



HAL
open science

Suivi des enregistrements géophone et RFID. Synthèse des campagnes de terrain. OSR6 | Axe C - Action C3 | Rapport scientifique intermédiaire

Alexandre Peeters, Mathieu Cassel, O. Navratil, Daniel Vazquez-tarrio, Franck Perret, Bastien Bourjaillat, Christine Mouquet-Noppe, Robinson Nedelec, Kristell Michel, Nicolas Tissot, 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. OSR6 | Axe C - Action C3 | Rapport scientifique intermédiaire: 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. [Rapport de recherche] CNRS; CNR; Réserve Naturelle Nationale de l’île de la Platière. 2023. hal-03750532v2

HAL Id: hal-03750532

<https://hal.science/hal-03750532v2>

Submitted on 4 Oct 2023

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 intermédiaire

Version du 15 mai 2023

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) ; Bastien Bourjaillat (CNRS, UMR5600, EVS) ; Christine Mouquet-Noppe (CNRS, UMR5600, EVS) ; Robinson Nedelec (CNRS, UMR5600, EVS) ; Kristell Michel (CNRS, UMR5600, EVS) ; Nicolas Tissot (CNRS, UMR5600, EVS) ; Hervé Parmentier (CNRS, UMR5600, EVS) ; Hervé Piégay (CNRS, UMR5600, EVS)

Christophe Mora (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., Cassel M., Navratil O., Vázquez-Tarrío D. et al., (2023). *Suivi des enregistrements géophone et RFID. Synthèse des campagnes de terrain*. Rapport scientifique intermédiaire. Observatoire des Sédiments du Rhône – 6^{ème} programme d'action. 70 p.

Résumé

L'objectif de cette action est de mieux évaluer la durabilité des opérations de recharge sédimentaire et la longueur du linéaire fluvial qui peut potentiellement en bénéficier. Deux approches couplées permettent de répondre à cet objectif : (i) le monitoring du flux sédimentaire par l'utilisation conjointe de traceurs RFID et de géophones, et (ii) la modélisation morphodynamique. Durant cette deuxième année, deux relevés RFID ont été réalisés (sur les Rhône-Court-Circuit (RCC) de Chautagne (CHA) et de Péage de Roussillon (PDR)) et quatre nouvelles stations sismiques ont été installées (trois sur le RCC de Baix-Logis-Neuf (BLN) et une sur le Rhône à l'entrée de Lyon). Le travail de modélisation hydro-sédimentaire a, quant à lui, été effectué pour les deux RCC pour lesquels les traceurs RFID ont été relevés cette année.

Les deux relevés RFID concernent le suivi d'opérations de réinjection sédimentaire réalisées il y a un peu plus de 5 ans (décembre 2016 pour CHA et mars 2017 pour PDR). Ils ont nécessité des prospections importantes, à savoir 7 jours pour le RCC de PDR (entre mars et mai 2022) et 6 jours pour le RCC de CHA (entre avril et novembre 2022). Ces nouveaux suivis permettent de mieux caractériser le transport par charriage au droit des secteurs soumis aux actions de recharge ; ceci en termes de compétence du cours d'eau, de distances de transport et de sites préférentiels de mobilisation/dépôt. En outre, les données de déplacement des traceurs sédimentaires ont été utilisées pour affiner les modèles hydro-sédimentaires initiés dans le programme OSR5 pour simuler la propagation des sédiments injectés. La comparaison des résultats obtenus pour les deux RCC étudiés montre des scénarios de propagation relativement contrastés en lien avec les capacités de transport des sites d'injection. Ce travail fournit ainsi des éléments de réponse aux questions relatives à la durabilité des actions de recharge sédimentaire.

L'analyse du signal sismique enregistré par les géophones montre une grande sensibilité aux bruits environnants (e.g., activité de carrière, trafic ferroviaire). Dès lors, une nouvelle carte de traitement (signal filtré sur la bande de fréquence 15-100 Hz) a été développée pour optimiser le rapport signal sismique/bruit. Cette nouvelle amélioration technologique s'ajoute à celles déjà réalisées auparavant (e.g., conception d'un intégrateur analogique du signal sismique sur un pas de temps de 10 minutes, développement de géophone connecté IoT sous réseau LoRa®, intégration des capteurs au sein d'une plateforme de consultation des données en quasi temps-réel). Pour le site de Jons, l'analyse du signal est rendue complexe en raison de la gestion du barrage de Jons, situé environ 300 m en amont. Afin de déterminer dans quelle mesure le signal géophonique peut être corrélé à l'hydraulique, l'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). Il ressort que, pour les montées d'eau (crue) le signal géophonique est corrélé à l'activité hydrologique (gestion des vannes de l'ouvrage) et au charriage potentiel. Le signal géophonique ne semble pas être lié à la surverse (abaissement de la partie supérieure des vannes). Par contre, pour les décrues, une décorrélation est observée entre le débit et l'activité géophonique, ce qui indique que le signal sismique peut être associé au charriage (dans ce contexte, il semble peu probable que cette hystérésis soit liée à un changement de la nature du fond du chenal). Enfin, quatre nouveaux dispositifs ont été installés durant l'année 2. Trois d'entre eux ont été installés le long du RCC de BLN, chacun étant positionné sur la partie aval d'une zone de recharge sédimentaire (effectuées en décembre 2021). Un géophone a également été installé le 13/11/2022 sur le Rhône à Saint-Clair (Caluire), juste en aval du grand banc de la rive droite (banc situé en aval du seuil de la Feyssine). Pour les géophones installés à BLN, l'analyse du signal n'a pas encore pu montrer de corrélation marquée. Il faut toutefois préciser que la crue la plus importante de la période hydrologique étudiée n'a probablement pas atteint un débit suffisamment élevé ($Q < Q_c$) et que le charriage devait être dès lors limité.

Mots-clés

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

Table des matières

1. Introduction.....	5
2. Suivi des RFID : présentation et synthèse des dernières campagnes de terrain	7
2.1 Le Vieux Rhône de Chautagne : recharge sédimentaire de Motz	7
2.1.1 Action de restauration et premiers suivis RFID.....	7
2.1.2 Nouveaux relevés RFID	11
2.1.3 Eléments de synthèse	13
2.2 Le Vieux Rhône de Péage-de-Roussillon : l'île des Gravieres	16
2.2.1 Action de restauration et premiers suivis RFID.....	16
2.2.2 Le nouveau relevé RFID.....	19
2.3 Le Vieux Rhône de Péage-de-Roussillon : recharge sédimentaire de la Platière	27
2.3.1 Action de restauration et premiers suivis RFID.....	27
2.3.2 Le nouveau relevé RFID.....	29
2.3.3 Eléments de synthèse	31
2.4 Le Vieux Rhône de Donzère-Mondragon : l'île des Dames	34
2.4.1 Action de restauration et premiers suivis RFID.....	34
2.4.2 Le nouveau relevé RFID.....	37
2.5 Premiers éléments de synthèse sur les traceurs RFID	41
2.5.1 Synthèse pour le Vieux Rhône de PDR	41
2.5.2 Comparaison inter-sites.....	43
3. Modélisation hydro-sédimentaire	47
3.1 Rappels théoriques.....	47
3.2 Le Vieux Rhône de Péage-de-Roussillon	48
3.3 Le Vieux Rhône de Chautagne.....	50
3.4 Discussion et limites de la méthode.....	53
4. Suivi par géophone	54
4.1 Rappel contextuel.....	54
4.2 Le canal de Miribel et le Rhône en amont de Lyon	56
4.3 Le Vieux Rhône de Baix-le-Logis-Neuf	57
4.4 Résultats issus des premières acquisitions	58
5. Travail en cours et perspectives.....	65
6. Bibliographie	66

1. Introduction

Le présent rapport fait état des travaux menés entre avril 2022 et mars 2023 dans le cadre de l'action C3 du programme OSR6. L'objectif de cette action est de mieux évaluer la durabilité des actions de recharge sédimentaire et la longueur du linéaire fluvial qui peut potentiellement bénéficier de ces actions.

Pour répondre à cet objectif, deux approches ont été couplées : (i) le monitoring du flux sédimentaire par l'utilisation des traceurs RFID et des géophones, et (ii) une 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 recharge, 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 5 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'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 monitorings au long cours car elle est beaucoup moins coûteuse et chronophage que le suivi RFID. Les différents sites d'étude concernés par cette approche sont détaillés au Tableau 1.

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

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 recharge (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	Recharge sédimentaire	Efficacité de la recharge sédimentaire	nov. - déc. 2016	15000	oui (2)	21/12/2016 (888)	Oui (1 prévu)
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	Recharge sédimentaire	Efficacité de la recharge sédimentaire	2024 ?	?	non	NA	Oui (1 prévu)
PDR	La Platière	Recharge sédimentaire	Efficacité de la recharge 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	Recharge sédimentaire	Efficacité de la recharge sédimentaire	nov. 2021	12000	oui (HORS OSR)	10/03/2022	oui (3 en place)
DZM	île des Dames	Recharge sédimentaire	Efficacité de la recharge 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 : recharge 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 et de faire face aux problèmes d'incision observés dans son tronçon amont, une réinjection de 15000 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 Usse (à raison de 4000 m³) et de la retenue de Seyssel (à raison de 11000 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 1) :

- 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. Recharge 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	

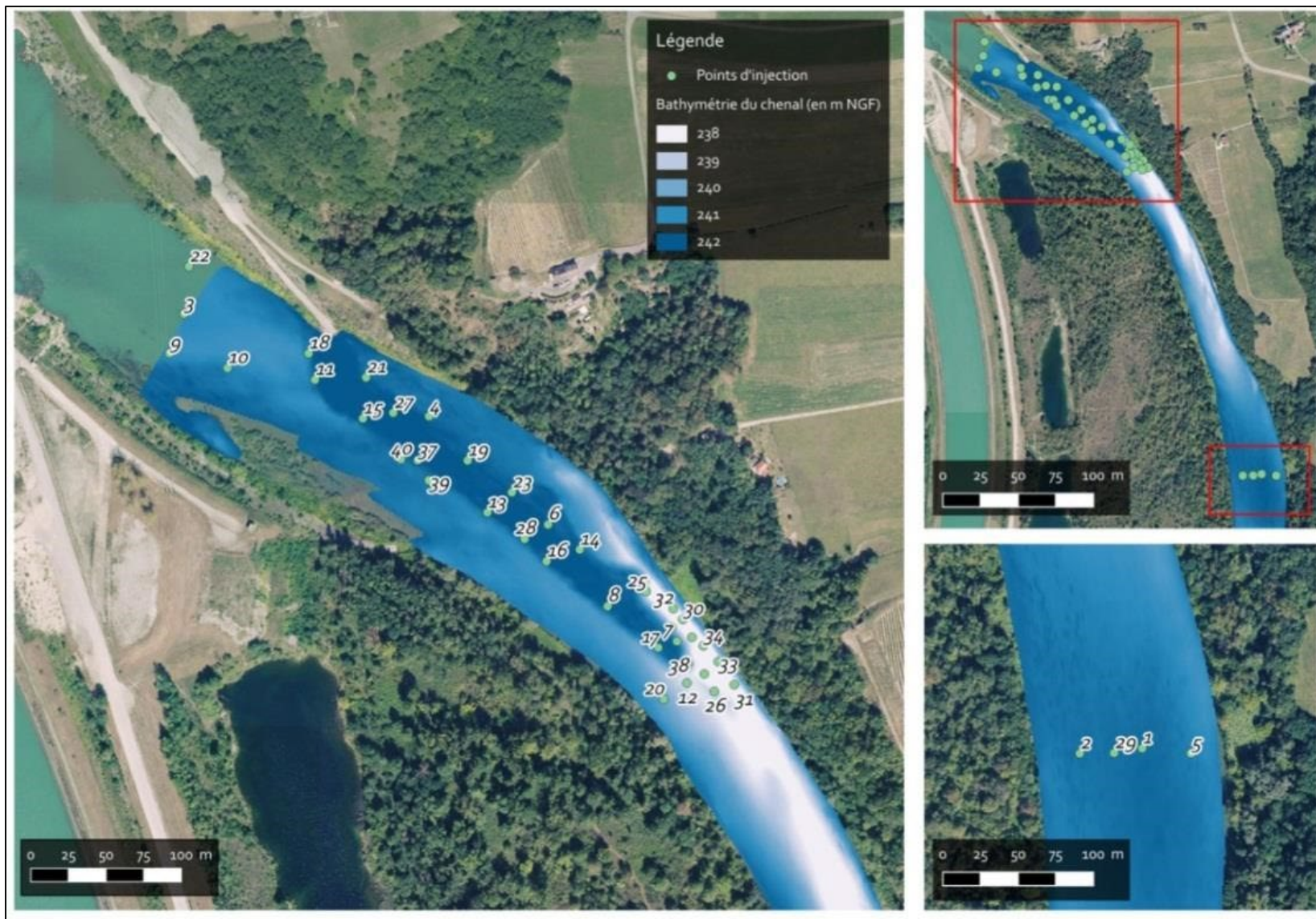


Figure 1. Recharge sédimentaire de Motz : Localisation des injections des traceurs en fonction de la bathymétrie initiale (GeoPeka, 2018)

Par la suite, trois relevés de la position des traceurs (S1, S2 et S3) ont été effectués (Figure 2 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 taux 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.

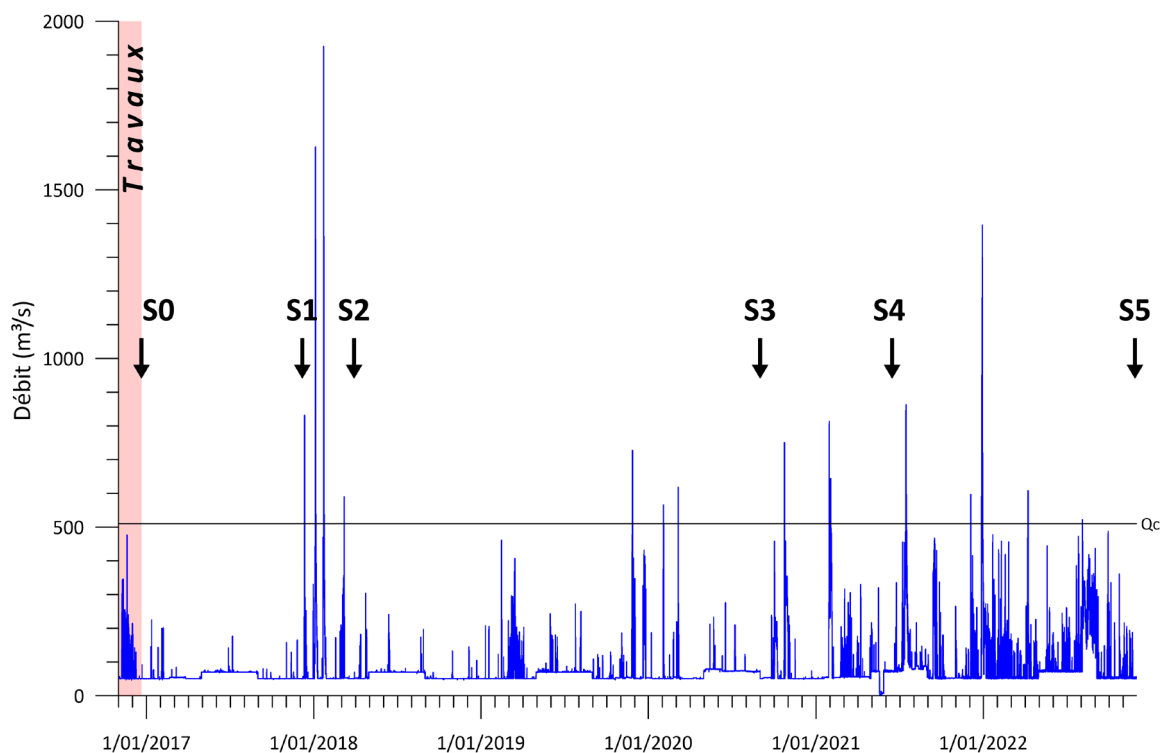


Figure 2. Recharge sédimentaire de Motz : hydrogramme et relevés RFID. Débits horaires bruts et non validés fournis par la CNR (station limnigraphique du barrage de Motz)

Tableau 3. Recharge 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}	ω pour Q _{max} (W/m ²)
S1	7/12/2017	22.3	5.11	267	30	0	224 (12/01/2017)	6.6
S2	30/03/2018	31	13	213	24	4	1926 (22/01/2018)	76.1
S3	1/09/2020	11.5	2.02	71	8	3	728 (27/11/2019)	28.8
S4	16/06/2021	15.7	4.44	113	13	2	814 (29/01/2021)	32.2
S5	28/11/2022	33.5	10.8	122	14	5	1395 (29/12/2021)	55.1

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 4). 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, 2/08/2022). 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 4).

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).

