, Action 2.4. Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR), 5^{ème} Programme d'Actions. <https://hal.science/OSR/hal-03291004v1>
- Church M. et Hassan MA. (1992). Size and distance of travel of unconstrained clasts on a streambed. *Water Resources Research*, 28, 299– 303
- CNR (2019). Suivi d'une opération de réinjection sédimentaire dans le Vieux-Rhône de Chautagne, *rapport d'étude*, DIGP19-144-00.
- Dépret T., Piégay H., Cassel M., Noirot B., Vaudor L., et al. (2018). Mesures et modélisations du fonctionnement hydrosédimentaire du secteur de Miribel-Jonage. Rapport de recherche, Action 1.2. Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR), 4^{ème} Programme d'Actions. <https://hal.science/OSR/hal-03748489v1>
- Eaton B. et Church M. (2011). A rational sediment transport scaling relation based on dimensionless stream power. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36 (7), 901– 910.
- GeoPeka (2018). Suivi d'une injection sédimentaire : Vieux-Rhône de Chautagne. *Rapport de mesure*, version 3.2.
- GeoPeka. (2019). Suivi par traçage RFID de la mobilité des sédiments d'une opération de réinjection dans le Vieux Rhône de Péage de Roussillon. *Rapport final*, version 1.3.
- Gimbert F., Fuller B.M., Lamb M.P., Tsai V.C., Johnson J.P.L. (2019). Particle transport mechanics and induced seismic noise in steep flume experiments with accelerometer-embedded tracers. *Earth Surf. Process. Landforms* 44 (1),2 19–241, <http://dx.doi.org/10.1002/esp.4495>

- Haschenburger J.K. et Church M. (1998). Bed material transport estimated from the virtual velocity of sediment. *Earth Surface Processes and Landforms* 23, 791–808
- Hassan M.A., Church M., Ashworth P.J. (1992). Virtual rate and mean distance of travel of individual clasts in gravel-bed channels. *Earth Surface Processes and Landforms*, 17(6), 617-627.
- Houbrechts G., Levecq Y., Peeters A., Hallot E., Van Campenhout J., Denis A.C., Petit F. (2015). Evaluation of long-term bedload virtual velocity in gravel-bed rivers (Ardenne, Belgium). *Geomorphology*, 251, 6-19.
- Klingeman P.C., Bravard J.-P., Giuliani Y. (1994). Les impacts morphodynamiques sur un cours d'eau soumis à un aménagement hydroélectrique à dérivation : le Rhône en Chautagne (France); In: Revue de géographie de Lyon, vol. 69, n°1, 1994. Enfoncement des lits fluviaux : processus naturels et impacts des activités humaines. pp. 73-87.
- Lajeunesse E., Malverti L., Charru F. (2010). Bed load transport in turbulent flow at the grain scale: experiments and modeling, *Journal of Geophysical Research*, 115.
- Liébault F., Piégay H., Cassel M., Arnaud, F. (2024). 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 <https://hal.science/OSR/hal-03748489v1>
- Malavoi J.R., Hydratec, 2000. *Etude géomorphologique du canal de Miribel. Rapport d'étude*, 51 p.
- Merelle F. (2021). *Evolution morpho-sédimentaire du Vieux-Rhône de Chautagne. Analyses LIDAR, bathymétriques et traçage des particules par RFID passifs*. Mémoire de master, Université Lumière Lyon 2.
- Milan DJ. (2013). Virtual velocity of tracers in a gravel-bed river using size-based 829 competence duration. *Geomorphology*, 198, 107– 114
- Misset C., Recking A., Legout C., Bakker M., Bodereau N., Borgniet L., Cassel M., Geay T., Gimbert F., Navratil O., Piegay H., Valsangkar N., Cazilhac M., Poirel A., Zanker S. (2020). Combining multi-physical measurements to quantify bedload transport and morphodynamics interactions in an Alpine braiding river reach. *Geomorphology* 351: 106877. DOI: 10.1016/j.geomorph.2019.106877
- Navratil O., Liébault F., Bellot H., Theule J., Ravanat X., Ousset F., Laigne D., Segel V., Fiquet M. (2011). Installation d'un suivi en continu des crues et laves torrentielles dans les Alpes françaises. Journée de Rencontre sur les Dangers Naturels, Institut de Géomatique et d'Analyse du Risque, Lausanne, Suisse. 8 p.
- Navratil O., Liébault F., Bellot H., Travaglini E., Theule J., Chambon G., Laigne D. (2013). High-frequency monitoring of debris-flow propagation along the Réal Torrent, Southern French Prealps. *Geomorphology* 201 : 157–171. DOI: 10.1016/j.geomorph.2013.06.017
- Papangelakis E., MacVicar B.J., Montakhab A.F., Ashmore P. (2022). Flow strength and bedload sediment travel distance in gravel bed rivers. *Water Resources Research*, 58, e2022WR032296. <https://doi.org/10.1029/2022WR032296>

- 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>
- Petit F., Gob F., Houbrechts G., Assani A.A. (2005). Critical unit stream power in gravel-bed rivers. *Geomorphology*, 69, 92-101.
- Petit F., Poinart D., Bravard J.P. (1996). Channel incision, gravel mining and bedload transport in the Rhône river upstream of Lyon, France ("canal de Miribel"). *Catena*, 26, 209-226.
- Phillips C.B., Martin R.L., Jerolmack D.J. (2013). Impulse framework for unsteady flows reveals superdiffusive bed load transport. *Geophysical Research Letters*, 40, 1328–1333.
- Recking, A. (2013). An analysis of nonlinearity effects on bed load transport prediction. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 118 (3), 1264–1281
- Recking A., Piton G., Vazquez-Tarrio D., Parker G. (2016). Quantifying the Morphological Print of Bedload Transport. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(6), 809–822
- 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, PhD Thesis, University Jean Moulin Lyon 3; 305 pp.
- Serlet A., Tal M., Viparelli E. (2022). *Étude du fonctionnement historique et actuel à partir des modèles morphodynamique 1D : retour d'expérience et résultats sur les tronçons PDR et DZM. Rapport Final.* Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR), 6^{ème} Programme d'Actions. <https://hal.science/OSR/hal-03750540v1>
- Tsai V.C., Minchew B., Lamb M.P., Ampuero J.-P. (2012). A physical model for seismic noise generation from sediment transport in rivers. *Geophys. Res. Lett.* 39 (2). <http://dx.doi.org/10.1029/2011gl050255>
- Vázquez-Tarrió D. et Batalla R.J. (2019). Assessing controls on the displacement of tracers in gravel-bed rivers. *Water (Switzerland)*, 11, 1-21.
- Vázquez-Tarrió 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-03291004v1>
- Vázquez-Tarrió 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>
- Vázquez-Tarrió D., Recking A., Liébault F., Tal M., Menéndez-Duarte R. (2019). Particle transport in gravel-bed rivers: Revisiting passive tracer data. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44, 112-128.



Observatoire des Sédiments du Rhône

Dispositifs scientifiques cadres



Partenaires scientifiques



Partenaires techniques et financiers