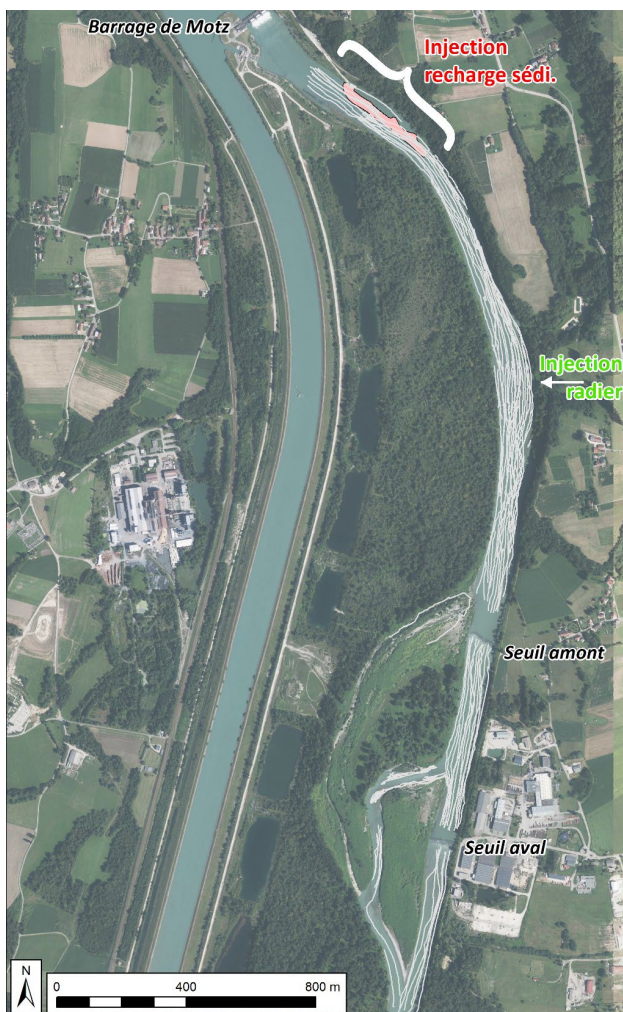


Figure 3. Recharge sédimentaire à Motz : zone prospectée lors du relevé S5

Tableau 4. Recharge 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

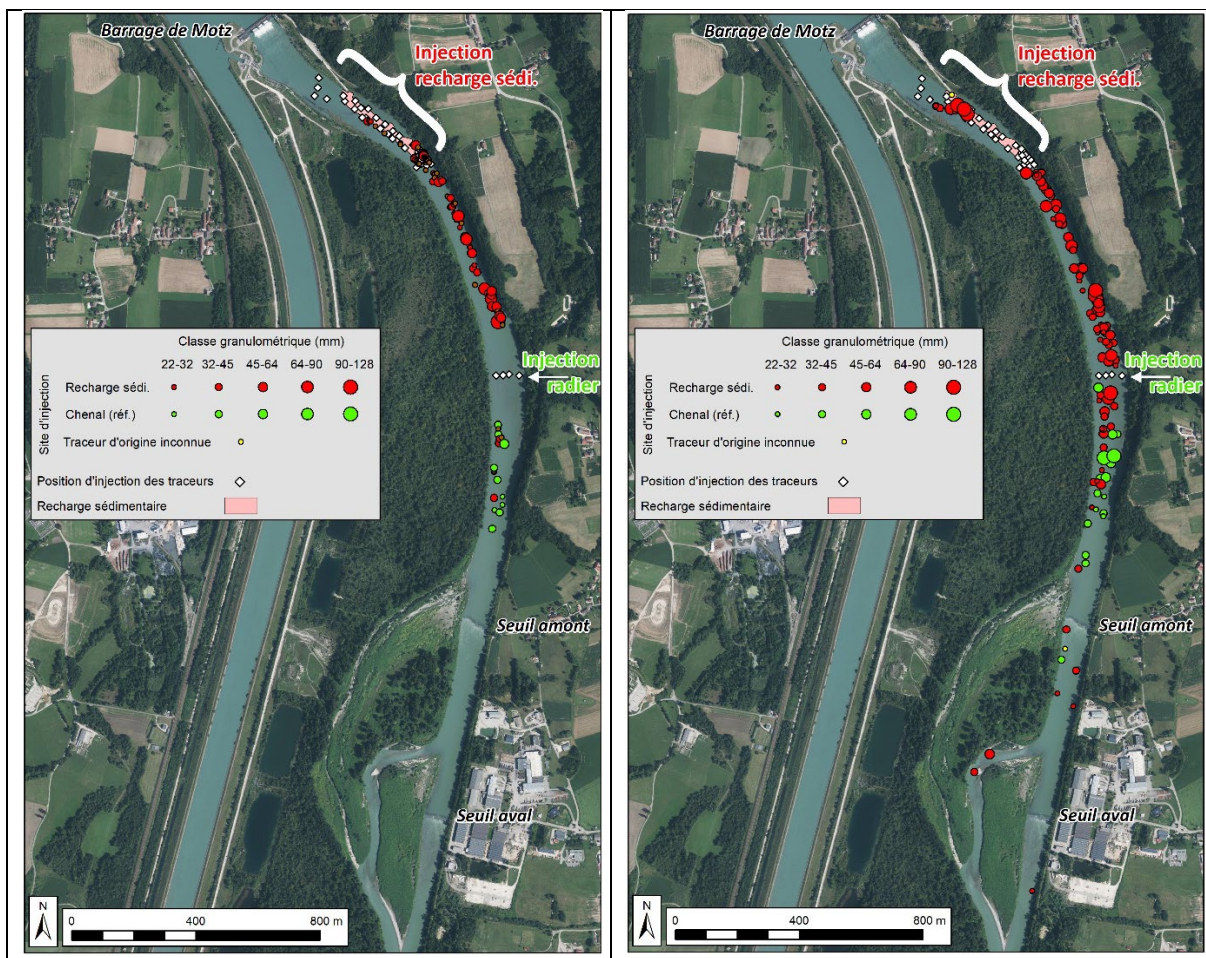


Figure 4. Recharge sédimentaire à Motz : localisation des traceurs pour les relevés S4 (à gauche) et S5 (à droite)

2.1.3 Éléments de synthèse

Taux de récupération

Le détail des taux de récupération calculés selon la classe granulométrique et selon la taille de la capsule RFID utilisée est représenté en Figure 5. D'une manière générale, il apparaît que, pour chacun des relevés, ce taux 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 taux de retour pour les classes granulométriques les plus grossières et pour les capsules les plus grandes.

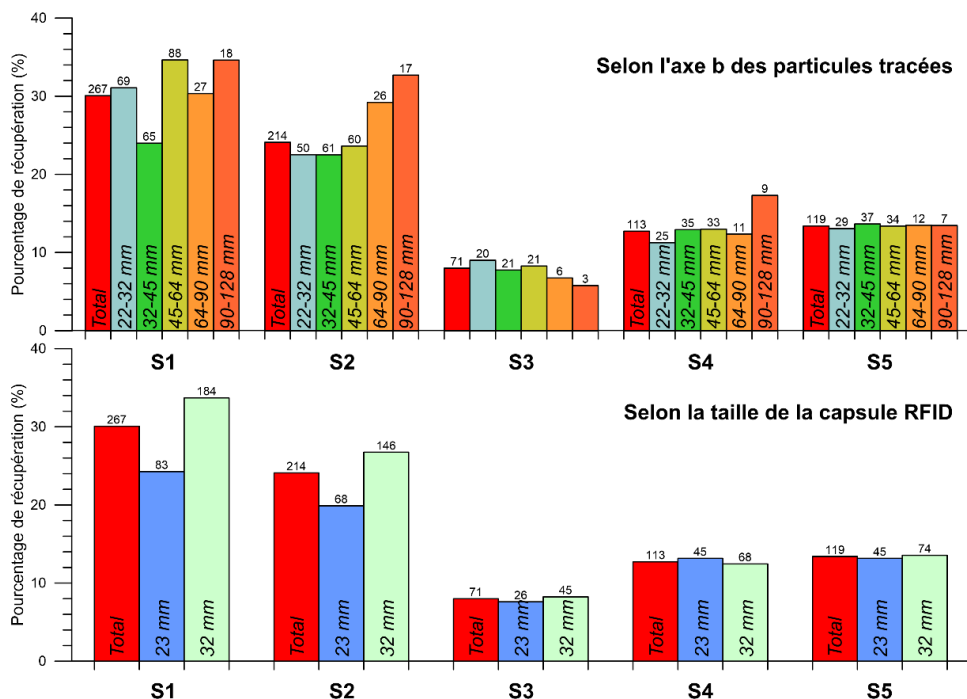


Figure 5. Recharge sédimentaire à Motz : pourcentages de récupération des 5 relevés RFID présentés selon l'axe b des particules tracées (en-haut) et selon la taille de la capsule RFID (en bas) (les numéros surmontant les histogrammes réfèrent aux nombres de particules retrouvées)

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 $510 \text{ m}^3/\text{s}$. Cette approche fournit une valeur proche de celles calculées via les formules de Schoklitsch et de Bathurst, qui sont de $498 \text{ m}^3/\text{s}$ et $603 \text{ m}^3/\text{s}$, 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 S0 (Tableau 5). Ainsi, 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. En procédant de la sorte, la comparaison du relevé S5 avec l'injection S0 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. Sur la période de 5 ans, les traceurs ont ainsi parcouru une distance moyenne de 701 m et une distance maximale de 2435 m (Tableau 5). 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. Recharge sédimentaire de Motz : 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	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 6). 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 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.

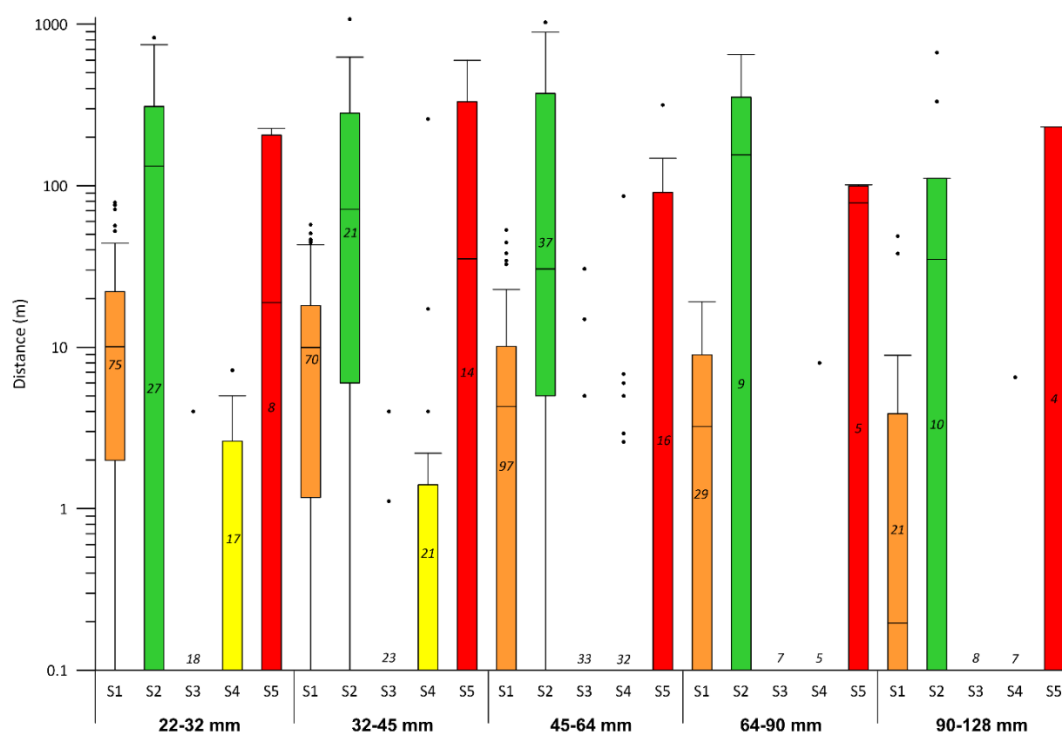


Figure 6. Recharge sédimentaire de Motz : distances de transport par classe granulométrique

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

2.2.1 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 6) 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 7).

Tableau 6. 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 7. L'île des Gravieres : (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 8 et Tableau 7).

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 8). 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

suiwi S1, avec des distances moyenne et maximale de respectivement 5,6 m et 93 m (Tableau 8). 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.

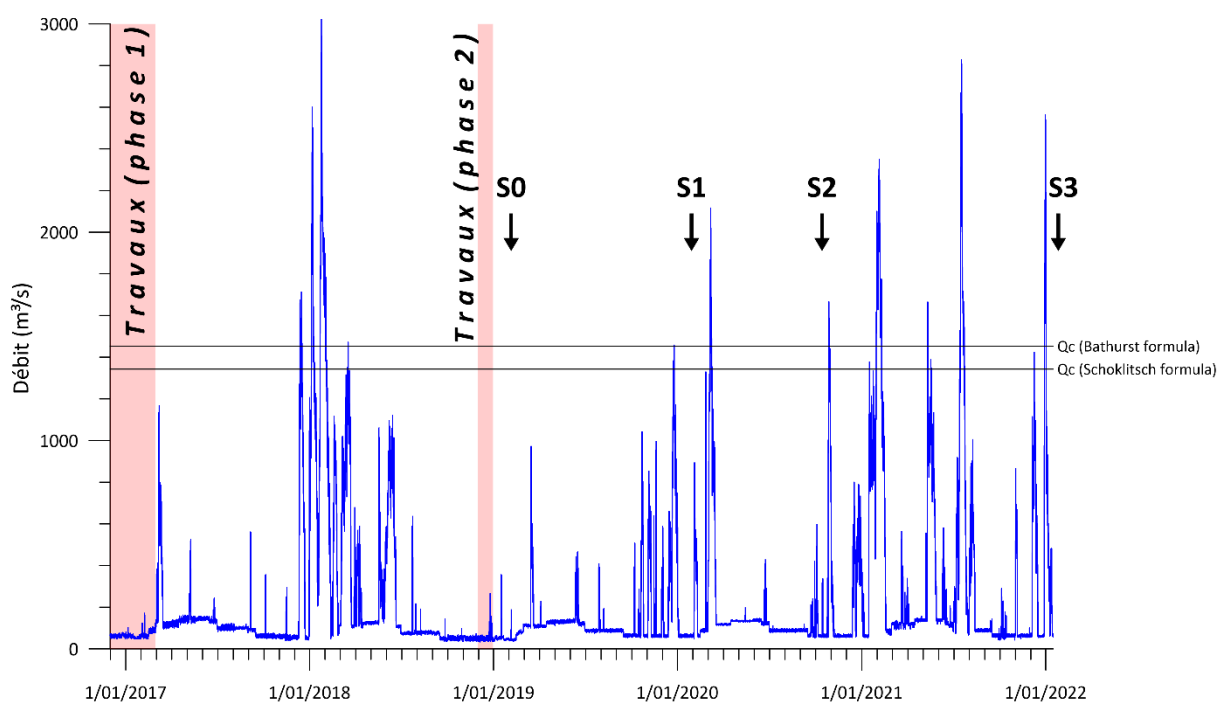


Figure 8. L'Île des Gravier : hydrogramme et relevés RFID. Débits horaires bruts et non validés fournis par la CNR (station limnigraphique située en aval du barrage de Saint-Pierre-de-Bœuf)

Tableau 7. L'Île des Gravier : caractéristiques des prospections et des périodes hydrologiques associées aux relevés RFID

n°	Date	Temps de prospection (h)	Surface prospection (ha)	Nombre d'éléments retrouvés	% de retour	Nbre d'événements > Qc	Q _{max} (m³/s) + date du Q _{max}	ω pour Q _{max} (W/m²)
S1	29/01/2020	15	1,8	655	65	1	1458 (25/12/2019)	59
S2	14-15/10/2020	9	1,8	253	25	1	2117 (6/03/2020)	86
S3	26 et 31/01/2022	14	3,7	634	63	5	2828 (17/07/2021)	115

Taux de récupération

Le détail des taux de récupération calculés selon la classe granulométrique et selon la taille de la capsule RFID utilisée est représenté à la Figure 9. Bien que ce taux augmente légèrement avec la taille des particules et la taille de la capsule RFID, il ne montre dans l'ensemble pas de grandes disparités.

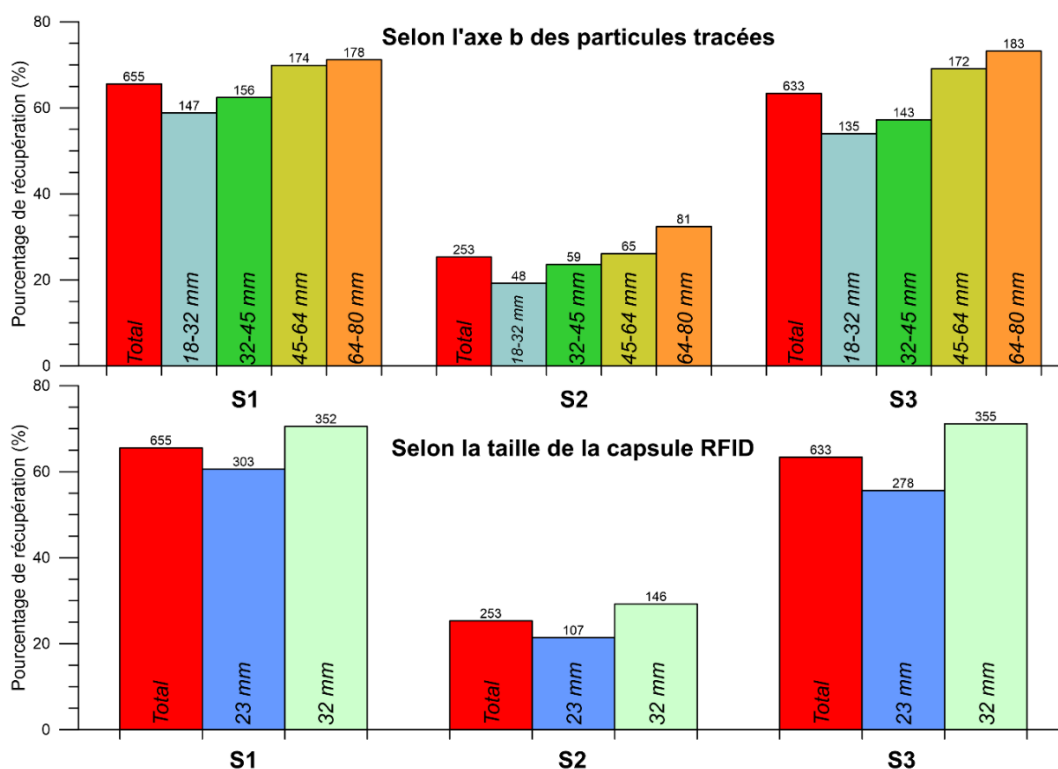


Figure 9. L'Île des Graviers : pourcentages de récupération des 3 relevés RFID présentés selon l'axe b des particules tracées (en-haut) et selon la taille de la capsule RFID (en bas) (les numéros surmontant les histogrammes réfèrent aux nombres de particules retrouvées)

2.2.2 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 8 et Tableau 7). Le relevé a été réalisé en collaboration avec le personnel de la Réserve Naturelle. 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 10).

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 10). 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 10. L'île des Graviers : zone prospectée pour le relevé S3

Analyse à l'échelle du secteur

La position des traceurs du relevé S3 est représentée en Figure 11. 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 8). 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.

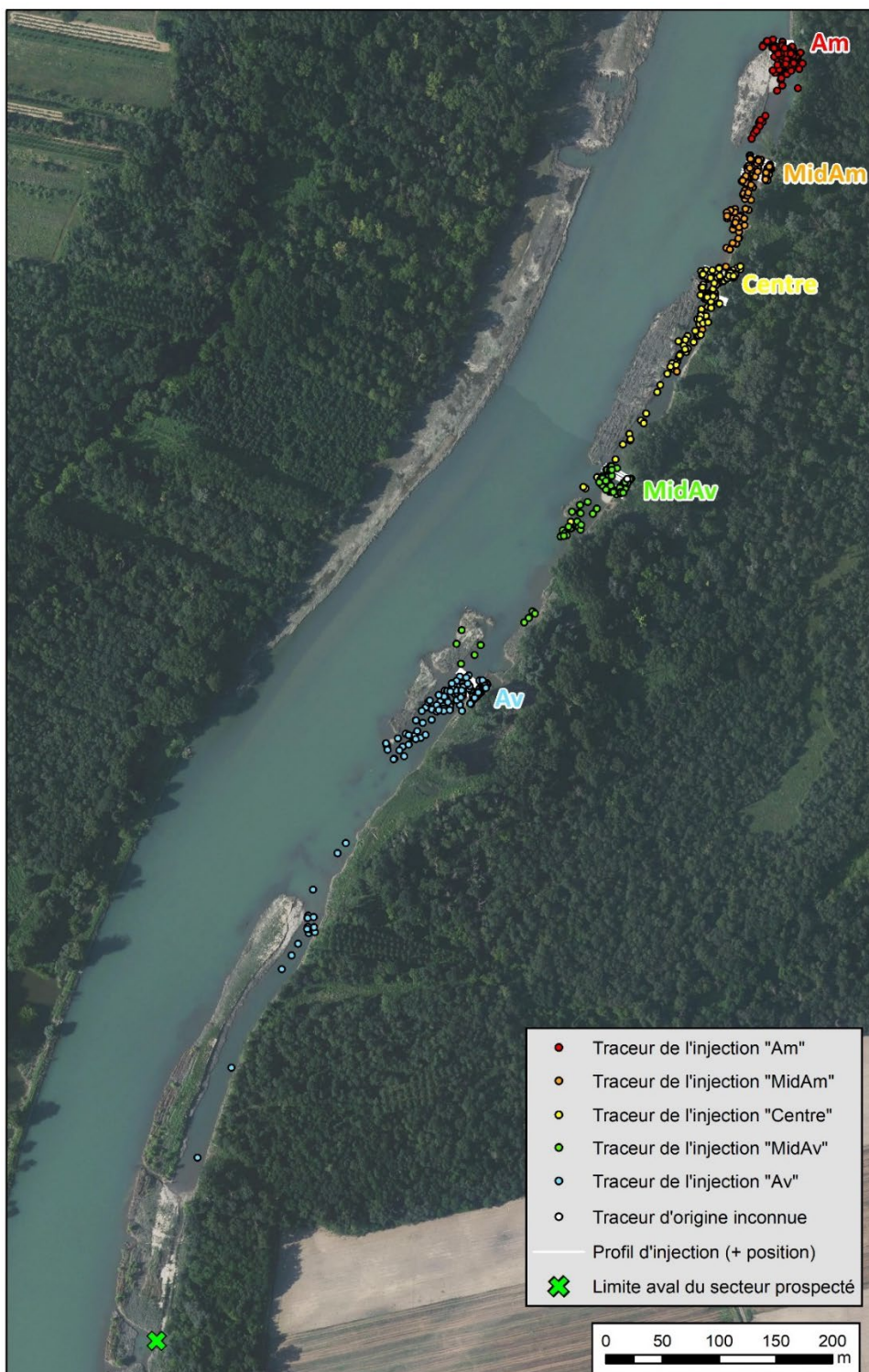


Figure 11. L'Île des Gravieres : localisation des traceurs pour le relevé S3

Tableau 8. 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 9). 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 indicateurs de mobilité pour S1 et S2.

Tableau 9. 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 10). 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 10. L'Île des Gravieres : 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 12, 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 8).

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 13, 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 12, où les distances montrent une diminution en fonction de la taille des particules.

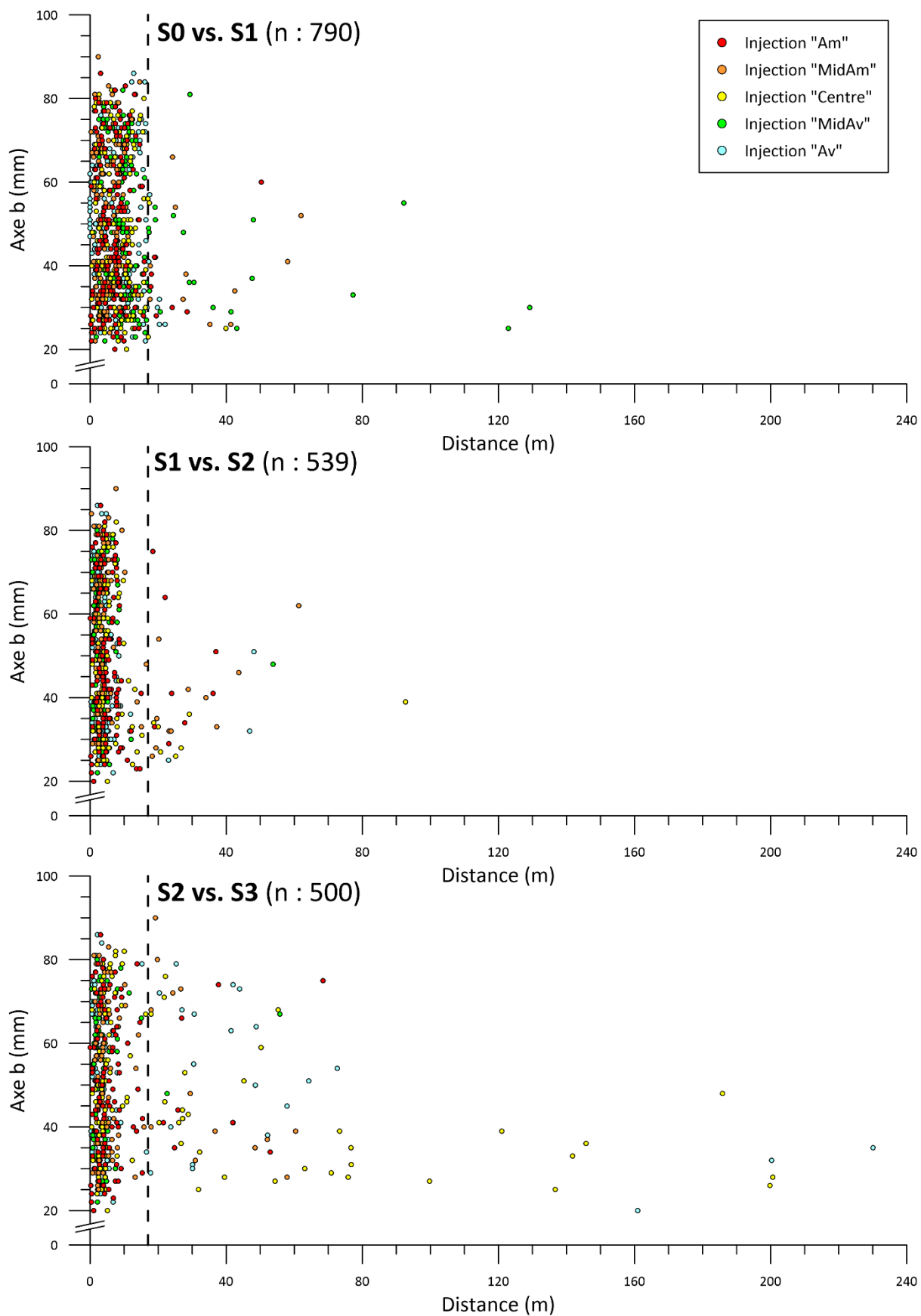


Figure 12. L'île des Graviers : distances de transport en fonction de la taille des particules

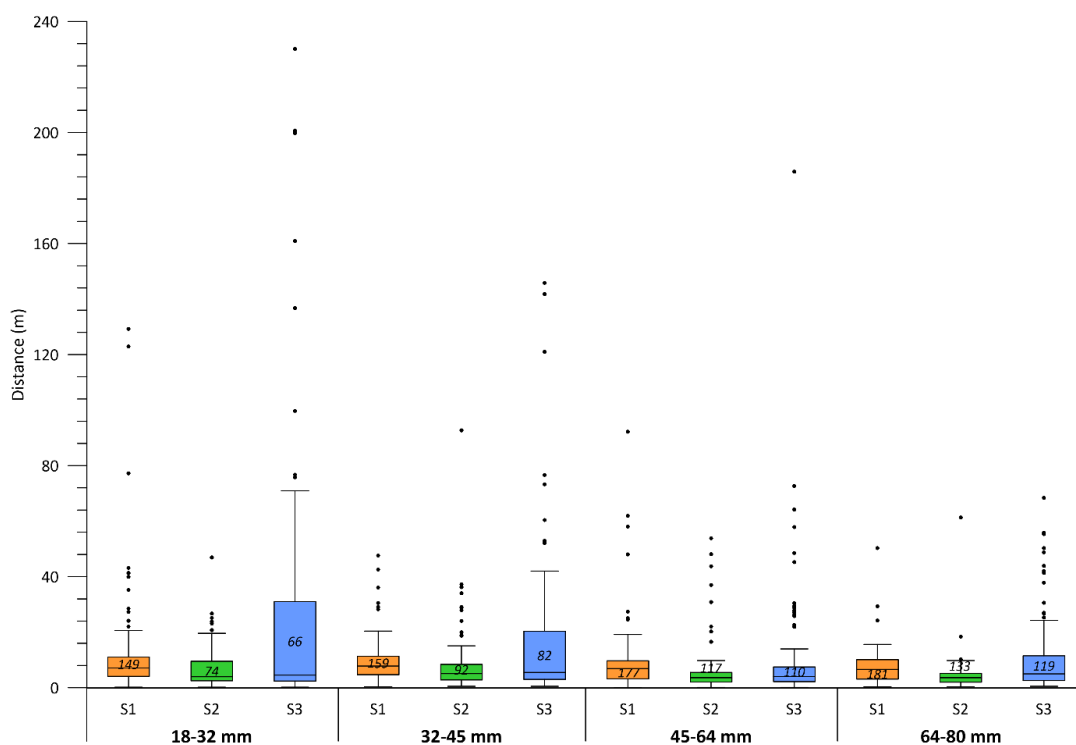


Figure 13. L'île des Gravier : distances de transport par classes granulométriques

Analyse à l'échelle des profils d'injection

La Figure 12 et la Figure 14 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.

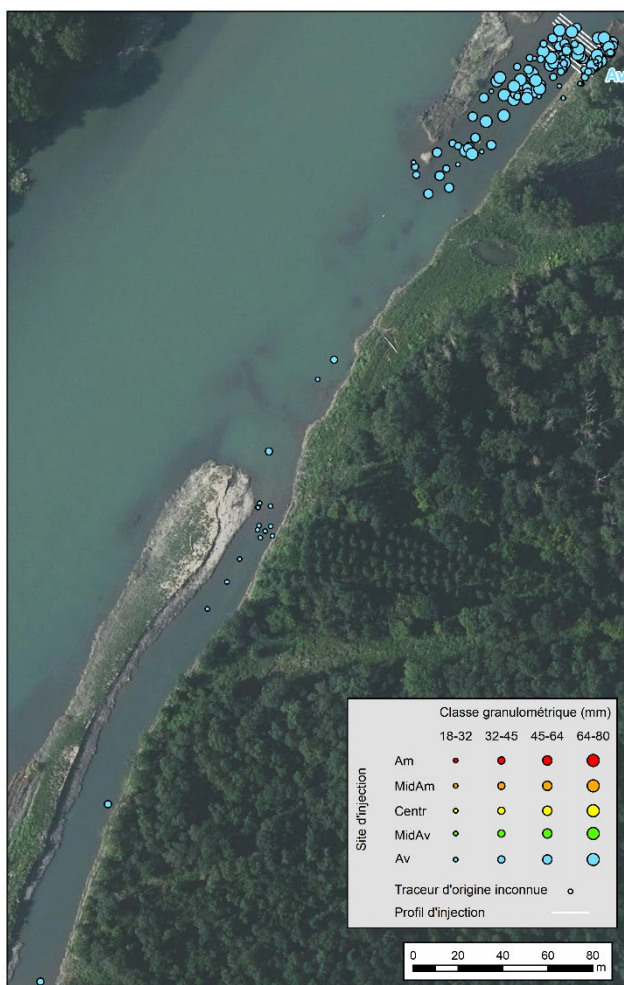
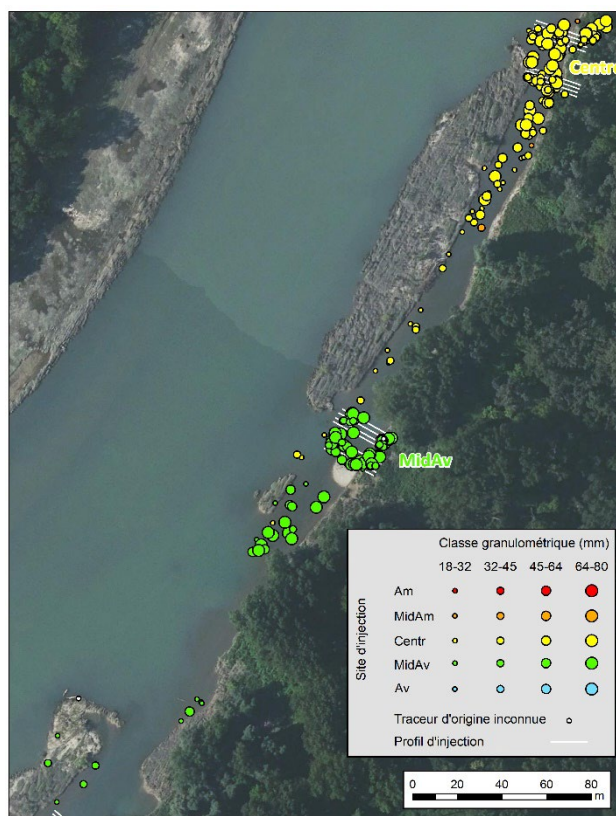
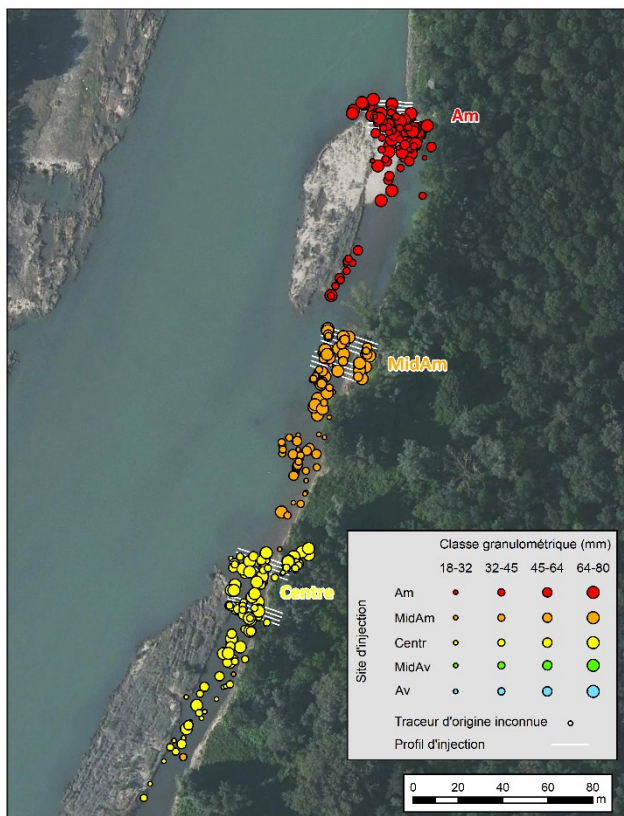


Figure 14. L'île des Graviers : Position et taille (axe b) des traceurs pour le relevé S3 : injection « Am » et « MidAm » (haut gauche), injections « Centr » et « MidAv » (haut droit), injection « Av » (bas gauche)

2.3 Le Vieux Rhône de Péage-de-Roussillon : recharge sédimentaire de la Platière

2.3.1 Action de restauration et premiers suivis RFID

Parallèlement à l'action de désartificialisation des berges sur le RCC de PDR, une opération de recharge 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 11). 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 15).

Tableau 11. Recharge 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 15. Recharge 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.

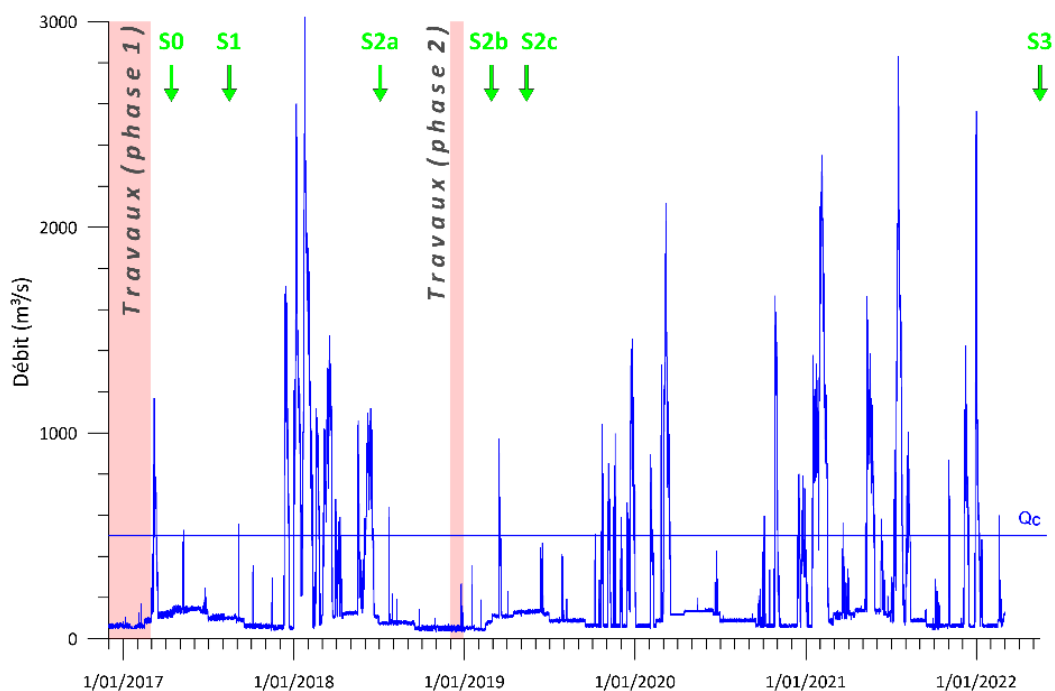


Figure 16. Recharge sédimentaire de la Platière : hydrogramme et relevés RFID. Débits horaires bruts et non validés fournis par la CNR (station limnigraphique située en aval du barrage de Saint-Pierre-de-Bœuf)

Tableau 12. Recharge 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)

2.3.2 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 16 et Tableau 12).

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 17 et Tableau 13).

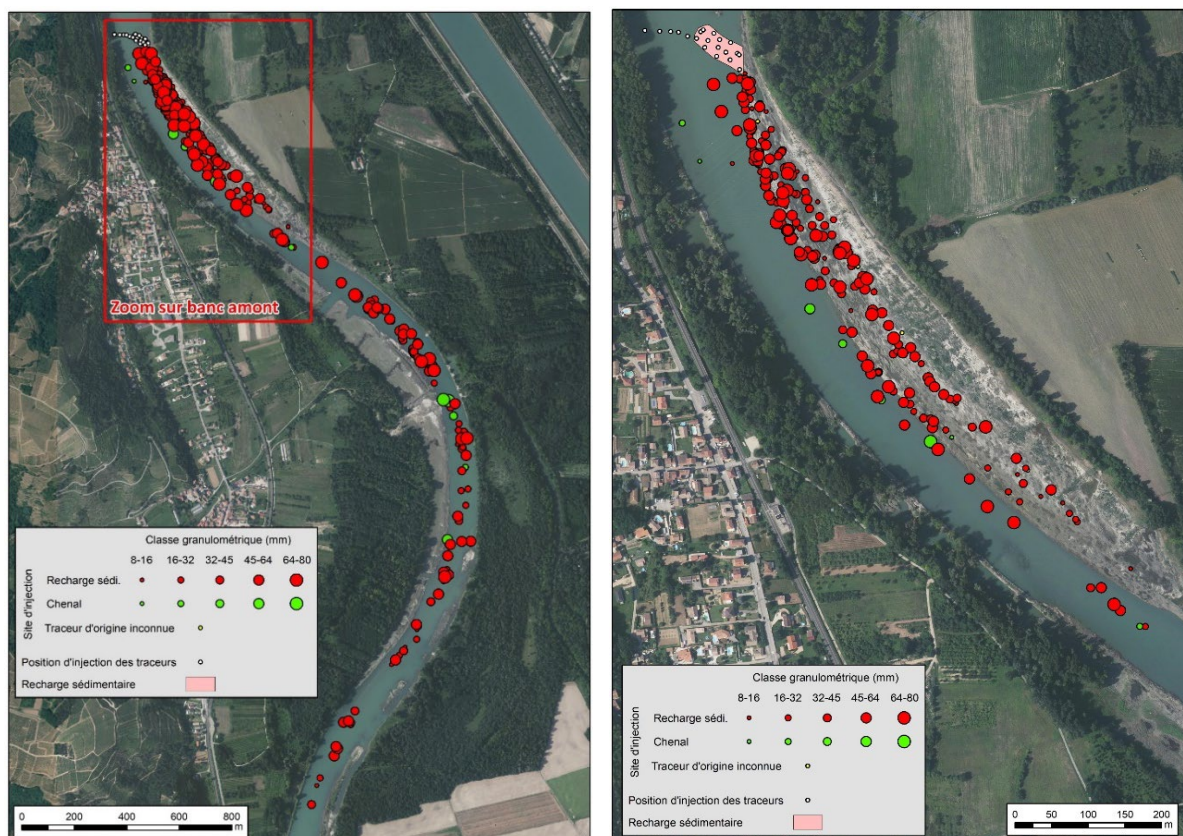


Figure 17. Recharge sédimentaire de la Platière : localisation des traceurs pour le relevé S3 (à gauche) et zoom sur le banc amont (à droite)

Tableau 13. Recharge 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

2.3.3 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 18. 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.

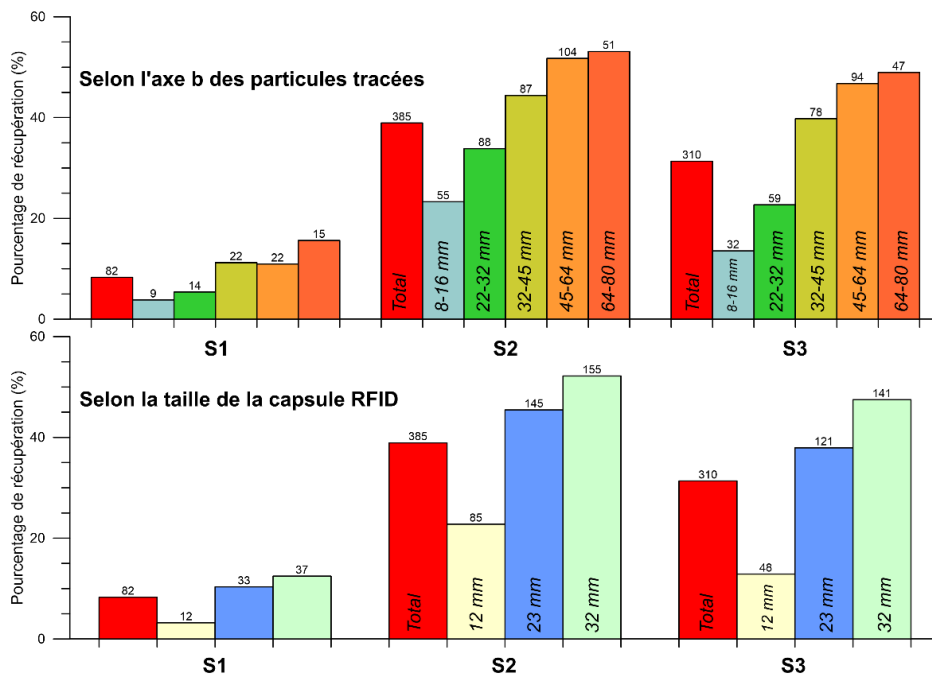


Figure 18. Recharge sédimentaire de la Platière : pourcentages de récupération des 3 relevés RFID présentés selon l'axe b des particules tracées (en-haut) et selon la taille de la capsule RFID (en bas) (les numéros surmontant les histogrammes réfèrent aux nombres de particules retrouvées)

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 17).

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 19.

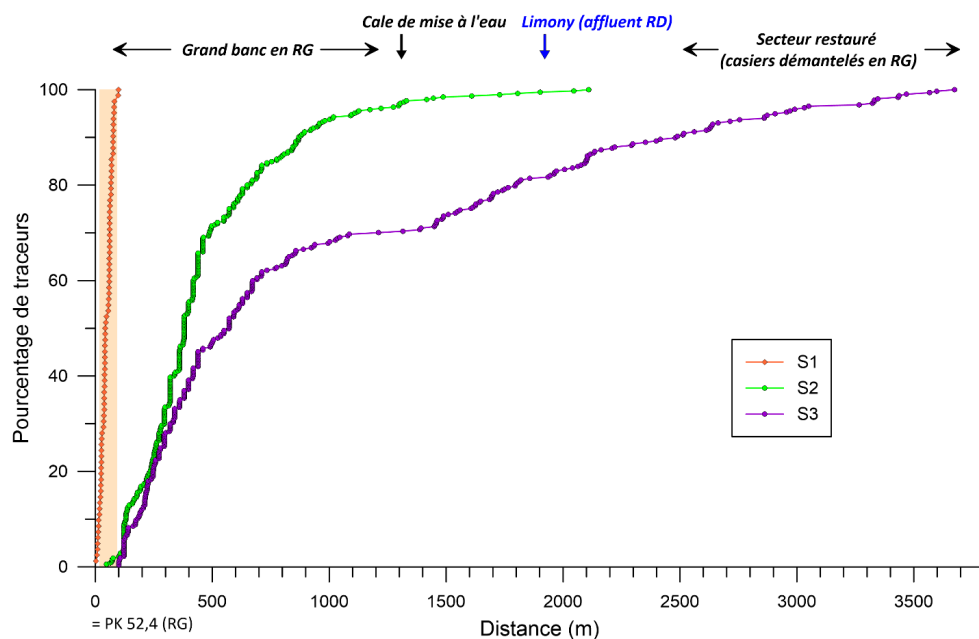


Figure 19. Recharge sédimentaire de la Platière : localisation des traceurs pour le relevé S3 (à gauche) et zoom sur le banc amont (à droite)

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 14). 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 recharge 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 14. Recharge 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 20). 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.

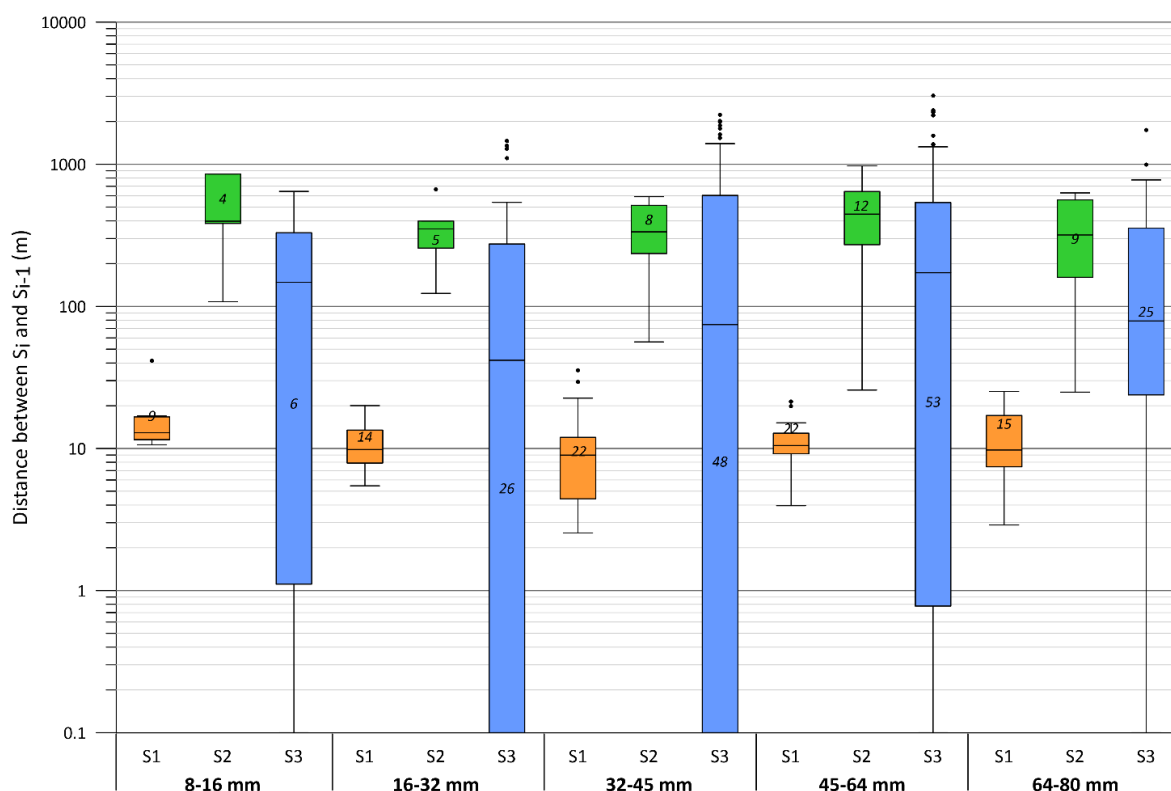


Figure 20. L'île des Graviers : distances de transport par classes granulométriques

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

2.4.1 Action de restauration et premiers suivis RFID

Dans le Vieux Rhône de Donzère-Mondragon, deux lônes (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 lônes 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 lône 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 lônes. Ainsi, pour déterminer les débits seuil de mise en mouvement et évaluer le potentiel d'auto-entretien des lônes, près de 1500 traceurs ont été injectés en avril 2019 comme suit (Tableau 15) :

- 1099 particules dans le chenal principal, réparties le long de 5 profils distants d'environ 200 m et dont le plus aval est localisé en amont de l'entrée de la lône de la Grange écrasée (Figure 21) ;
- 200 particules dans chaque lône, 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 15.

Tableau 15. 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

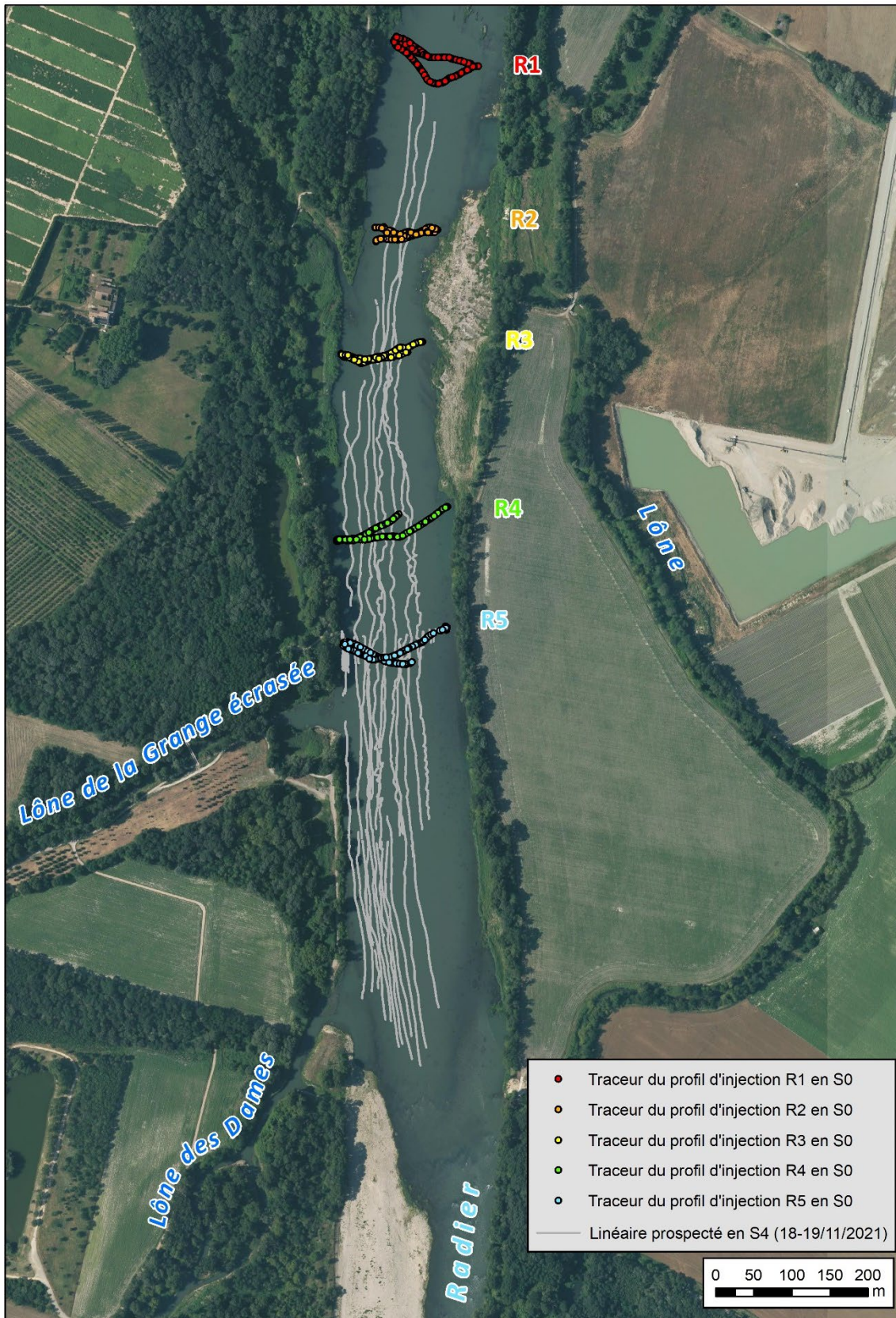


Figure 21. L'Île des Dames : localisation des sites d'injection des traceurs RFID (S0) et linéaire prospecté lors du relevé S4 (18-19/11/2021)

Par la suite, les traceurs ont fait l'objet de plusieurs relevés. Seuls les relevés réalisés dans le Vieux Rhône sont traités dans ce rapport. Les relevés effectués sur les îlons 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).

Le premier suivi (S1), réalisé après un petit évènement hydrologique dont le pic a atteint 548 m³/s (Figure 22 et Tableau 16), fait état d'une absence de mouvement, à l'exception d'une particule sur les 270 traceurs retrouvés (Vázquez Tarrío et al., 2021).

Le deuxième suivi (S2), réalisé quant à lui après trois pics dépassant le Qc initialement estimé, a entraîné un transport partiel dans le chenal principal du Rhône (11 particules mobiles sur les 75 traceurs communs avec le relevé S1 ; Tableau 17). 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 23). Néanmoins, il est plus vraisemblable ici que ces déplacements soient le résultat des effets locaux liés à la géométrie du chenal. En effet, plus de la moitié des traceurs mobiles provient des profils d'injection R3.

Le troisième suivi (S3) a également fait suite à trois pics de crue > Qc 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 (taux de retour de 18 %). Sur les 41 traceurs communs avec le relevé précédent, 11 d'entre eux ont parcouru une distance égale ou supérieure à 17,6 m (distance seuil de mobilisation). Ils ont parcouru des distances moyenne et maximale de 61 m et 769 m, respectivement.

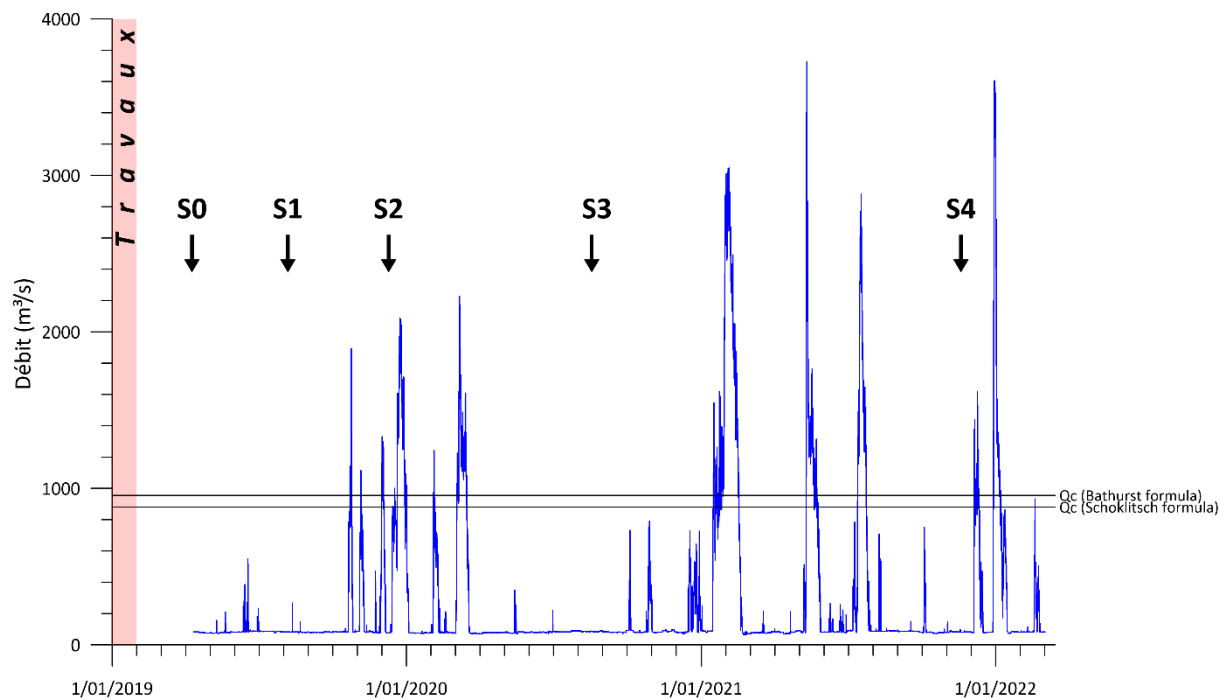


Figure 22. L'île des Dames : hydrogramme et relevés RFID. Débits horaires bruts et non validés fournis par la CNR (station limnigraphique de Bourg-Saint-Andéol)

Tableau 16. L'Île des Dames : caractéristiques des prospections et des périodes hydrologiques associées aux relevés RFID

n°	Date	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}	ω pour Q _{max} (W/m ²)
S1	6-7/08/2019	60	12	236	21	0	548 (18/06/2019)	29
S2	10/12/2019	10	12	82	7	3	1894 (24/10/2019)	101
S3	18 & 20/08/2020	12	12	194	18	3	2227 (7/03/2020)	118
S4	18-19/11/2021	12	~12	74	7	3	3728 (11/05/2021)	198

Tableau 17. 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	34	270	25	1/270 (0.4)	5.9	24	NA	NA
S2	29	111	10	11/75 (15)	18	270	38	65
S3	2	196	18	11/41 (27)	61.4	769	64	70
S4	NA	74	7	14/16 (88)	507	1127	52	76

2.4.2 Le nouveau relevé RFID

Prospection

Un nouveau 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 22 et Tableau 16). 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 îlon des Dames). 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 taux de retour (7 %). Parmi ceux-ci, seuls 16 éléments sont communs avec le relevé précédent.

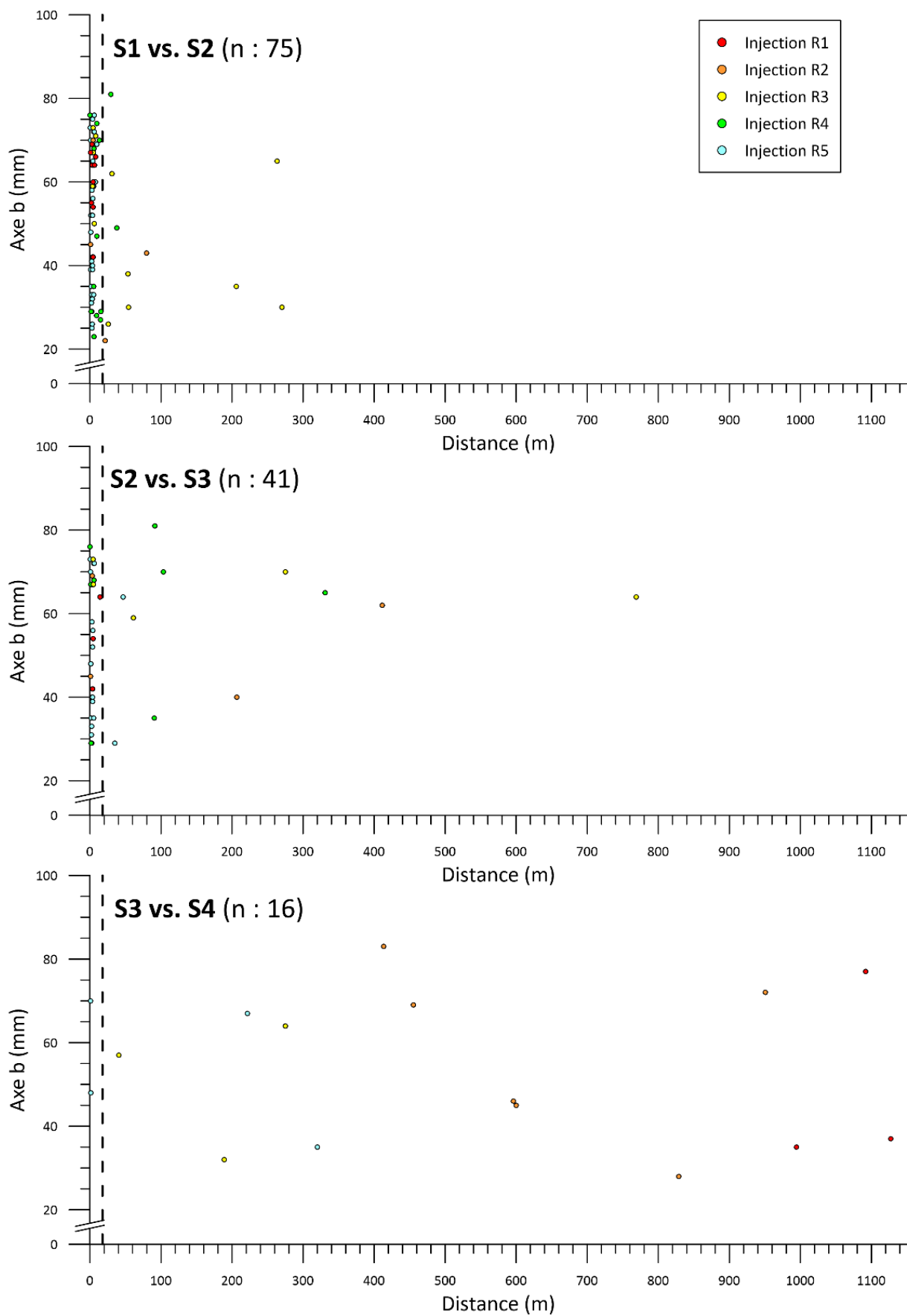


Figure 23. L'île des Dames : distances de transport en fonction de la taille des particules

Analyse à l'échelle du secteur

D'emblée, il faut préciser que toute analyse est rendue délicate sur ce secteur car (i) les pourcentages de récupération sont relativement faibles, en particulier pour le dernier relevé, et (ii) la prospection n'est pas exhaustive. C'est surtout le cas pour le dernier relevé. Malgré 2 jours de prospection et environ 12 ha couverts, seuls 7 % des traceurs ont pu être localisés.

La position des 74 traceurs du relevé S4 est représentée en Figure 24. Malgré les précautions évoquées ci-dessus, il apparaît que les traceurs les plus grossiers sont les mieux représentés (10 % de récupération pour la classe 64-80 mm ; Tableau 18). Bien que les autres classes granulométriques de traceurs soient également présentes dans des proportions inférieures, ces résultats suggèrent une relation entre les distances de transport et la taille des particules. Toutefois, seules une prospection du secteur aval et une localisation des traceurs manquants permettraient de bien caractériser le transport sédimentaire.

A contrario, L'analyse des distances de transport entre S3 et S4 (Figure 23) indique un transport généralisé sur des distances importantes, quelle que soit la taille des particules. Il en est de même pour les distances calculées entre les relevés S2 et S3 mais dans une moindre mesure (du fait des crues de moindre intensité). Comme toutes les fractions granulométriques se sont avérées être mobiles pour les 3 périodes hydrologiques étudiées (Figure 23), il n'est pas possible de déterminer la limite de compétence de ce secteur. Un marquage de particules plus grossières permettrait de mieux cibler la compétence de ce secteur.

Tableau 18. L'Île des Dames : répartition des traceurs retrouvés en S4 selon leur classe granulométrique et leur profil d'injection

		Classes granulométriques (mm)				Total	% de retour
		16-32	32-45	45-64	64-80		
Profil d'injection	R1	2	7	3	5	17 (/221)	8
	R2	4	1	4	5	14 (/219)	6
	R3	6	2	4	8	20 (/221)	9
	R4	1	3	4	1	9 (/221)	4
	R5	2	3	1	8	14 (/217)	6
Total		15 (/274)	16 (/274)	16 (/275)	27 (/276)	74 (/1099)	
% de retour		5	6	6	10		7

Enfin, le relevé S4 peut être comparé avec l'injection (S0) pour avoir une estimation de la distance de transport sur le moyen terme (~2,5 ans). Ainsi, l'analyse de la position des 74 traceurs retrouvés montre qu'ils ont parcouru une distance de 547 m en moyenne (Tableau 19). La distance maximale est, quant à elle, de 1257 m. Il faut toutefois rester prudent face à ces résultats pour les raisons évoquées ci-dessus (prospection limitée et faible pourcentage de retour).

Tableau 19. L'Île des Dames : comparaison du dernier relevé RFID (S4) avec l'injection (S0)

n°	Nbre total d'éléments	Nombre d'éléments mobilisés / éléments communs avec S0 (%)	Dist. moy. (m)	Dist. max. (m)
S4 vs. S0	74	72/74 (97)	547	1257

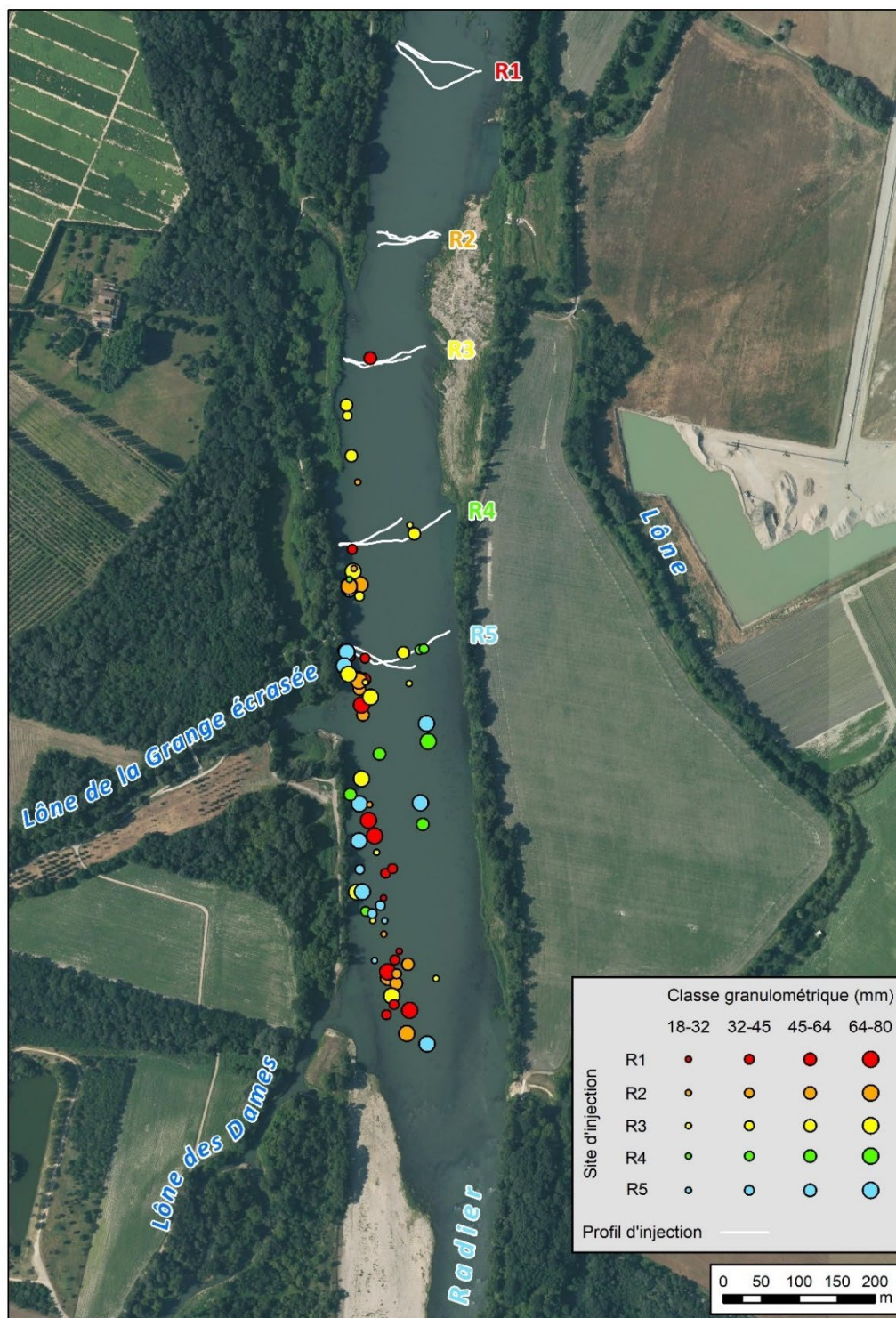


Figure 24. L'Île des Dames : Position et taille (axe b) des traceurs pour le relevé S4

2.5 Premiers éléments de synthèse sur les traceurs RFID

2.5.1 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 20). 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). Cette dernière est calculée en divisant la distance parcourue par la durée des pics de crues où $Q \geq Q_c$ (plutôt que par le temps calendaire, qui est principalement composé de périodes inactives). De la sorte, il apparaît que les sédiments issus de la recharge 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 recharge 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 20. 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



Au final, 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 recharge sédimentaire réalisée 2,2 km en amont, comme l'indique la présence d'un traceur issu du site « recharge 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 25). Compte tenu de la mobilité mise en évidence dans ce travail, les secteurs restaurés devraient continuer de 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.



Figure 25. Bras secondaire réhabilité dans la partie amont du secteur de démantèlement des casiers 5 ans après travaux (vue vers l'aval, 1/03/2022)

En outre, cette évaluation fournit aux gestionnaires de nouveaux éléments de connaissance qui devraient guider les futurs projets de restauration. Elle a notamment mis en lumière le problème du piégeage des galets injectés sur les bancs de convexité (cas du site de recharge sédimentaire et probablement du site de démantèlement dans un futur proche). D'un point de vue opérationnel, il est dès lors recommandé de positionner les sites de recharge à une distance suffisante des bancs de convexité. À ce titre, Chardon et al. (2021) proscrivent la mise en œuvre d'actions de recharge sédimentaire sur les bancs de convexité et préconisent de les réaliser dans des zones hydrauliques qui maximisent la probabilité d'érosion du merlon (i.e., mobilisation pour des crues Q1-2 afin d'éviter tout risque de stabilisation par la végétation).

Enfin, il apparaît nécessaire de coupler une telle évaluation de la dynamique hydro-sédimentaire avec une évaluation hydromorphologique du secteur restauré (qualité des habitats aquatiques, colmatage du lit, etc.). Cette double approche (qui sera traitée dans l'action C.4) permettra de fournir des recommandations, non seulement sur le choix des scénarios d'intervention (démantèlement des casiers vs. recharge sédimentaire), mais également sur les modalités de mise en œuvre des interventions (quantités injectées, localisation des sites de recharge, granulométrie utilisée, etc.).

2.5.2 Comparaison inter-sites

Contrôle hydraulique sur les distances de transport

D'après la littérature relative aux traçages sédimentaires, il est reconnu que l'intensité du débit de pointe est le paramètre majeur qui contrôle la mobilité de la charge de fond (Vázquez-Tarrío et al., 2018). Néanmoins, cette dernière dépend également, dans une certaine mesure, de la configuration morphologique du chenal et de la texture du lit (Vázquez-Tarrío et al., 2018 ; Peeters et al., 2021). 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).

Dans le cas du Rhône, on observe pour chaque site étudié un bon coefficient de détermination (R^2) pour la régression linéaire entre la distance moyenne entre deux relevés successifs des traceurs, d'une part, et la puissance spécifique du débit de pointe de la période comprise entre les deux relevés successifs, d'autre part (Figure 26). Le fait que les relations établies pour chaque site ne présentent pas la même pente s'explique par les différences morphologiques des secteurs étudiés (i.e., en termes de configuration morphologique du chenal et de texture du lit). 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 et DZM). Le secteur rechargé 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.

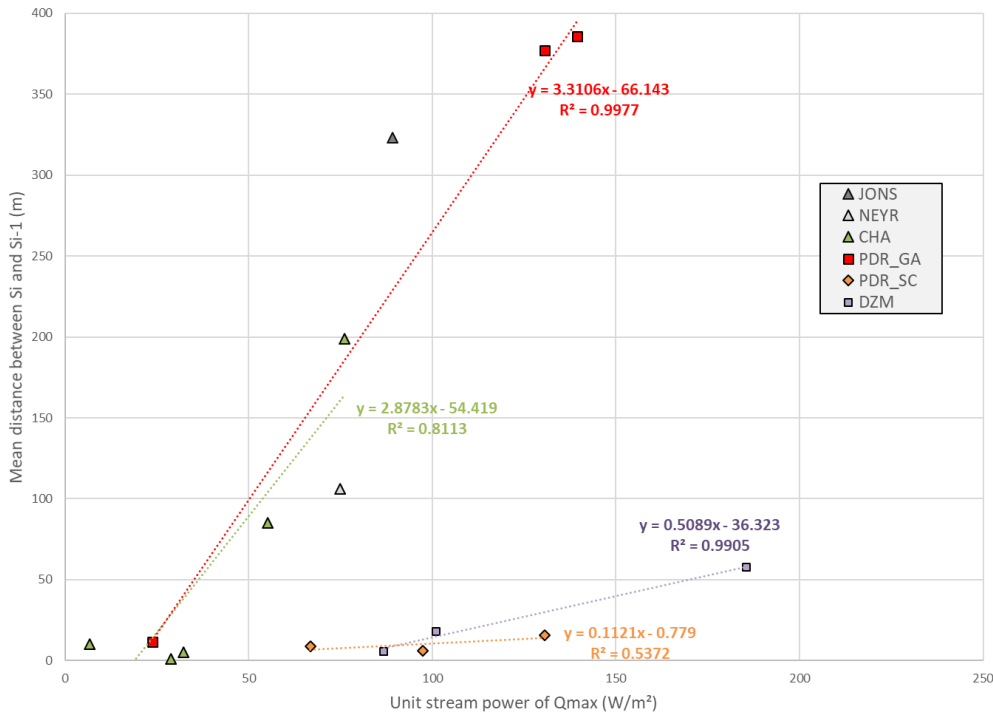


Figure 26. Rapport entre la distance moyenne entre deux relevés successifs des traceurs et la puissance spécifique du débit de pointe de la période comprise entre les deux relevés successifs

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). 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) :

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

A ce stade, les calculs ont été réalisés pour 3 sites (CHA, PDR_SC et PDR_GA) de deux manières différentes : en comparant deux relevés successifs (période entre S_i et S_{i-1} ; Figure 27 haut) et en comparant le relevé S_i avec l'injection (période entre S_i et S_0 ; Figure 27 bas). Les relations pour chaque site semblent relativement bonnes à ce stade avec ces deux métriques. Seule la relation basée sur les relevés successifs pour le site de CHA n'est pas vraiment satisfaisante 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. 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.

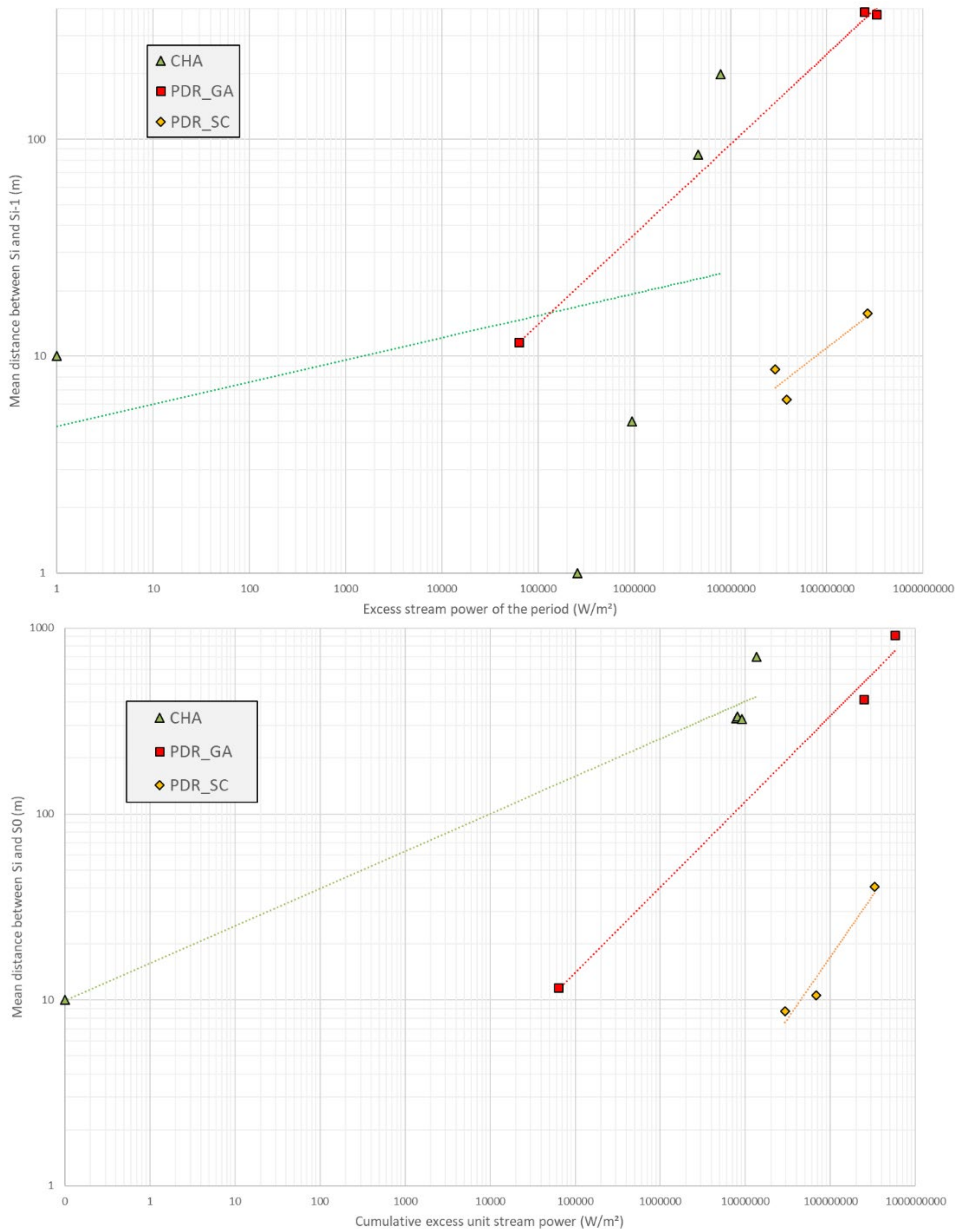


Figure 27. Rapport entre la distance moyenne et l'excès de puissance spécifique de la période étudiée : (a) en comparant deux relevés successifs (période entre S_i et S_{i-1}) ; (b) en comparant le relevé S_i avec l'injection (S_0)

Autres variables de contrôle 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 :

$$\omega^* = \frac{g \cdot S \cdot Q}{w \cdot (1.65 \cdot g \cdot D_{50})^{3/2}} \quad \text{Équation 4}$$

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 (Lajeneusse et al., 2010 ; Phillips et al., 2013). Cette métrique permet de mettre en évidence l'effet morphologique du fond 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* ; *MT* : *multithread* ; sur la Figure 28). 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). Enfin, les conditions d'imbrication se marquent également en faisant la distinction entre le premier relevé après injection (*unconstrained exp.*) et les autres relevés (*constrained exp.*).

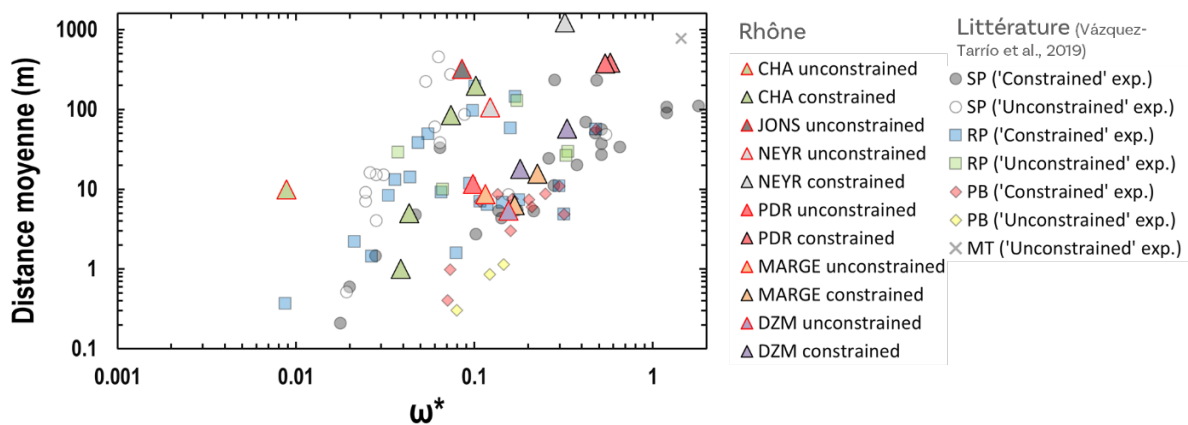


Figure 28. Rapport entre la distance moyenne et la puissance adimensionnelle pour le Rhône et un ensemble de données de traçage rassemblé par Vázquez-Tarrío et al. (2019) (*SP* : lit en escaliers, *step pool* ; *RP* : lit avec alternance seuil/mouille, *riffle pool* ; *PB* : lit plat, *plane bed* ; *MT* : lit à chenaux multiples, *multithread*).

3. Modélisation hydro-sédimentaire

3.1 Rappels théoriques

Dans le cadre des actions de recharge 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 29) :

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 recharge 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 (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).

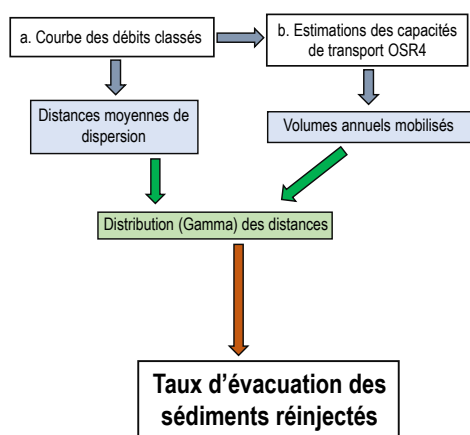


Figure 29. Schéma méthodologique suivi pour l’estimation des temps de propagation des injections ponctuelles de sédiment grossier.

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 sédiment grossier 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-Bœuf ; 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 30).

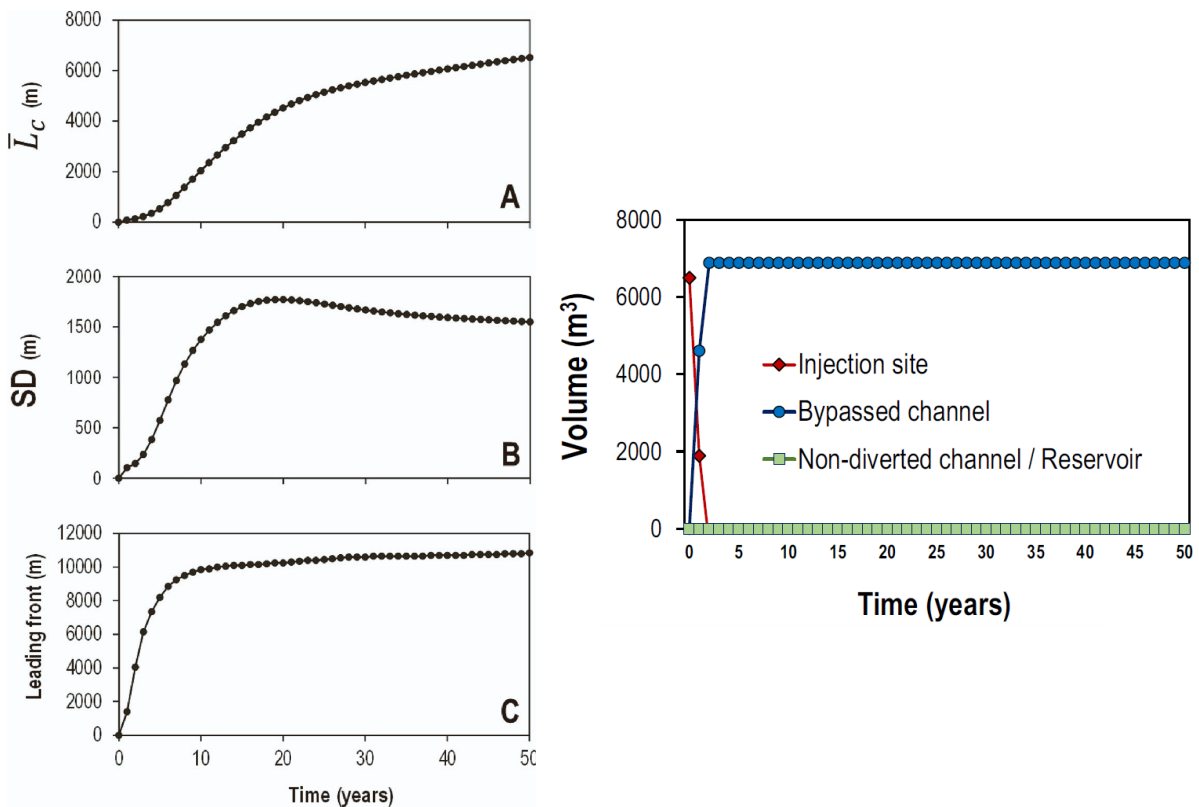


Figure 30. Recharge sédimentaire de la Platière : évolution au cours du temps de la position du centroïde du panache sédimentaire (\bar{L}_c ; en m), de l'écart-type (SD ; en m), de la position du front de propagation (en m), et du volume de sédiment au niveau du site d'injection, dans le RCC et dans 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 30 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 30 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 30 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 31). 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 30 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.

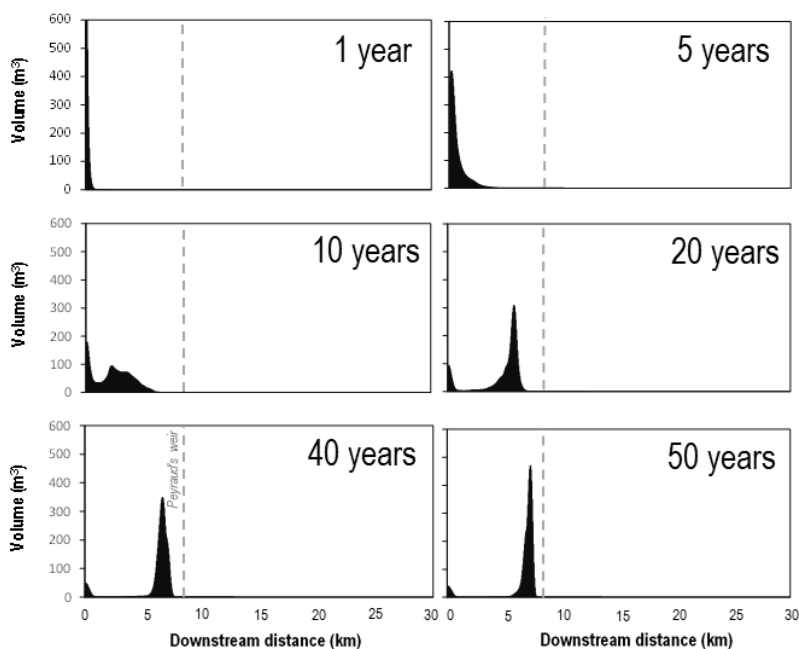


Figure 31. Recharge sédimentaire de la Platière : répartition longitudinale du volume de sédiment depuis le site de réinjection sédimentaire (= 0 km) après 1 an, 5 ans, 10 ans, 20 ans, 40 ans et 50 ans.

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 15000 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 32 A). Un ralentissement se marque néanmoins aux alentours de 15 ans après injection (changement de pente de la courbe de la Figure 32 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 34). 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 33). 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 Figures 33 et 34, 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.

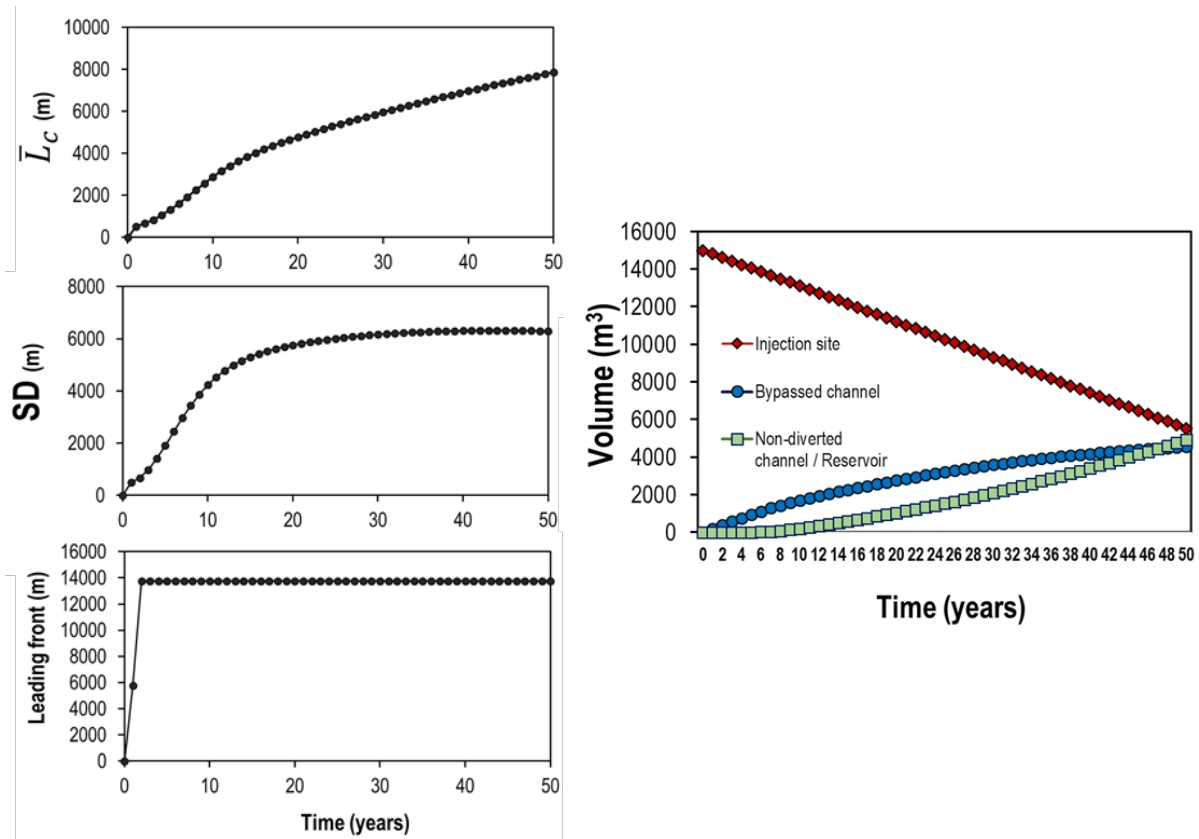


Figure 32. Recharge sédimentaire de Motz : évolution au cours du temps de la distance moyenne (\bar{L}_C ; en m), de l'écart-type (SD ; en m), de la position du front de propagation (en m), et du volume de sédiment au niveau du site d'injection, dans le RCC et dans le Rhône Total.

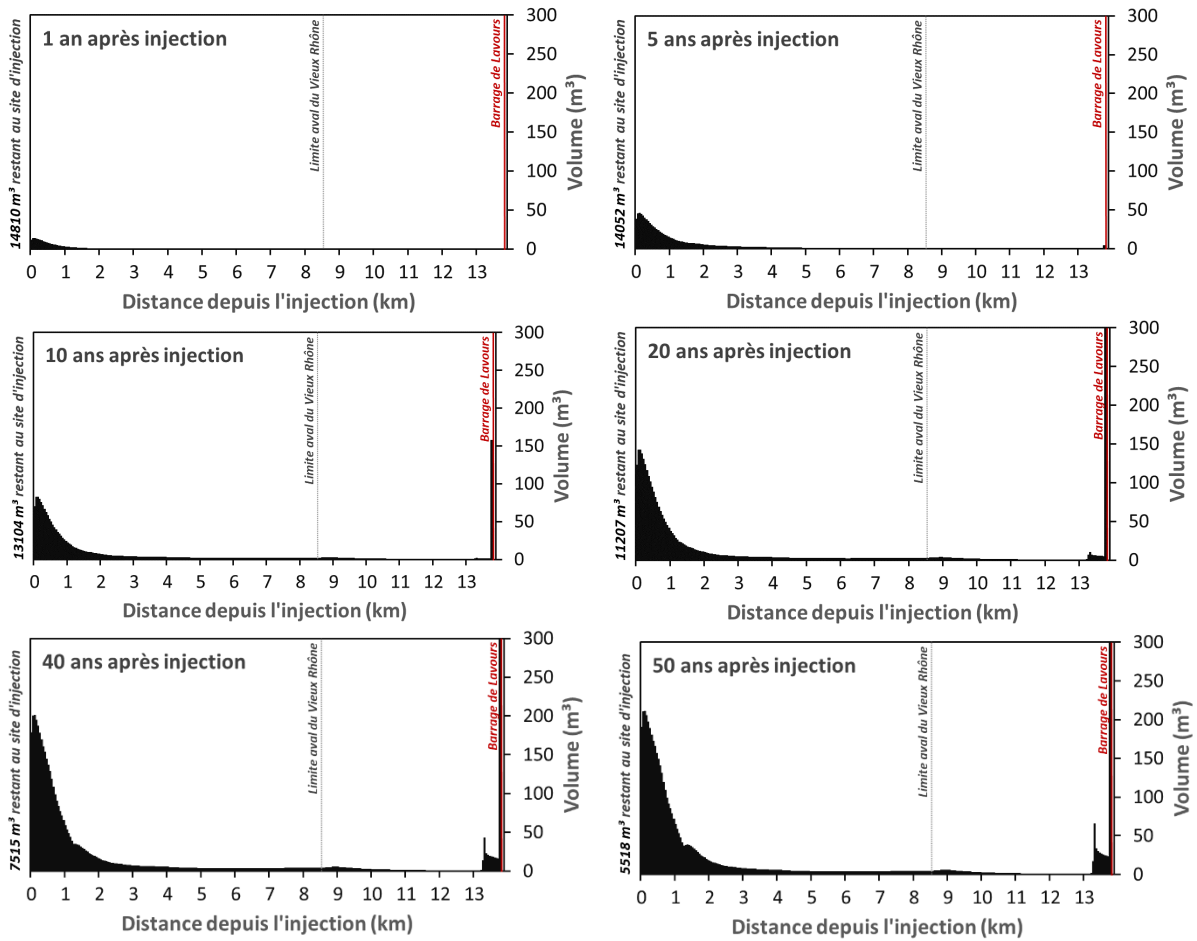


Figure 33. Recharge sédimentaire de Motz : répartition longitudinale du volume de sédiment depuis le site de réinjection sédimentaire (= 0 km) après 1 an, 5 ans, 10 ans, 20 ans, 40 ans et 50 ans.

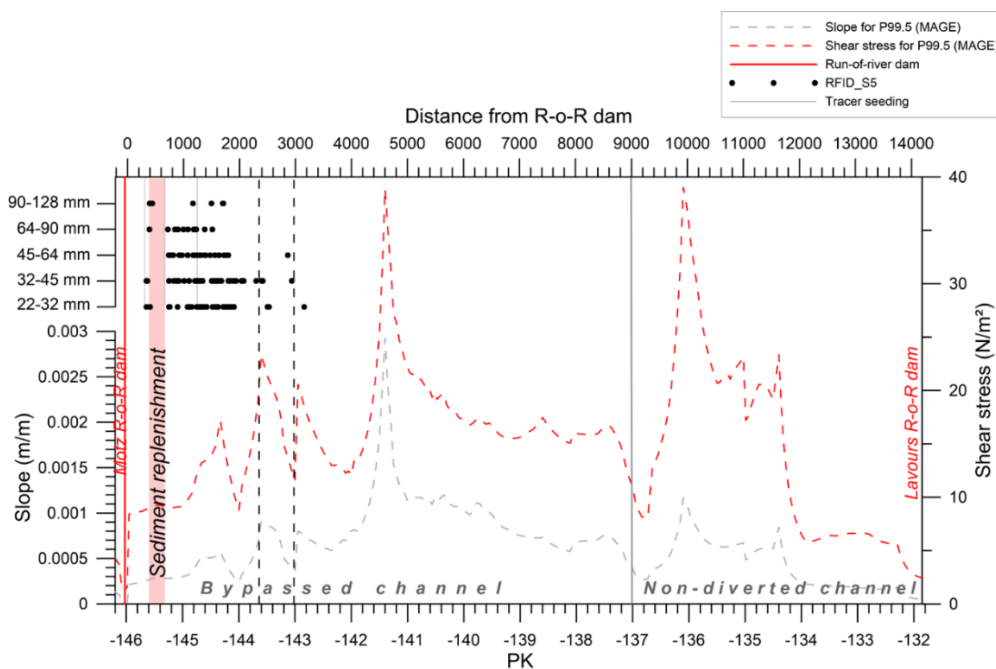


Figure 34. Recharge sédimentaire de Motz : évolution longitudinale de la pente et des contraintes de cisaillement, et position des traceurs RFID pour le dernier relevé (S5).

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). Quoiqu'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., 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 35). 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).

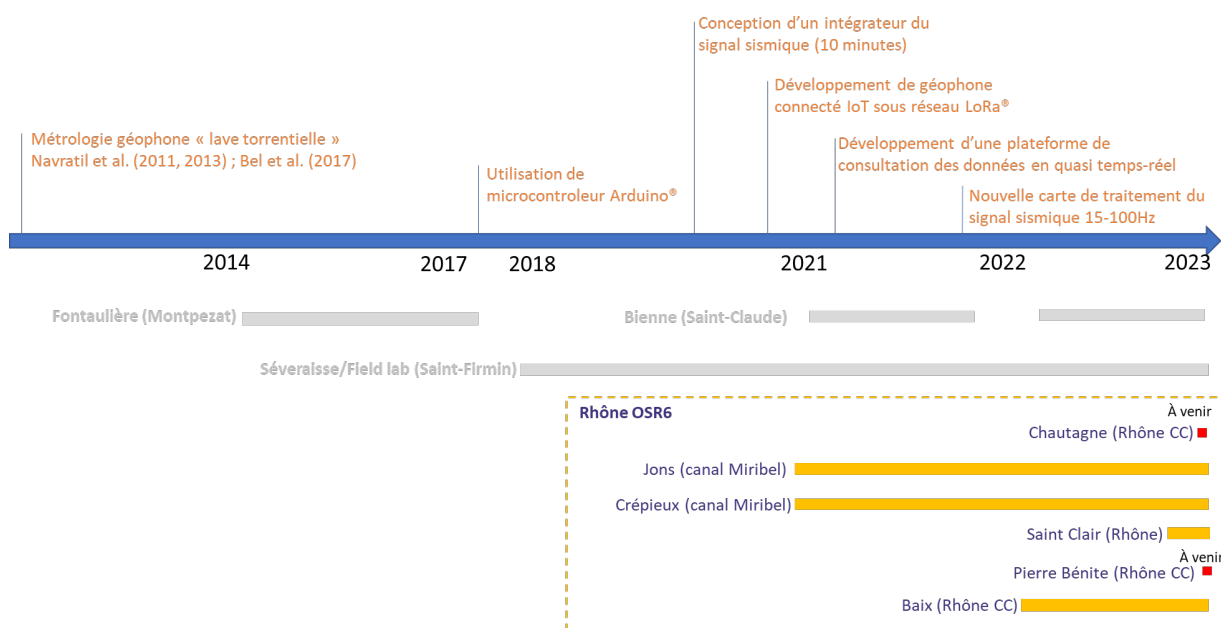


Figure 35. Frise chronologique des développements métrologiques réalisés sur les géophones utilisés par la plateforme OMEAA.

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 » et connectée (IoT) en utilisant la plateforme de prototypage IDE Arduino® ;

- le développement de ces signaux sismiques dans le cadre de l'IoT (*Internet of Things*). 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, communicants 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 (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 21 et à la Figure 36).

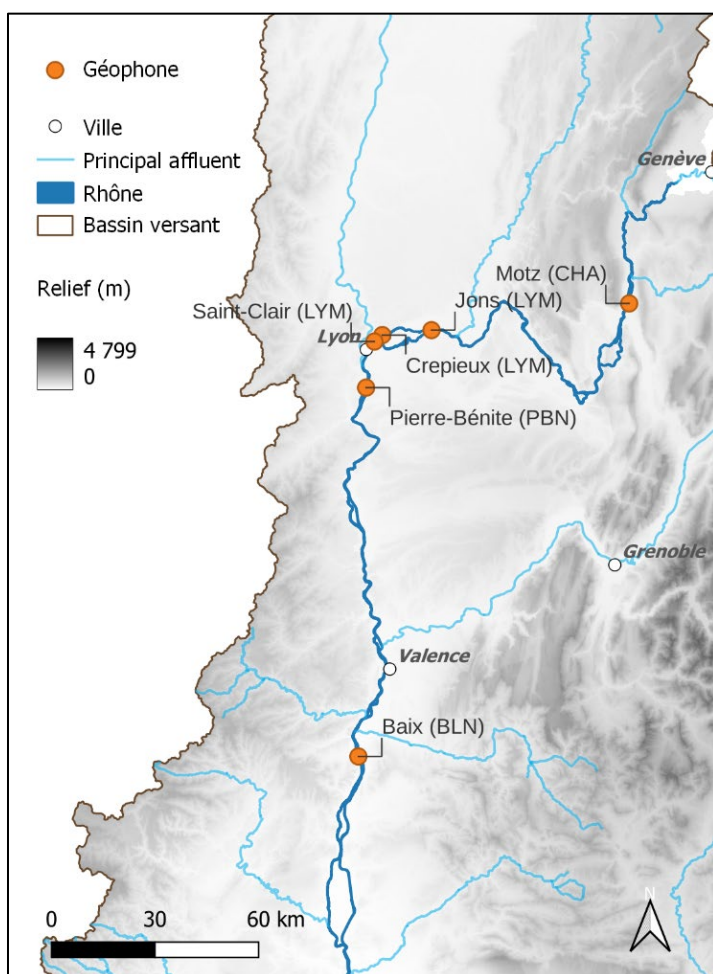


Figure 36. Localisation des géophones installés et à installer sur le Rhône

Tableau 21. Synthèse des géophones installés et à installer sur le Rhône

Site (secteur)	Contexte	Projet	Date d'installation	Nbre de stations	Autres données
Rhône à Motz (CHA)	Recharge sédimentaire	OSR6	NA	1 à venir	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)
Rhône à Saint-Clair (LYM)	Quantification charriage à l'entrée de Lyon	OSR6	13/01/2023	1	NA
Rhône à Pierre-Bénite (PBN)	Future recharge Sédimentaire/état initial	OSR6	NA	1 à venir	NA
Rhône à Baix (BLN)	Quantification charriage + Recharge sédimentaire + transfert	OSR6	5/05/2022	3	RFID, hauteur d'eau

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

Tout d'abord, deux géophones 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 avec ce type de dispositif. Celui installé à Jons se trouve environ 350 m en aval du barrage de Jons (illustrations à la Figure 37). Cette position a pour but d'enregistrer le signal du charriage, transport qui a lieu uniquement lorsque les vannes du barrage sont ouvertes. De plus, le site est équipé de traceurs RFID, ce qui permet de confirmer si le signal enregistré est bien dû à du charriage.



Figure 37. 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)

Quant au géophone installé plus en aval, à Crépieux, il se trouve à proximité d'un autre géophone d'un autre type (installé dans une conduite sous-fluviale par Burgeap), avec lequel les données enregistrées pourront être comparées.

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 météorologiques et techniques inhérentes aux approches de terrain, ces résultats ont mis en lumière des éléments intéressants (corrélation du signal sismique avec le débit, effets du fonctionnement des vannes du barrage, impact du bruit environnant). 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. De plus, un troisième géophone a été installé le 13/11/2022 sur le Rhône à Saint-Clair (Caluire), juste en aval du grand banc de la rive droite (banc situé en aval du seuil de la Feyssine).

4.3 Le Vieux Rhône de Baix-le-Logis-Neuf

Un second site a été équipé de trois géophones en mai 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 1800 m de long. Une partie des matériaux excavés a été réinjectée dans le Vieux Rhône. Ainsi, 12000 m³ de graviers ont été placés dans le secteur situé en aval du barrage du Pouzin (Figure 38 et Figure 39). Deux autres injections d'environ 4000-5000 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 recharge 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 39). 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 38. Le Vieux Rhône à Baix : travaux de recharge sédimentaire sur le site amont en novembre 2021 (photo de Nedjma Salhi, CNR)

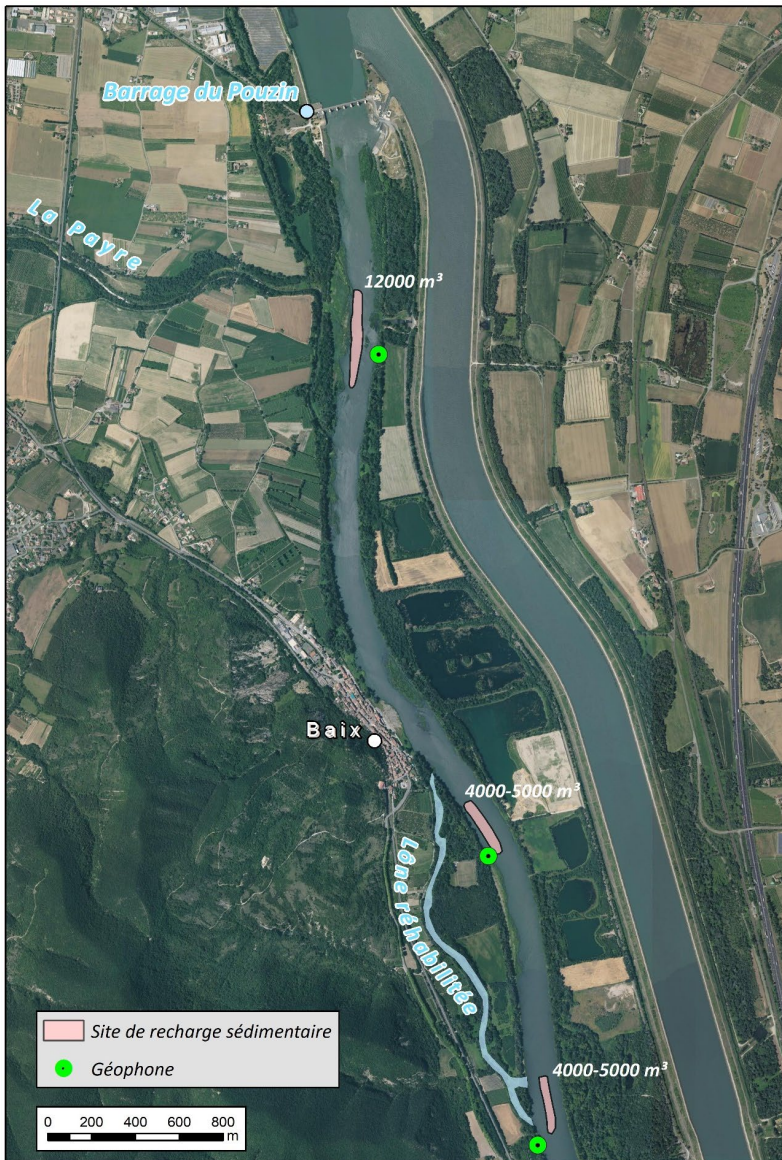


Figure 39. Le Vieux Rhône à Baix : localisation des sites de recharge sédimentaire et des stations géophone

4.4 Résultats issus des premières acquisitions

Sensibilité aux bruits environnants et filtration du signal

L'analyse des signaux enregistrés pour l'ensemble des sites montre que le signal géophonique est très sensible aux bruits 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 valeurs durant les heures d'activité de la carrière (Figure 40 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 40 bas).

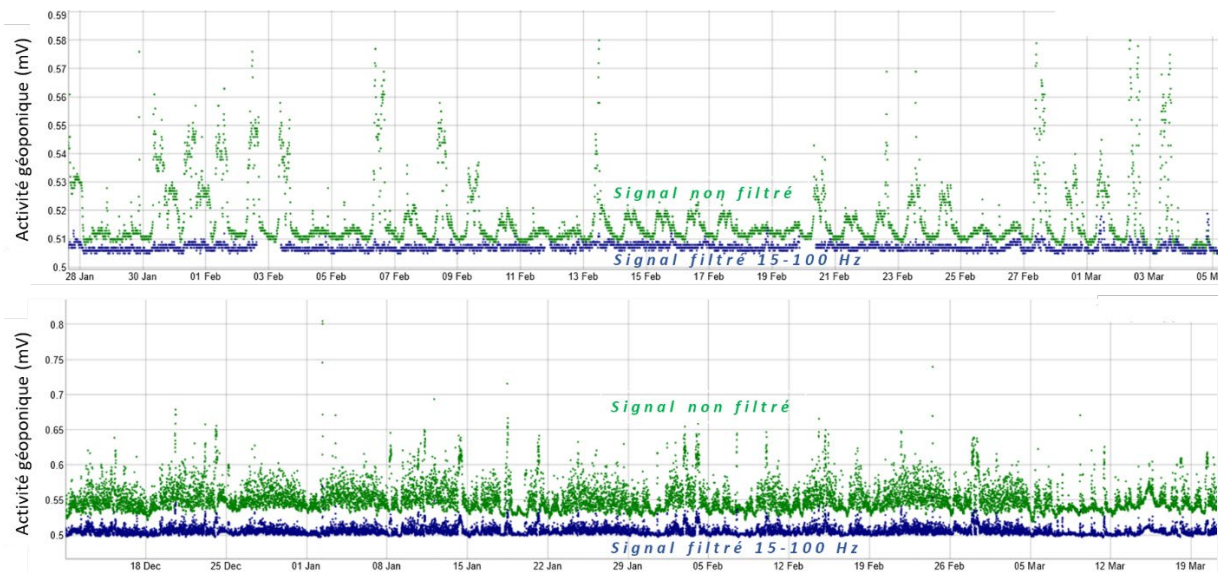


Figure 40. Activité sismique pour les sites de Jons (en haut) et de Crépieux (en bas) : comparaison entre le signal non filtré (en vert) et le signal filtré sur la fréquence du charriage (15-100 Hz ; en bleu)

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 41 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) ou une activité de carrière (à plus de 6 km).

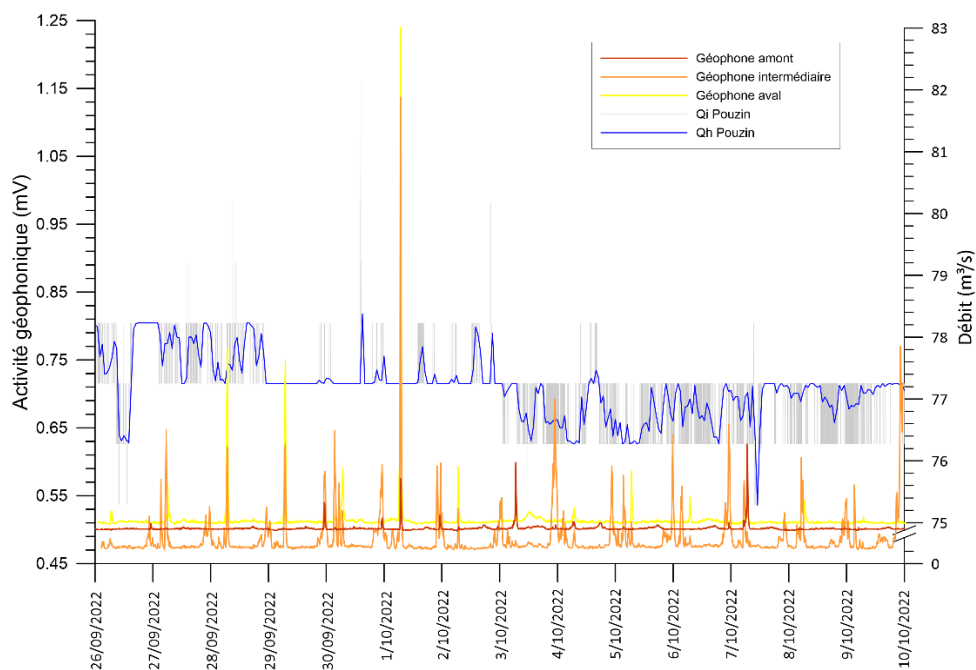


Figure 41. Activité sismique et débit enregistrés pour les 3 géophones mis en place le long du Vieux Rhône de Baix-le-Logis-Neuf entre le 26/09/2022 et le 10/10/2022 (carte avec signal non filtré). Débits horaires (Qh) et débits instantanés (Qi) bruts et non validés fournis par la CNR (station limnigraphique du Pouzin)

Sur la base de ces premiers résultats, une nouvelle carte de traitement 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 (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 (fréquence d'échantillonnage de 5 Hz) avec un microcontrôleur Arduino® et vi) envoyé sur le site OpenDataEau.org via un protocole Lora®. L'amplitude du signal (en mV) est ainsi directement dérivée de l'énergie 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 avec un doublement de l'instrumentation (ancienne et nouvelle). Il apparaît que le bruit lié à l'activité de la carrière à Jons est relativement bien filtré (Figure 40 haut). C'est également le cas mais dans une moindre mesure pour le bruit du trafic ferroviaire à Crépieux (Figure 40 bas).

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

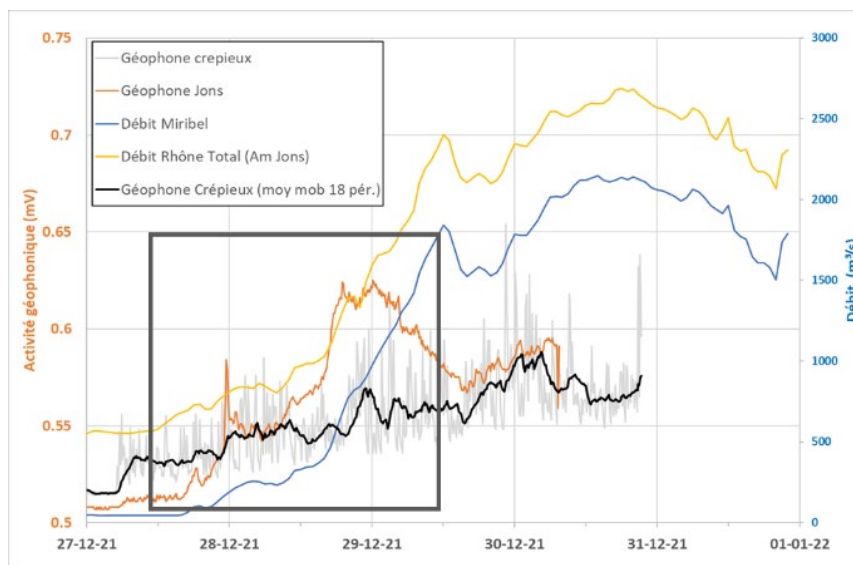
Pour le site de Jons, l'analyse du signal, et plus particulièrement l'interprétation des pics d'intensité, sont délicats en raison des opérations d'ouverture/fermeture des vannes du barrage situé environ 350 m en amont. En période de crue, ces vannes sont progressivement ouvertes afin d'augmenter la part de débit du Rhône total vers le Vieux Rhône (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 42). 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 :

- i. Hypothèse 1 : dans les deux cas, en lien direct avec l'augmentation du bruit hydraulique ;
- ii. Hypothèse 2 : dans les deux cas, à cause du charriage provoqué par l'augmentation du débit ($Q > Q_c$) au niveau des bancs situés entre le barrage et le géophone ;
- iii. Hypothèse 3 : dans le premier cas (abaissement de la partie supérieure des vannes), en raison du bruit hydraulique de la chute d'eau liée à la surverse ;
- iv. Hypothèse 4 : dans le second cas (vannes relevées), 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 42. 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 43 (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). Dans ce contexte, il semble en effet peu probable que cette hystérésis soit liée à un changement de la nature du fond du chenal.



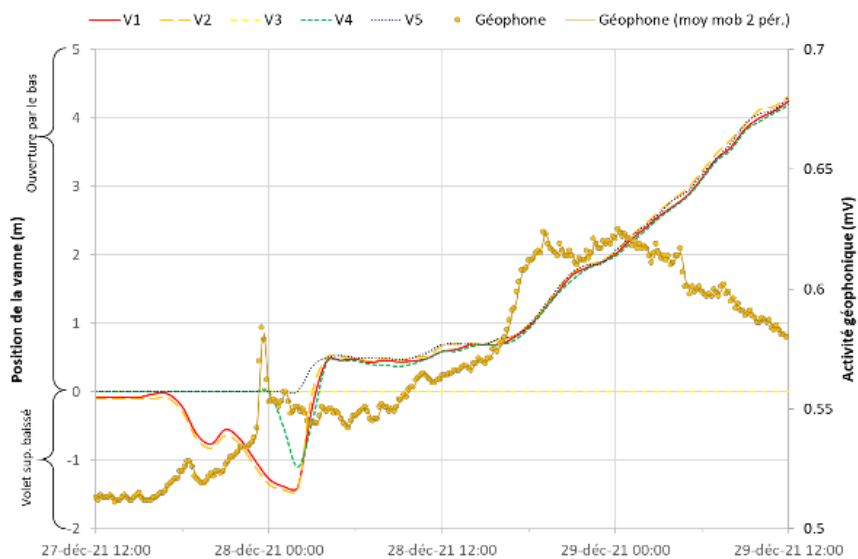


Figure 43. Activité géophonique et débit enregistrés sur le site de Jons entre le 27/12/2021 et le 1/01/2022 (en haut) et détail de la période 27-29/12/2022 avec la position des vannes du barrage (en bas ; les numéros et codes de couleur des vannes sont associés à ceux de la Figure 42). Débits horaires et hauteur de la position des vannes du barrage de Jons fournis par EDF.

L'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). Sur la Figure 43 (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 un bruit de fond hydraulique local. Il pourrait par contre être lié à une remobilisation du banc de galets stockés en amont du géophone 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. Ceci confirme bien que le pic d'activité observé peut être associé au transit d'une vague de sédiment (charriage), 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 44). 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 3, 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 de la retenue (hypothèse 4). Une décorrélation entre le débit et l'activité sismique est ensuite observée.

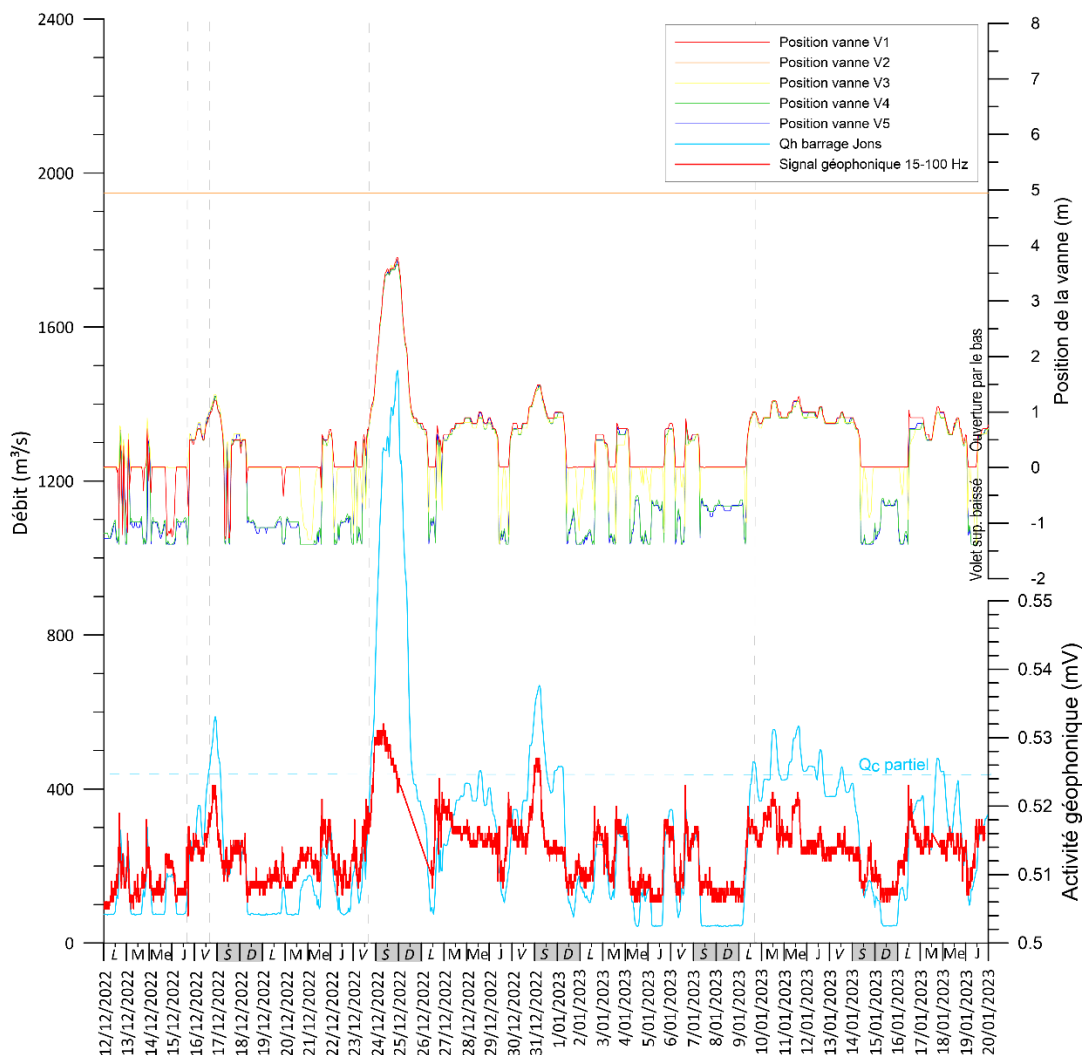


Figure 44. Activité sismique et débit enregistrés sur le site de Jons entre le 27/12/2021 et le 1/01/2022 (à gauche) et détail de la période 27-29/12/2022 avec la position des vannes du barrage (à droite ; les numéros et codes de couleur des vannes sont associés à ceux de la Figure 42). Débits horaires et hauteur de la position des vannes du barrage de Jons fournis par EDF.

Pour les géophones installés à Baix, l'analyse du signal n'a pas montré ce genre de corrélation (Figure 45). Seule la crue du 25/12/2022 (882 m³/s) a entraîné une montée du signal sismique pour les géophones amont et intermédiaire (pas pour le géophone aval). Il faut toutefois préciser que la crue la plus importante de la période hydrologique étudiée n'a probablement pas atteint un débit suffisamment élevé ($Q < Q_c$) et que le charriage devait être dès lors limité.

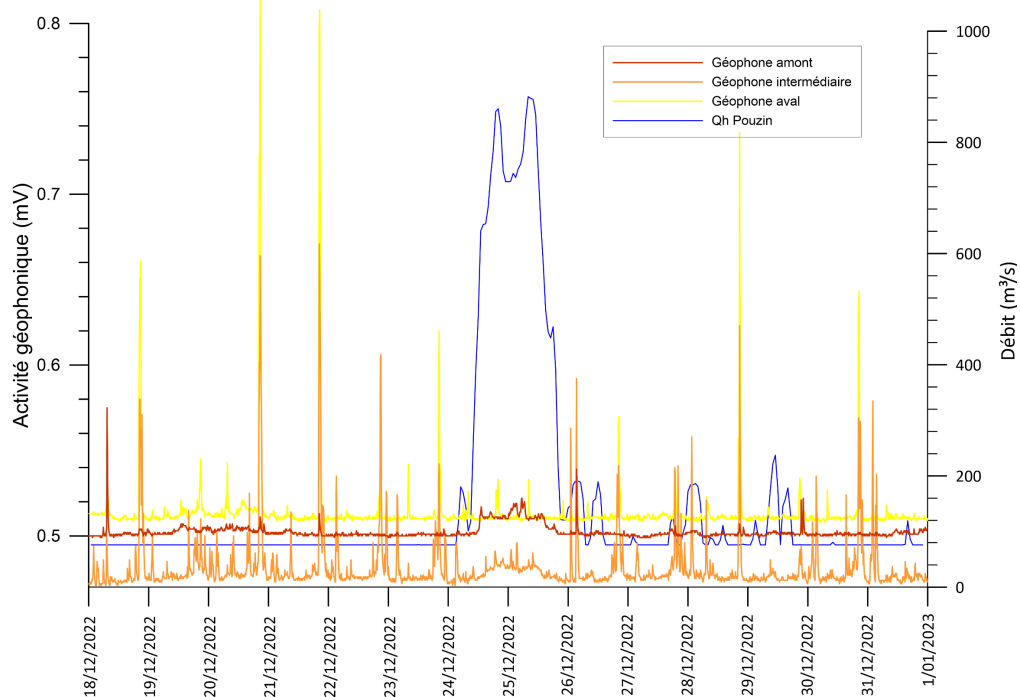


Figure 45. Activité sismique et débit enregistrés pour les 3 géophones mis en place le long du Vieux Rhône de Baix-le-Logis-Neuf entre le 18/12/2022 et le 1/01/2023 (carte avec signal non filtré). Débits horaires bruts et non validés fournis par la CNR (station limnographique du Pouzin)

5. Travail en cours et perspectives

Le présent rapport a permis de restituer les travaux réalisés durant cette deuxième année du programme OSR6 (action C3). Deux relevés RFID ont été réalisés (à PDR et à CHA), 4 nouvelles stations géophone ont été installées (1 à Saint-Clair et 3 à Baix) et 2 secteurs rechargés ont fait l'objet d'une modélisation de la propagation des sédiments injectés.

Le travail prévu pour la troisième année va d'abord concerner la prospection des traceurs RFID sur deux sites : le Vieux Rhône de Donzère-Mondragon (en mai-juin 2023) et le canal de Miribel (en septembre 2023). Ces nouvelles données viendront compléter les données issues des relevés précédents, ce qui permettra d'enrichir la synthèse débutée dans ce rapport sur les traceurs RFID déployés sur le Rhône. En plus de la comparaison inter-sites, dont les premiers résultats sont présentés dans ce rapport, cette synthèse comprendra également un volet sur les conditions hydrauliques locales au niveau des sites d'injection (sous réserve de la disponibilité de modèles 2D). L'intégration de ces données permettra de mieux comprendre les conditions de mise en mouvement des sédiments au droit des sites d'injection (notamment pour le site de Motz).

En ce qui concerne les géophones, deux nouveaux dispositifs de mesure seront installés durant l'année 3 : un sur le RCC de Chautagne (secteur dynamique) et un sur le RCC de Pierre-Bénite (secteur pour l'instant pavé où une recharge sédimentaire est prévue prochainement). Ce dernier permettra de suivre l'activité sismique avant la mise en œuvre du projet de restauration (i.e., sans transport solide). De plus, les dispositifs installés précédemment seront toujours suivis. Ces nouvelles acquisitions de données devraient nous permettre d'obtenir des chroniques sismiques sur de longues durées pour des environnements variés (secteur rechargé, secteur pavé et secteur à transport solide actif en aval d'un barrage). Ces résultats pourront de surcroît être couplés avec les données RFID. Enfin, le travail portera également sur le développement de nouvelles améliorations métrologiques, notamment en termes d'autonomie énergétique et de développement hors réseau LoRa. Le travail sur l'analyse du bruit sera également poursuivi afin d'en identifier les limites, et d'évaluer et d'attribuer une incertitude sur la mesure sismique.

Enfin, concernant la modélisation de la propagation aval des volumes injectés réalisée à Chautagne, un effort particulier sera réalisé en vue d'améliorer la méthode en intégrant le transport des sédiments autochtones (hors recharge sédimentaire), qui n'était pas pris en compte dans les travaux précédents (prise en compte du transport des matériaux injectés uniquement).

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
- 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. et 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.
- Chardon V., Schmitt L., Arnaud F., Piégay H., Clutier A. (2021). Efficiency and sustainability of gravel augmentation to restore large regulated rivers: Insights from three experiments on the Rhine River (France/Germany). *Geomorphology*, 380:107639.
- CNR (2019). Suivi d'une opération de réinjection sédimentaire dans le Vieux-Rhône de Chautagne, *rapport d'étude*, DIGP19-144-00.
- 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., 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.
- Lajeunesse E., Malverti L. et Charru F. (2010). Bed load transport in turbulent flow at the grain scale: experiments and modeling, *Journal of Geophysical Research*, 115.
- 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.
- 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., Laigle 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.
- Phillips CB., Martin RL. et Jerolmack DJ. (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. et Parker, G. (2016). Quantifying the Morphological Print of Bedload Transport. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(6), 809–822
- 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.

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-Tarrío D., Batalla R.J. (2019). Assessing controls on the displacement of tracers in gravel-bed rivers. *Water (Switzerland)*, 11, 1-21.

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

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

Vázquez-Tarrío 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

